ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ"

Том 69

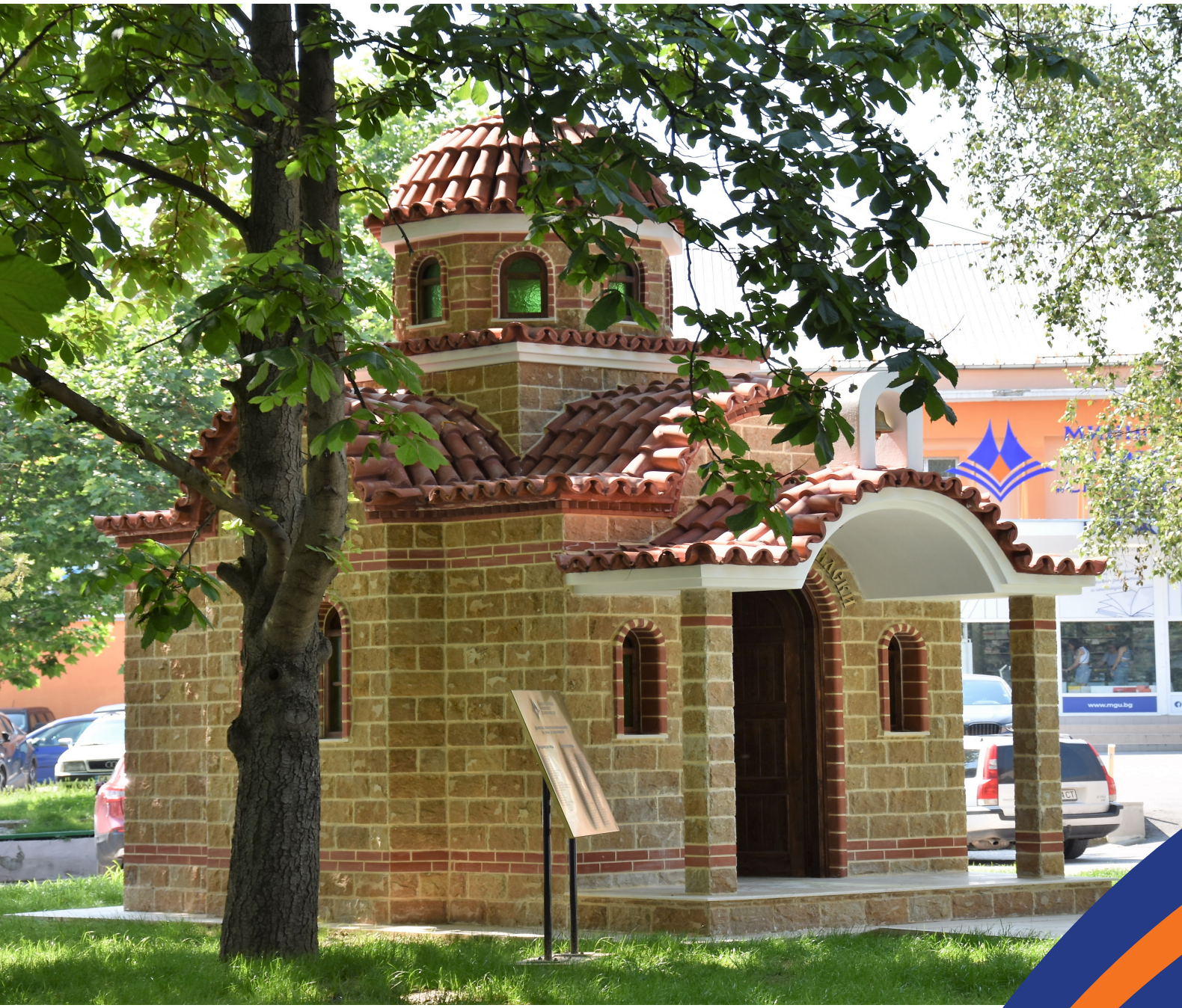
МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ"

ANNUAL OF UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI"

Volume 69

София 2026

Sofia 2026



ГОДИШНИК

НА

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

„СВ. ИВАН РИЛСКИ“ – СОФИЯ

ТОМ 69

ANNUAL

OF

UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY

“ST. IVAN RILSKI” – SOFIA

VOLUME 69

2026

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

Доц. д-р Мариана Трифонова – главен редактор
Проф. д-р Маринела Панайотова
Проф. д-р Борис Вълчев
Проф. д-р Евгения Александрова
Доц. д-р Ясен Горбунов
Гл. ас. Милена Първанова – стилов редактор английски език

Инж. Костадинка Конакчийска – секретар

EDITORIAL BOARD

Assoc. Prof. Dr. Mariana Trifonova – Editor-in-Chief
Prof. Dr. Marinela Panayotova
Prof. Dr. Boris Valchev
Prof. Dr. Evgeniya Aleksandrova
Assoc. Prof. Dr. Yassen Gorbounov
Chief Assist. Prof. Milena Purvanova – English Editor

Eng. Kostadinka Konakchiyska – Secretary

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“
1700 София, България
ул. „Проф. Боян Каменов“ 1
http://www.mgu.bg

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”,
1, Prof. Boyan Kamenov Str.,
1700 Sofia, Bulgaria

ISSN 2738-8808 (print)
ISSN 2738-8816 (online)

Издателска къща „Св. Иван Рилски“, София, 2026
Publishing House “St.Ivan Rilski”, Sofia, 2026

СЪДЪРЖАНИЕ

CONTENTS

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИЯ И ПРОУЧВАНЕ НА МИНЕРАЛНИ И ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ
SECTION GEOLOGY AND EXPLORATION OF MINERAL AND ENERGY RESOURCES

Божинова-Попова, И. Премествания на терена вследствие изграждане на дълбоки изкопи – измервания, примери и анализ **13**
Bozhinova-Popova, I. Ground Displacements Caused by the Construction of Deep Excavations – Measurements, Case Studies, and Analysis

Георгиева, А., Николова, М. Приложение на линейното оптимиране в управлението на отпадъците **18**
Georgieva, A., Nikolova, M. Application of Linear Optimisation in Waste Management

Димитров, Хр. Пермски езера тип плая в района на Мирово **21**
Dimitrov, H. Permian Playa-Type Lakes in the Mirovo Area

Илиева-Обретенова, М., Томова, М. Публикация в няколко стъпки **27**
Ilieva-Obretenova, M., Tomova, M. Publication in Several Steps

Илиева-Обретенова, М., Томова, М. Индуцирана от горещи вълни нестабилност на минералите в Европа **32**
Ilieva-Obretenova, M., Tomova, M. Heatwave Induced Mineral Instability across Europe

Йовчев, Д., Страхилов, Д. Нови данни за сребросъдържаща минерализация в южната периферия на находище „Милин камък“, Западно Средногорие **38**
Yovchev, D., Strahilov, D. New Data on Silver-Bearing Mineralisation in the Southern Periphery of the *Milin Kamak* Deposit, Western Sredna Gora Mountains

Каракашева-Цанкова, З., Цанков, Хр. Георадарът като безразрушителен метод за картиране на коренова система: изследване на две секвои в Боровец **44**
Karakasheva-Tzankova, Z., Tzankov, C. Ground-Penetrating Radar as a Non-Destructive Method for Root System Mapping: a Case Study of Two Sequoia Trees in Borovets

Климентов, Ст., Русков, К. Пространствена променливост на злато-сребърната минерализация в находище „Седефче“ (Източни Родопи) – геостатистически подход **49**
Klimentov, St., Rouskov, K. Spatial Variability of Gold and Silver Mineralisation in the *Sedefche* Deposit (the Eastern Rhodopes, Bulgaria): a Geostatistical Approach

Куницка, М., Янович, О. Оценка на влиянието на височината на GNSS приемника върху точността на RTK измерванията **55**
Kunytska, M., Yanovych, O. Assessment of the Influence of GNSS Receiver Height on RTK Measurement Accuracy

Маринова, К., Зарева, Е., Михайлов, Л., Паздеров, Р. Нови данни за флуоресциращо опализирано дърво от района на село Драгойново, Първомайско, България **58**
Marinova, K., Zareva, E., Mihaylov, L., Pazderov, R. New Data of Fluorescent Opalised Wood from the Village of Dragoynovo, the Parvomay Area, Bulgaria

Мерачева, Г., Занева-Добранова, Е. Потенциални източници на „бял“ водород и геоложки предпоставки за проучване в България **63**
Meracheva, G., Zaneva-Dobranova, E. Potential Sources and Geological Setting of “White” Hydrogen for Future Exploration in Bulgaria

Миленкович, Б. Геофизични методи за ефективно планиране и оптимизация на добива на полезни изкопаеми в контекста на кръговата икономика и устойчивото управление на рисковете **68**
Milenković, B. Geophysical Methods for Effective Planning and Optimisation of Mineral Resource Extraction in the Context of Circular Economy and Sustainable Risk Management

Николов, С., Кисьов, А. Приложение на 2D електротомографията в етапа на инженерно-геоложките проучвания на строителна площадка **74**
Nikolov, S., Kisyov, A. Application of 2D Electromyography in the Stage of Engineering and Geological Surveys on a Construction Site

Николова, Д., Русков, К., Маринов, Ив., Стойков, Ст. Минерална и геохимична зоналност на находище „Милин камък“, Западно Средногорие (България): интерпретация на база статистически анализ **78**
Nikolova, D., Rouskov, K., Marinov, Iv., Stoykov, St. Mineral and Geochemical Zoning of the *Milin Kamak* Deposit, Western Srednogorie (Bulgaria): Insights from Statistical Analysis

Петров, Цв., Кисьов, Ат., Стоянов, Н. 2D електротомографско проучване на проучвателна площадка за изграждане на пречиствателна станция за отпадни води **84**
Petrov, T., Kisyov, At., Stoyanov, N. 2D Geoelectrical Tomography Survey at a Proposed Wastewater Treatment Plant Site

Приставова, Ст., Маринова, К., Янева, М., Русков, К., Донкова, Й., Йовчев, Д., Ставрев, М., Георгиева, Хр., Иванова, Р., Радулов, А. Комбиниране на полева спектроскопия и електрически методи в проучването на критични суровини **88**
Pristavova, St., Marinova, K., Yaneva, M., Ruskov, K., Donkova, Y., Yovchev, D., Stavrev, M., Georgieva, Hr., Ivanova, R., Radulov, A. Combining Field Spectroscopy and Electrical Methods in Critical Raw Material Exploration

Стойков, Ст., Михайлов, Л., Апостолова, Р., Климентов, Ст. Баритна минерализация в района на рудното находище „Обичник“, Източни Родопи, България (предварителни данни) **94**
Stoykov, St., Mihaylov, L., Apostolova, R., Klimentov, St. Barite Mineralisation in the Area of the *Obichnik* Ore Deposit, the Eastern Rhodopes, Bulgaria (Preliminary Data)

Христов, А., Лаков, А. Сравнителен анализ и изменение на индекса GSI от етапа на проучването до строителството: опитът от тунел „Железница“ **98**
Hristov, A., Lakov, A. Comparative Analysis and Variation of the GSI Index from Site Investigation to Construction: Experience from the *Zheleznitsa* Tunnel

Цанков, Хр., Стефанов, Б. Приложение на естествения гама-фон и показателите за K, U и Th за непряка оценка на риска от натрупване на радон в приземни и сутеренни помещения **103**
Tzankov, C., Stefanov, B. Application of Natural Gamma Background and K, U, and Th Indicators for Indirect Assessment of Radon Accumulation Risk in Ground-Floor and Basement Rooms

СЕКЦИЯ **ДОБИВ НА ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ**
SECTION **EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES**

Божкова, Л. Стандартизация и контрол на качеството на водорода в специализирани газови мрежи: европейски и международни практики **111**
Bojkova, L. Standardisation and Quality Control of Hydrogen in Dedicated Gas Networks: European and International Practices

Божкова, Л. Инженерните и проектантски предизвикателства при транспортирането на въглероден диоксид по тръбопроводи: влияние на примесите и фазовите свойства **115**
Bojkova, L. Engineering and Design Challenges in the Pipeline Transportation of Carbon Dioxide: Influence of Impurities and Phase Properties

Бояджиев, М., Вучев, Ст., Георгиев, Л. Изследване и анализ на модели за аварийно изтичане на природен газ **118**
Boyadjiev, M., Vuchev, S., Georgiev, L. Research and Analysis of Emergency Natural Gas Leak Models

Вучев, Ст. Изследване на влиянието върху процеса на горене на смеси от водород и метан **121**
Vuchev, S. Study of the Influence on the Combustion Process of Hydrogen and Methane Mixtures

Грозданов, Св., Крайчев, Е. Опитно определяне и изследване на коефициента на мощността K_N на нов тип серия енергоспестяващи механични бъркачки с приложение в биотехнологиите **126**
Grozdanov, Sv., Kraychev, E. Experimental Determination and Investigation of the Power Number K_N of a New Series of Energy-Efficient Mechanical Agitators for Biotechnological Applications

Иванова, М. Хибридната система – енергия за бъдещето **131**
Ivanova, M. The Hybrid System – Energy for the Future

Крайчев, Е., Грозданов, Св. Опитно определяне и изследване на топлообмена на нов тип серия енергоспестяващи механични бъркачки в лабораторен реактор с медна серпентина **136**
Kraychev, E., Grozdanov, Sv. Experimental Determination and Investigation of Heat Transfer in a New Series of Energy-Efficient Mechanical Agitators in a Laboratory Reactor with a Copper Coil

Кюстелев, Ал. Оптимизация на работата на хибридни отоплителни системи чрез интеграция на топлинно съхранение **142**
Kustelev, A. Optimisation of the Operation of Hybrid Heating Systems through the Integration of Thermal Energy Storage

Митков, В. Определяне на дебита и устиевото налягане на газов сондаж при добив на газо-водородна смес от подземно газохранилище **146**
Mitkov, V. Calculation of Flow Rate and Wellhead Pressure for a Gas Well Producing a Gas-Hydrogen Mixture from an Underground Gas Storage Facility

Нецов, Д. Статистическо моделиране на отработването на скалоразрушаващи инструменти **151**
Netsov, D. Statistical Modelling of Drill Bits Dull

Пачеджиев, Б., Нецов, Д. Контрол на траекторията на сондажи: технологии и методи за правилно ориентиране в проучвателното сондиране **154**
Patchejieff, B., Netsov, D. Borehole Trajectory Control: Technologies and Methods for Accurate Orientation in Exploration Drilling

Тошев, П. Приложение на безглинести промивни течности при прокарване на хоризонтално насочени сондажи за безизкопно полагане на подземна инфраструктура **157**
Toshev, P. Application of Clay-Free Drilling Fluids in Horizontal Directional Drilling for Trenchless Installation of Underground Infrastructure

Янакиев, В. Интегриране на системи за откриване на течове във водородни транспортни мрежи: технологии, предизвикателства и перспективи **162**
Yanakiev, V. Integration of Leak Detection Systems in Hydrogen Transport Networks: Technologies, Challenges, and Perspectives

Янакиев, В., Бояджиев, М. Влияние на електрическите и електромагнитните полета върху газопроводи с катодна защита **166**
Yanakiev, V., Boyadjiev, M. Influence of Electric and Electromagnetic Fields on Cathodically Protected Gas Pipelines

СЕКЦИЯ ДОБИВ И ПРЕРАБОТКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ
SECTION MINING AND PROCESSING OF MINERALS

Ангелов, Т. Обзор на методите за третиране инфилтратни води от депа за твърди битови отпадъци **173**
Angelov, T. A Review of Landfill Leachate Treatment Methods

Андреева-Иванова, М. Технологии за рециклиране на критични суровини от минни отпадъци **179**
Andreeva-Ivanova, M. Technologies for Recycling Critical Raw Materials from Mining Waste

Асенов, Р. Оптимизиране на фрагментацията в масив от хорнфелзувани шисти чрез моделиране на промишлени пробивно-взривни работи с използване на специализиран софтуер – Paradigm (Austin Powder) **183**
Asenov, R. Optimisation of Fragmentation in a Hornfels Schist Rock Mass through Modelling of Industrial Drilling and Blasting Operations using Specialised Software: *Paradigm* (Austin Powder)

Балев, В. Влияние на минерални свързващи добавки върху якостните характеристики и консолидационното поведение на технологични минни отпадъци **189**
Balev, V. Influence of Mineral Binding Additives on the Strength Characteristics and Consolidation Behaviour of Technological Mine Waste

Берданков, М., Александрова, Н. Сравнителна оценка при класификацията на обекти в минни райони чрез използване на данни от различни типове сензори **194**
Berdankov, M., Aleksandrova, N. Comparative Evaluation of Feature Classification in Mining Regions via Multi-Modal Sensor Data

Борисов, Б., Павлов, П. Компетентностен профил и международно позициониране на инженерите по „Подземно строителство“ от МГУ „Св. Иван Рилски“ **200**
Borisov, B., Pavlov, P. Competency Profile and International Positioning of Underground Construction Engineers from UMG “St. Ivan Rilski”

Борисов, Б., Павлов, П. Еквивалентност на специалност „Подземно строителство“ в контекста на международното инженерно образование и англоезичната номенклатура **206**
Borisov, B., Pavlov, P. Equivalence of the “Underground Construction” Degree Programme in International Engineering Education and English-Language Nomenclature

Димитров, Ал., Панайотова, М. Първоначално проучване на излужването на антимон от оловен концентрат **214**
Dimitrov, A., Panayotova, M. An Initial Study on Antimony Leaching from Lead Concentrate

Димитров, Ст. Усъвършенстван ГИС подход за достъп до данни за концесии – изследване за област Перник **219**
Dimitrov, St. An Enhanced GIS Framework for Concession Data Accessibility: a Case Study of the Pernik Region

Колев, Д. Високо ефективен метод за газификация на целулозни отпадъци **224**
Kolev, D. A Highly Efficient Method for the Gasification of Cellulose Waste

Колев, Н., Савов, Пл., Вацкичева, М., Коларова, М., Ламбов, Л. Динамика на височината на атмосферния граничен слой и атмосферния аерозол в София и Крумовград през август 2024 **227**
Kolev, N., Savov, P., Vatzkitcheva, M., Kolarova, M., Lambov, L. Dynamics of the Height of the Atmospheric Boundary Layer and Atmospheric Aerosol in Sofia And Krumovgrad in August 2024

Куницка, М., Янович, О., Калчук, С. Оптимизация на методите за цифрово моделиране в минното дело, базирани на геостатистически и ГИС подходи **233**
Kunytska, M., Yanovych, O., Kalchuk, S. Optimization of Digital Modeling Methods in Mining Based on Geostatistical and GIS Approaches

Несторов, Н., Петров, М., Янкова, Т., Григорова, И. Оценка на разпределението на златото и медта в технологични продукти от обогатяване на меднопорфирни руди **236**
Nestorov, N., Petrov, M., Yankova, T., Grigorova, I. Evaluation of Gold and Copper Distribution in Technological Products of Porphyry Copper Ore Beneficiation

Несторов, Н., Петров, М., Янкова, Т., Григорова, И. Минераложка характеристика на златото в технологични продукти от обогатяване на меднопорфирни руди **241**
Nestorov, N., Petrov, M., Yankova, T., Grigorova, I. Mineralogical Characteristics of Gold in Technological Products of Porphyry Copper Ore Beneficiation

Попов, Н., Георгиев, П. Методи за отстраняване на манган от отпадъчни води: обзор и сравнителен анализ **247**
Popov, N., Georgiev, P. Methods for Manganese Removal from Wastewater: Review and Comparative Analysis

Пушкаров, М., Терзийски, Д. Синергия между транспорт и енергия: фотоволтаични панели върху лентови транспортьори **254**
Pushkarov, M., Terziyski, D. Synergy Between Transport and Energy: Photovoltaic Panels on Conveyor Belts

Стефановска, Р., Панов, З., Поповски, Р., Донева, Б. Многокритериална оценка на пригодността на въглищните находища в пелагонийския басейн за подземна газификация на въглища **260**
Stefanovska, R., Panov, Z., Popovski, R., Doneva, B. Multi-Criteria Assessment of the Suitability of Coal Deposits in the Pelagonian Basin for Underground Coal Gasification

Чаначев, Ал., Гичева, Г. Извличане на критични редкоземни метали от електронни отпадъци (**Nd, Pr, Dy**) – съвременни технологии и бъдещи насоки **267**
Chanachev, A., Gicheva, G. Extraction of Critical Rare Earth Metals (Nd, Pr, Dy) from Electronic Waste – Current Technologies and Future Perspectives

Червенков, Зл. Роля на човешкия капитал – компетентността и личностните компетенции на персонала при оптимизацията на процесите при подводен добив на полезни изкопаеми **273**
Chervenkov, Z. The Role of Human Capital – Competence and Personal Competencies of Personnel in the Optimisation of Processes in Underwater Mining of Mineral Resources

СЕКЦИЯ **МЕХАНИЗАЦИЯ, ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА МИНИТЕ**
SECTION **MINE MECHANISATION, ELECTRIFICATION, AND AUTOMATION**

Бончева, Р. Моделиране на добива на разчетна класа при полуавтогенни мелници на база производствени данни **281**
Boncheva, R. Modelling of the Calculated Size Fraction Yield in Semi-Autogenous Mills Based on Production Data

Бончева, Р. Определяне на относителния енергоразход на полуавтогенни мелници чрез компютърна обработка на данни от системите за управление **285**
Boncheva, R. Determining the Relative Energy Consumption of Semi-Autogenous Mills through Computer Processing of industrial Control System Data

Вълев, И., Джустров, К. Системи за съхранение и управление на енергия от микробни горивни клетки **290**
Valev, I., Dzhustrov, K. Power Storage and Management Systems from Microbial Fuel Cells

Джаров, В. Автоматизирано управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства **298**
Dzharov, V. Automated Control of a Zonal Sprinkler Fire Extinguishing System in Enclosed Spaces

Джаров, В. Сравнителен анализ на системи за управление на лабораторен модел на гумено-транспортна лента, базирани на Arduino Uno и PLC Arduino Opta **304**
Dzharov, V. Comparative Analysis of Control Systems for a Laboratory Conveyor Belt Model Based on *Arduino Uno* and *Arduino Opta PLC*

Дрънков, Ив., Константинова, Й. Разработване на OSINT инструмент за геолокационен анализ, базиран на координатна триангулация **311**
Drankov, I., Konstantinova, Y. Development of an OSINT Tool for Geolocation Analysis Based on Coordinate Triangulation

Златева, М., Джустров, К. Определяне на еквивалентното специфично съпротивление на почвата при двуслойни структури **315**
Zlateva, M., Dzhustrov, K. Determining the Equivalent Soil Resistance in Double-Layer Structures

Зъбчев, А., Александров, Р. Геометрия на двусъставно въртящо се магнитно поле **318**
Zabchev, A., Alexandrov, R. Geometry of a Two-Component Rotating Magnetic Field

Иванова, М. Изследване на огъващи и усукващи трептения при валове и роторни системи **323**
Ivanova, M. Review of Bending and Torsional Vibrations in Shafts and Rotor Systems

Иванова, Н. От сурови екологични данни до надеждни модели за машинно обучение: концептуална рамка, основана на оценката на качеството на данните, с приложение при пречистването на отпадъчни води **328**
Ivanova, N. From Raw Environmental Data to Reliable Machine Learning Models: a Data Quality-Driven Framework with Application in Wastewater Treatment

Илиев, Ж. Определяне на усилията, действащи върху кондензаторни батерии за средно напрежение **334**
Iliev, Z. Determining the Stresses Acting on Medium Voltage Capacitor Batteries

Костов, Г., Александров, Р. Приложение на асиметричен мостов преобразувател в електрозадвижвания с превключваем реактивен двигател (ПРД) **339**
Kostov, G., Alexandrov, R. Application of an Asymmetric Bridge Converter in Switched Reluctance Motor (SRM) Drives

Минин, Ив., Венков, С. Траектория на движенията и координати на характерни точки от работния орган на електромобилен челен товарач тип Sandvik LH518 **343**
Minin, I., Venkov, S. Trajectory of Movement and Coordinates of Characteristic Points of the Working Body of a *Sandvik LH518* Type Electric Wheel Loader

Минин, Ив., Венков, С. Методика за определяне на силите и реакциите в работния орган на челен товарач тип Sandvik LH518 **348**
Minin, I., Venkov, S. Methodology for Determining the Forces and Reactions in the Working Body of a *Sandvik LH518* Type Front-End Loader

Раненска, Н., Нешева, Р. Подход, използващ Gemini и NotebookLM за оптимизиране на подготовката на учебни дисциплини по информатика **351**
Ranenska, N., Nesheva, R. An Approach Using *Gemini* and *NotebookLM* to Optimise the Preparation of Course Units in Computer Sciences

Симеонова, Д. Софтуерни средства и методи, прилагани за импутация на липсващи данни при замърсяване на въздуха с фини прахови частици **356**
Simeonova, D. Software Tools and Methods Used for Missing Data Imputation in Air Pollution Monitoring of Particulate Matter

Синилков, П. Триточков захват в условията на безтегловност **362**
Sinilkov, P. Three-Point Grip in Weightlessness

Тасев, Л. Методи за ограничаване на боксуване на рудничните локомотиви за подземен извоз **367**
Tasev, L. Methods for Limiting the Sliding of the Wheels of Underground Mining Locomotives

Тасев, Л. Ударни натоварвания от неравности на пътя при локомотиви за подземен извоз **371**
Tasev, L. Shock Loads from Road Bumps in Underground Locomotives

Хайтова, Ал. Традиционни технологии за раздробяване и смилане при преработката на медни руди **374**
Haytova, A. Traditional Comminution Technologies in the Processing of Copper Ores

СЕКЦИЯ УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

SECTION SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINERAL AND RAW MATERIAL INDUSTRY

Антонов, Й., Цанов, Ал. Изкуственият интелект и управлението на системите на безопасността за по-безопасно работно място **383**
Antonov, Y., Tsanov, A. Artificial Intelligence and Safety System Management for a Safer Workplace

Георгиев, А. Концесиите в българското право: систематичен и сравнителен преглед **388**
Georgiev, A. Concessions in Bulgarian Law: a Systematic and Comparative Review

Зарева, Е., Маринова, К. Интегриране на QR код технология в експозициите на геоложките музеи в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София, България **394**
Zareva, E., Marinova, K. Integration of QR Code Technology in the Exhibitions of the Geological Museums at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” – Sofia, Bulgaria

Касапска, Н. Анализ на финансовите показатели за устойчивост на предприятията от минерално-суровинната индустрия **399**
Kasapska, N. Analysis of Financial Indicators for Sustainability of Companies from the Mineral and Raw Materials Industry

Митев, В., Димов, Е. Влияние на българската минна индустрия върху развитието на регионите **405**
Mitev, V., Dimov, E. Influence of the Bulgarian Mining Industry on the Development of Regions

Николова, К., Браткова, Св., Ангелов, А., Генова, П., Иванова, М. Сравнителен анализ на конвенционални и неконвенционални технологии за пречистване на минни води в контекста на кръговата икономика: smart цели и LCA **411**
Nikolova, K., Bratkova, S., Angelov, A., Genova, P., Ivanova, M. Comparative Analysis of Conventional and Non-Conventional Mine Water Treatment Technologies in the Context of the Circular Economy: SMART Goals and Life Cycle Assessment

Панчева, Р., Дончев, Р. Плаваща преграда за подобрено утаяване на суспендирани твърди частици във водоеми и възможности за кръгово оползотворяване на оборотни води **418**
Pantcheva, R., Donchev, R. Floating Baffle for Enhanced Sedimentation of Suspended Solids in Water Bodies and Opportunities for Circular Use of Reclaimed Water

Петрова, Н., Величкова, П. Правни, социални и биоетични аспекти при използване на генно редактиране в човешката репродукция **424**
Petrova, N., Velichkova, P. Legal, Social, and Bioethical Aspects of the Use of Gene Editing in Human Reproduction

Първанова, М., Христова, Т. Представяне на чужд език на основни правила за работа в специализирана лаборатория при подготовка на електроспециалисти **430**
Purvanova, M., Hristova, T. Presentation in a Foreign Language of Basic Rules for Working in a Specialised Laboratory While Training Electrical Specialists

Талигаджиев, К., Симеонова, Д. Готовност на студентите и преподавателите да използват изкуствен интелект за образователни цели **435**
Taligadzhiev, K., Simeonova, D. Readiness of Students and Lecturers to Use Artificial Intelligence for Educational Purposes

Тодорова, В. Предизвикателствата пред устойчивостта на предприятията от минерално-суровинната индустрия **439**
Todorova, V. Challenges to the Sustainability of Companies in the Mineral and Raw Materials Industry

Ужаков, Д., Трифонова, Б. Социално-отговорните инвестиции като фактор за устойчиво развитие на предприятията от минерално-суровинната индустрия **442**
Ujakov, D., Trifonova, B. Socially Responsible Investments As a Factor for Sustainable Development of Companies in the Mineral and Raw Materials Industry

Цифудина, Г. Пътна карта за ESG интеграция в минерално-суровинната индустрия **446**
Cifudina, G. Roadmap for ESG Integration in the Raw Materials Industry

СЕКЦИЯ

ГЕОЛОГИЯ И ПРОУЧВАНЕ НА МИНЕРАЛНИ И ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ

SECTION

GEOLOGY AND EXPLORATION OF MINERAL AND ENERGY RESOURCES

GROUND DISPLACEMENTS CAUSED BY THE CONSTRUCTION OF DEEP EXCAVATIONS – MEASUREMENTS, CASE STUDIES, AND ANALYSIS

Ina Bojinova-Popova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ina.popova@mgu.bg

ABSTRACT. During the execution of excavations for underground construction works, especially under constrained urban conditions and in the presence of closely located buildings and infrastructure, as is typically the case in densely built urban areas, there is a significant risk of disturbances to the surrounding environment. These disturbances may be caused by deformations or damage to the ground surface as well as to adjacent buildings and structures due to the influence of the excavation works. This influence is mainly induced by displacements of retaining structures, ground settlements resulting from groundwater lowering, or other related factors. The present paper examines examples of ground displacements and their analyses at two sites in Bulgaria: an excavation with a depth of 18 m located in Pozitano Street, Sofia, and an excavation with a depth of 15 m located at St. St. Cyril and Methodius Square in Burgas.

Key words: ground displacement, monitoring, deep excavations, retaining structures, analysis.

ПРЕМЕСТВАНИЯ НА ТЕРЕНА ВСЛЕДСТВИЕ ИЗГРАЖДАНЕ НА ДЪЛБОКИ ИЗКОПИ – ИЗМЕРВАНИЯ, ПРИМЕРИ И АНАЛИЗ

Ина Божинова-Попова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. При изпълнението на изкопите за нуждите на подземното строителство на подземни съоръжения в стеснени условия, при наличието на близко разположени сгради и съоръжения, каквито са обикновено случаите в застроената градска част, съществува опасност от нарушения на околното пространство, породени от деформации или разрушения на теренната повърхност и прилежащите сгради и съоръжения, вследствие влиянието на изкопите. Това влияние се предизвиква от премествания на укрепителните конструкции, слягания на терените вследствие на водопонижения или по други причини. В статията са разглеждат примери за премествания на терена и анализи към тях на два обекта в България: изкоп с дълбочина 18 m на ул. „Позитано“, гр. София и на изкоп с дълбочина 15 m на площад „Св. Св. Кирил и Методий” в гр. Бургас.

Ключови думи: преместване, измерване, дълбоки изкопи, укрепителни съоръжения, анализ.

Въведение

Перспективите на съвременното строителство са насочени към овладяването на подземните пространства на градската среда. Използването на подземните пространства се налага поради тенденциите за по-плътното застрояване на градовете, липса на възможности за прокарване на надземни комуникации и създаване на допълнителни площи за подземни паркинги и многоетажни подземни етажи, които са необходими за обслужване на живеещите и работещите в централните градски части. Тук следва да се посочи и метростроителството, което е най-типичния пример за подземно строителство.

Понякога повредите в съседните сгради и съоръжения се дължат и на подземното прокарване на конструкции, например при тунелни изработки, вследствие образуването на така наречените мулди на повърхността. Мулдите могат да се дължат на взаимодействието на тунели и ограждащото почвено пространство още в еластичния стадий, или поради разрушителни процеси в околния масив, вследствие пораждането на недопустими тангенциални напрежения в определени части от масива.

Изложение

Успоредно с развитието на подземното строителство в урбанизираните територии, се разработват и теории и се извършва наблюдение за влиянието на изкопите върху околните сгради и съоръжения. Едни от най-значителните изследвания, основани на наблюдения са направени в Германия (U Baan Referat, 1980). Извършени са прецизни измервания върху деформациите на терените в съседство с изкопите, при което са направени сравнения с изчислителните постановки на задачата. Резултатите са публикувани в специален каталог.

Като извод от тези измервания се посочва, че дължината на участъка от терена, на който се получава преместванията, е значителна и превишава разстоянието, което се приема, че се определя от горния ръб на призмата на обрушване съгласно закона на Coulomb. По опростения вид на клина, който се обрушва при активиране на земния натиск, горния му ръб се определя от ъгъла на откоса спрямо хоризонталата $\theta = 45 + \varphi/2$. Обикновено този ъгъл е около 55°. Спрямо хоризонталата, ъгълът е $45 - \varphi/2$ и това е обикновено ъгъл от 35°. Определено по този начин, максималното разстояние, което е застрашено от премествания при изкопи е h.tg 35°, или 0,7 h.

Основният извод при това измерване е, че най-малкото разстояние от горния ръб на откосите при дълбоките изкопи, на което се проявява преместването на терена, е 1,5 до 2 пъти дълбочината на изкопа.

Анализирани са и премествания на терена в различни етапи на изпълнението на изкопи с анкерно укрепяване.

При дълбочина на изкопите 25 m е получено слягане на повърхността на терена до 25 mm, което е значително и недопустимо, ако в близост има изградени сгради. Това е още една индикация, че в околното пространство, засегнато от влиянието на дълбоките изкопи попадат сгради и съоръжения на много по-голямо разстояние, отколкото определените по теорията за земния натиск и постановките на Кулман.

Правени са и подобни теоретични изследвания за преместване на терените при дълбоки изкопи с цел да се

установи зависимост за определяне на сляганията на сградите в близост до тях, което включва параметри като: тегло на сградата, коравината й, отдалеченост от изкопа, дълбочина на изкопа и деформируемост на почвата.

Изследвания при строителството в България

Измервания и изследвания за влияние на дълбоките изкопи върху околното пространство са правени при някои от метростанциите на Софийското метро, както и за други изкопи в София и Бургас.

Като примери се посочват измерванията и анализите към тях на два обекта в България: изкоп с дълбочина 18 m на ул. „Позитано“ и на изкоп с дълбочина 15 m на площада “Св. Св. Кирил и Методий” в гр. Бургас.

Премествания на терена при изкопите за обект: сграда на ул. „Позитано", кв. 259, м. "Центъра", р. "Триадица"

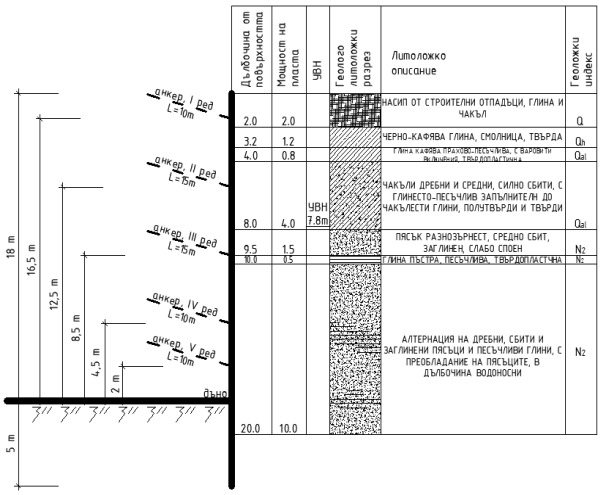
За установяване на деформацията и напрегнатото състояние на анкерирани шлицови стени, използвани като укрепителни конструкции на изкоп с дълбочина 18 m, са направени измервания на преместванията на стените по време на изкопите и след тяхното завършване. Измерванията са направени с инклинометър, който се вкарва периодично в специални тръби, бетонирани в шлицовите стени. По наклоните на инкинометъра, които се изменят в зависимост от преместванията на стените, посредством специален софтуер се определя преместването на различни точки от стените, включително и в частта им под дъното на изкопа. На 10 броя от анкерите са поставени динамометри за установяване на силите в тях. Динамометрите се поставени на различни дълбочини така, че да дават информация за напрягането на анкерите по цялата дълбочина на шлицовите стени.

Дълбочината на изкопа е 18 m. Укрепителната конструкция е от шлицови стени с дебелина 60 cm. Връзките между стените е с фугови полутръби. Стените са анкерирани на 4 и 5 нива. Анкерите са с дължини 10 m – най-горните анкери и 15 m – при по-дълбоките анкери. Анкерите са напрегнати само с гаечен ключ до сили 40 – 50 kN.

Фиг. 1. Снимка на откопания изкоп за сграда на ул. „Позитано“ в гр. София, укрепен с анкерирани шлицови стени

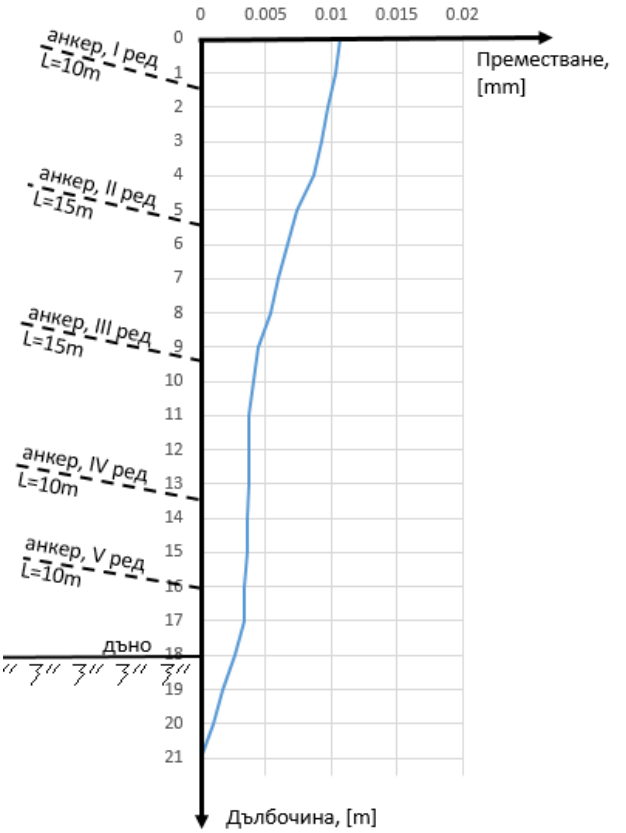
Освен динамометри в анкерите, поставени са и репери за следене на преместванията на стените. При дълбочини на изкопите до 18 m, анкерите не са получили допълнителни сили. Преместванията на горния край на стените са определени по геодезичен път.

Снимка на откопания изкоп при това укрепване е показана на фиг. 1. На фиг. 2 е показана схема на укрепването, заедно с геоложкия профил на терена.



Фиг. 2. Схема на укрепяването и литоложка колонка на терена. *(Проект за укрепване стените на строителен изкоп за подземни гаражи на пл. „Св. Св. Кирил и Методий“ – гр. Бургас - фирма „Грунд 1“ ООД, 2012.)*

Линията на деформираното състояние на шлицовата стена е показана на фиг. 3.



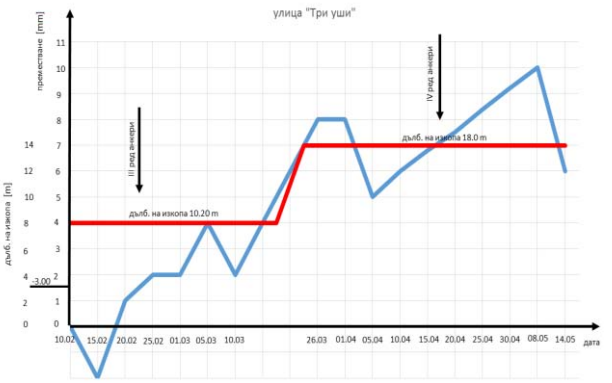
Фиг. 3. Линия на деформираното състояние на шлицовата стена и таблица със стойности на преместванията в дълбочина

Измереното максимално преместване на стената е 10,7 mm – при терена. В таблица 1 са дадени преместванията на различни точки от дълбочината на стената, също така и под дъното на изкопа.

Таблица 1.

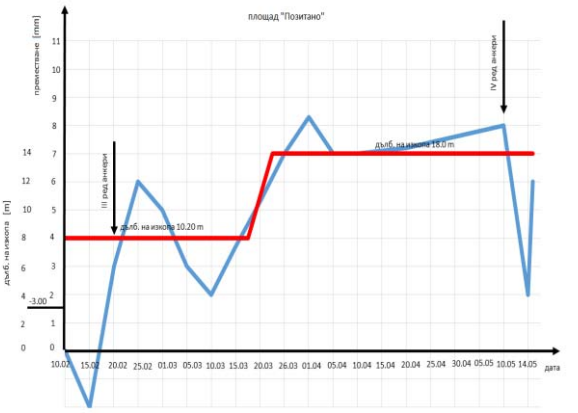
Дълбочина [m]	Преместване [m]
0. точка	$10,7 \cdot 10^{-3}$
1. точка	$10,3 \cdot 10^{-3}$
2. точка	$9,7 \cdot 10^{-3}$
3. точка	$9,3 \cdot 10^{-3}$
4. точка	$8,7 \cdot 10^{-3}$
5. точка	$7,35 \cdot 10^{-3}$
6. точка	$6,7 \cdot 10^{-3}$
7. точка	$6 \cdot 10^{-3}$
8. точка	$5,3 \cdot 10^{-3}$
9. точка	$4,4 \cdot 10^{-3}$
10. точка	$4,1 \cdot 10^{-3}$
11. точка	$3,75 \cdot 10^{-3}$
12. точка	$3,7 \cdot 10^{-3}$
13. точка	$3,65 \cdot 10^{-3}$
14. точка	$3,6 \cdot 10^{-3}$
15. точка	$3,6 \cdot 10^{-3}$
16. точка	$3,4 \cdot 10^{-3}$
17. точка	$3,3 \cdot 10^{-3}$
18. точка	$2,7 \cdot 10^{-3}$
19. точка	$1,7 \cdot 10^{-3}$
20. точка	$1 \cdot 10^{-3}$
21. точка	$0 \cdot 10^{-3}$

На фиг. 4 и 5 са показани премествания на шлицовите стени при терена, мерени на две прилежащи улици. На графиките със сини линии са дадени измервания на премествания на отделни точки, които са осреднени с плътни червени линии. Над плътните линии са означени дълбочините на изкопа, за които са осреднени измерванията – първата отсечка – при дълбочина на изкопа 10, 20 m и втората отсечка – при дълбочина на изкопа 18 m.



Фиг. 4. Графика на измерените премествания във времето на шлицовите стени на ул. „Три уши“.

Както се вижда от графиките, при дълбочини на изкопа 10, 20 m осредненото преместване на укрепителната ограда е само 4 mm и при дълбочина на изкопа 18 m – 7 mm, което е нищожно, като се има предвид достигнатата дълбочина. По тази причина направените изкопи не са се отразили на състоянието на съседните сгради, някои от които отстоят само на 11 метра от изкопа. Прави впечатление и фактът, че анкерите са много къси – дължини 10 и 15 m и при всички предпоставки на теорията на укрепяване, попадат в клина на разрушение на почвата, но въпреки това изпълняват своите функции.



Фиг. 5. Графика на измерените премествания във времето на шлицовите стени на ул. „Позитано“.

Необичайно малкото преместване на оградите и ненапрягането на анкерите по време на строителството показват, че по-гъсто разположените анкери изменят напрегнатото състояние на околния масив, което е свързано и с намаляване на тангенциалните напрежения в масива и със съответно намаляване на земния натиск. Може да се разглежда и вариант, при който, укрепителните конструкции, заедно с анкерите, могат да се приемат като масивна и дебела подпорна стена. Тази теза подлежи на допълнително доказателство.

Измервания на преместванията на горния край на стените при укрепителните огради на подземен паркинг на площад „Св. Св. Кирил и Методий”, гр. Бургас

За този обект укрепителната ограда е от секантни пилоти с диаметър 88 cm *(Проект за укрепване стените на строителен изкоп за подземни гаражи на пл. „Св. Св. Кирил и Методий“ – гр. Бургас - фирма „Грунд 1“ ООД, 2012.).* Подпирането е на 4 нива анкери, тип T76N. Дължините на анкерите са 24 m за най-горния ред и надолу – 20 m и 16 m. Въз основа на опита (сградата на Позитано), анкерите са напрегнати само с гаечен ключ до 40 – 50 kN. Изчислените и очаквани премествания на участъка от оградата до училището, което отстои само на 4 m от нея, са дадени в таблица 2.

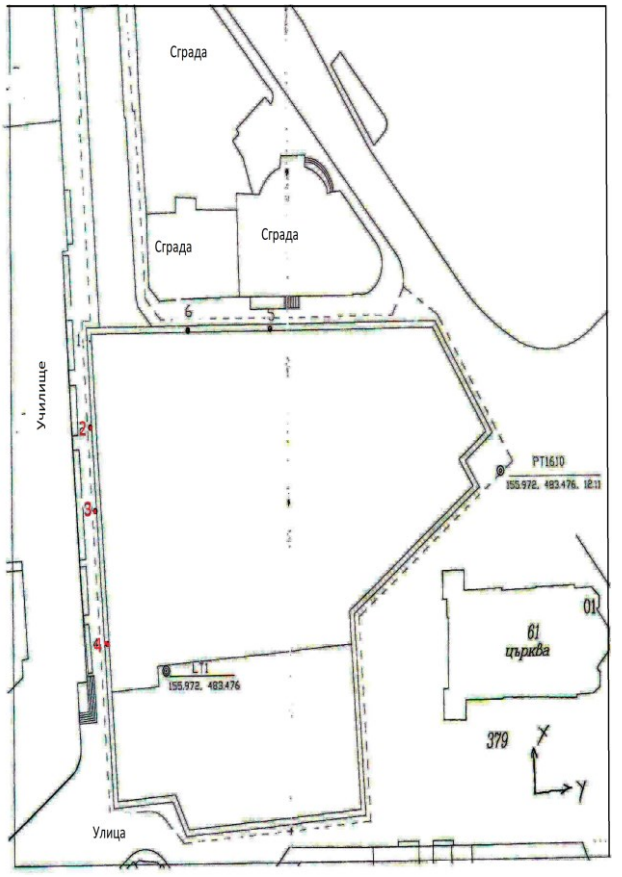
Ситуация на оградата с местата на определяне на преместванията са дадени на фиг. 6 *(Проект за укрепване стените на строителен изкоп за подземни гаражи на пл. „Св. Св. Кирил и Методий“ – гр. Бургас - фирма „Грунд 1“ ООД, 2012.)*

Таблица 2. *Изчислените и очаквани премествания на участъка от оградата до училището на пл. „Св. Св. Кирил и Методий“, гр. Бургас.*

Строително състояние	Премествания в сантиметри				
	глава пилот	Анкери			
		1 ред	2 ред	3 ред	4 ред
1. Откопано до 5 m и изпълнен 1-ви ред анкери	1,08 cm	0,86 cm	-	-	-
2. Откопано до 8,5 m	1,2 cm	1,1 cm	1,17 cm	-	-
3. Откопано до 11,5 m	0,5 cm	0,9 cm	1,3 cm	1,9 cm	-
4. Откопано до 15 m	1 cm	0,9 cm	0,99 cm	1,3 cm	1,6 cm

На фиг. 7, 8 и 9 са приложени диаграми на измерените премествания за т. 2, т. 3 и т. 4 от приложената ситуация на фиг. 6.

Както се вижда от приложените диаграми, максималното преместване на стените е 10 mm (има и преместване 7 mm). Преместванията са малко по-малки от прогнозните резултати – максимални премествания 12 mm. Съвпадението обаче е добро, което е свидетелство за верност и приложимост на метода (Божинов, Попов, 2016) за изследване на преместванията на укрепителните конструкции.



Фиг. 6. Ситуация на оградата на изкопа с местата на определяне на преместванията

Фиг. 7. Диаграми на измерените премествания на ръба на изкопа, в близост до училището за т. 2

Фиг. 8. Диаграми на измерените премествания на ръба на изкопа, в близост до училището за т. 3.

Фиг. 9. Диаграми на измерените премествания на ръба на изкопа, в близост до училището за т. 4.

Преместванията не са засегнали сградата на училището. Получени са известни слягания на пода в сутерена и козметични пукнатини, без засягане на носещи конструкции. Тези минимални премествания се дължат на водопонижението в терена при изпомпване на води от строителния изкоп.

Заключение

Получените данни показват, че освен прогнозни резултати, трябва да се изпълняват геодезически наблюдения за определяне на евентуални слягания и хоризонтални премествания на съседните конструкции и терени. Навременните данни могат да осигурят своевременно усилване на земната основа на фундаментите на някои сгради, когато се получат слягания до 3 - 4mm. Въз основа на данните от мониторинга, който ще бъде извършен, слоганията могат да се прогнозират с достатъчно висока точност.

В зависимост от начина на проявяване на недопустимите премествания или разрушения на околните почвени масиви, могат да настъпят значителни повреди и дори разрушения в съседни терени и конструкции, понякога с фатален край. В някои случаи се налага събаряне на

повредените сгради, а в други случаи - реконструкции, които могат да струват много скъпо.

Използвани проекти

Проект за укрепване стените на строителен изкоп на офис сграда с магазини и подземни гаражи – ул. „Позитано“ – фирма „Грунд 1“ ООД, София, 2006

Проект за укрепване стените на строителен изкоп за подземни гаражи на пл. „Св. Св. Кирил и Методий“ – гр. Бургас - фирма „Грунд 1“ ООД, 2012

Литература

Божинов, Б., (2013). Опазване на сгради и съоръжения в околното пространство при подземното строителство на транспортни съоръжения, *"Фонд научни изследвания"*, София.

Божинов, Б. А.; Попов, С. (2016). *Изчисляване на пилоти, шлицови и щпунтови стени, натоварени с хоризонтални сили и огъващи моменти*, София.

Божинов, Б. А.(1983). Оразмеряване на укрепителни огради на дълбоки изкопи, *сп. „Строителство“*, бр.9/1983

U Baan Referat – Linie 8/1, 1980

APPLICATION OF LINEAR OPTIMISATION IN WASTE MANAGEMENT

Antoaneta Georgieva, Marina Nikolova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: any_76@abv.bg; mnikolova@mgu.bg

ABSTRACT. This article presents the application of linear optimisation in waste management. A characteristic feature of linear optimisation is that the mathematical model consists of a system of equations and inequalities, and the objective function is linear. An optimisation problem for the collection and transportation of municipal waste is solved using a graphical method for solving a linear optimisation model with two variables. The results of the calculations are presented.

Key words: linear optimization, waste management.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЛИНЕЙНОТО ОПТИМИРАНЕ В УПРАВЛЕНИЕТО НА ОТПАДЪЦИТЕ

Антоанета Георгиева, Марина Николова
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В статията е представено приложението на линейното оптимиране в управлението на отпадъците. Характерно за линейното оптимиране е, че математическият модел представлява система от равенства и неравенства и целевата функция е линейна. Решена е оптимизационна задача за сметопочистване и превозване на битови отпадъци с прилагането на графичен метод за решаване на линеен оптимизационен модел с две променливи. Представени са резултати от направените изчисления.

Ключови думи: линейно оптимиране, управление на отпадъци.

Въведение

Управлението на отпадъците в Европейския съюз е приоритет на предотвратяването на образуването на отпадъци и повторната им употреба и същевременно насърчава постигането на високи нива извозване и последващо рециклиране.

Задължително количествата на образуваните отпадъци трябва да бъдат оценени и прогнозирани поотделно за отпадъците от домакинствата и подобните отпадъци от търговски и административни обекти и от производствени предприятия в общината с цел оптимизиране на сметопочистването и извозването. За целта е приложимо използването на линейното оптимиране.

При линейното оптимиране математическият модел представлява система от равенства и неравенства и целева функция, която е линейна.

$$z = c_1.x_1 + c_2.x_2 + \cdots + c_n.x_n$$

Търсят се такива стойности на $x_1, x_2 \ldots, x_n$, за които линейната функция достига екстремална стойност (максимум или минимум).

За намирането на $x_1, x_2 \ldots, x_n$ се прилага Симплекс – методът, чийто алгоритъм е следният:

1. Основна задача.
2. Канонична задача.
3. Решение чрез Симплекс – метода.
4. Изводи.

Под „симплекс“ се разбира най-простият многостен в n – мерното пространство, който има $n + 1$ върха.

Основната задача е в каноничен вид, когато са изпълнени следните условия:

- за всяка променлива $x_1, x_2 \ldots, x_n$ има условие за неотрицателност;
- свободните членове на всички ограничителни условия са неотрицателни числа;
- всички ограничителни условия са уравнения;
- на всяко уравнение съответства единичен базисен вектор.

Ако някои от свободните членове са отрицателни числа, то умножаваме двете страни на съответното ограничително условие с (-1).

Ограничителните условия, които са неравенства се превръщат в уравнения с помощта на допълнителни променливи. При „ ≤“, към лявата страна се прибавя допълнителна променлива. При „≥ ", към лявата страна се изважда допълнителна променлива.

Допълнителните променливи се включват в целевата функция с коефициент „0“. Ако в някое уравнение липсва единичен базисен вектор, в уравнението се въвежда изкуствена променлива, която е неотрицателна. Изкуствените променливи се включват в целевата функция с коефициент

$$+M \to min; \quad -M \to max$$
$$M = 10max\left\lceil C_j \right\rceil \; 1 \le j \le n,$$

където C_j са коефициентите в целевата функция.

В началната Симплекс таблица

- Ц.Б. – Целеви базисен стълб;
- БН – стълб на базисните променливи;
- В – десните страни на ограничителните условия.

Последния ред на таблицата се нарича индексен ред.

- Z_0 е равно на скаларното произведение на първия стълб с третия стълб;
- $Д_1$ – скаларното произведение на първия стълб с четвъртия стълб минус C_1;
- $Д_j = \sum. C_j. i - C_j$.

Критерии за оценка:

$$Д_j \le 0 - Z_{min}$$
$$Д_j \ge 0 - Z_{max}$$

като $Д_j$ се нарича индексна оценка.

Оценките на базисните неизвестни са нули.

Смяна на базиса

1. Разрешаващ стълб – стълбът, който има най-лоша оценка

$$Z_{min} \rightarrow \max Д_j$$
$$Z_{max} \rightarrow \min Д_j$$

2. Разрешаващ ред – образуваме частните от стълба *B* и съответните положителни числа от разрешаващия стълб (за нулите и отрицателните числа не образуваме такива частни). Избираме най-малкото от частните и определяме разрешаващия ред.

Елементът, който се получава при пресичането на разрешаващия ред и разрешаващия стълб се нарича разрешаващо число.

Ако разрешаващият стълб не съдържа положителни числа, то задачата няма решение, т.е. целевата функция е неограничена – отдолу, ако се търси Z_{min} и неограничена отгоре, ако се търси Z_{max}.

Смяната на базиса продължава докато за всеки стълб се изпълни критерият за индексната оценка.

Задача

Фирма за сметопочистване събира и превозва битови отпадъци на цена 5 евро на 1 тон за 1 km и пластмаси на цена 2 евро на 1 тон за 1 km. Фирмата събира общо пластмаси и битови отпадъци не повече от 40 тона, пластмаси не повече от 20 тона и битови отпадъци не повече от 30 тона. Да се намерят количествата пластмаси и битови отпадъци.

Означаваме x_1 – тона пластмаси, x_2– тона битови отпадъци.

$$Z = 2.x_1 + 5.x_2 \text{ min (max)}$$

Ограничителните условия са:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \leq 40 \\ x_1 \leq 20 \\ x_2 \leq 30 \\ x_1 \geq 0 \; x_2 \geq 0 \end{cases}$$

Привеждаме в каноничен вид

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 40 \\ x_1 + x_4 = 20 \\ x_2 + x_5 = 30 \end{cases}$$

В таблица 1 и 2 е представено решението на задачата.

$$Z = 2.x_1 + 5.x_2 + 0.x_3 + 0.x_4 + 0.x_5$$

Таблица 1. *При Zmin=0*

ЦБ	БМ	В	2	5	0	0	0
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
0	x_3	40	1	1	1	0	0
0	x_4	20	1	0	0	1	0
0	x_5	30	0	1	0	0	1
$Z_{min} = 0$			-2	-5	0	0	0

$Z_{min} = 0$
(0; 0; 40; 20; 30)
$Z = 2.0 + 5.0 + 0.40 + 0.20 + 0.30 = 0$

Таблица 2. *При Zmax=0,150 и 170*

ЦБ	БН	В	2	5	0	0	0	
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
0	x_3	40	1	1	1	0	0	
0	x_4	20	1	0	0	1	0	
0	x_5	30	0	1	0	0	1	.(-1)
$Z_{max} = 0$			- 2	- 5	0	0	0	
0	x_3	10	1	0	1	0	-1	.(-1)
0	x_4	20	1	0	0	1	0	
5	x_5	30	0	1	0	0	0	
$Z_{max} = 150$			-2	0	0	0	5	
2	x_1	10	1	0	1	0	-1	
0	x_4	10	0	0	-1	1	1	
5	x_2	30	0	1	0	0	1	
$Z_{max} = 170$			0	0	2	0	3	

Z_{max} (10, 30, 0, 0, 0)

$Z_{max} = 2.10 + 5.30 = 170$

Графичен метод за решаване на линеен оптимизационен модел с две променливи x_1 и x_2

Целевата функция има вида $Z = c_1.x_1 + c_2.x_2$.

Етапите при решаване на линеен оптимизационен модел са:

1. Определяне на областта на допустимите решения
   а) ОДР е празно множество – моделът няма решение.
   б) неограниченост на целевата функция в ОДР – моделът няма решение.
2. Построяване градиента на целевата функция – вектор $\vec{n}\,(C_1, C_2)$.
3. Определяне на координатите на точките, в които правата $q \perp \vec{n}$ за последен път докосва ОДР.
4. Пресмятане стойността на целевата функция.
5. Отчитане на решенията.

Моделът има решение:

а) единствено оптимално решение, когато се достига в един от върховете на ОДР.

б) Безброй много решения т.е. алтернативен оптимум
- по отсечка;
- по лъч.

За предходната задача прилагаме графичния метод

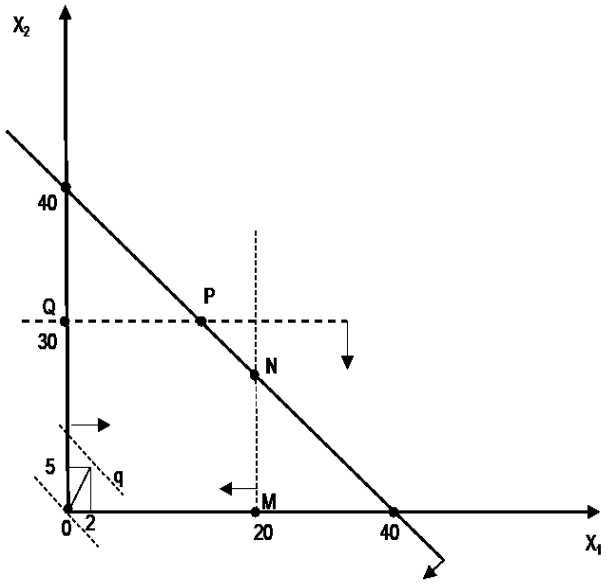
$$\text{min (max) } Z = f(x) = 2.x_1 + 5.x_2$$

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \leq 40 \\ x_1 \leq 20 \\ x_2 \leq 30 \\ x_1 \geq 0 \; x_2 \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{x_1}{40} + \frac{x_2}{40} = 1 \text{ отрезово уравнение}$$

$$x_1 \leq 20$$
$$x_2 \leq 30$$

На фиг. 1. графично е представено решението на задачата.



Фиг. 1. Графично решение на задачата

ОДР → OMNPQ
$\vec{n}$ (2, 5) градиент на целевата функция
Точка P $\longrightarrow x_2 = 30$

$x_1 + x_2 = 30$
$x_2 = 30 \quad x_1 = 10$

min $Z\ (0{,}0) = 0$

Z (max) = (10, 30)
(max) $Z = 2.10 + 5.30 = 170$

Заключение

Симплекс методът е приложим при решаване на оптимизационна задача за сметопочистване и превозване на битови отпадъци. В резултат на направените изчисления са определени количествата пластмаси и битови отпадъци за извозване.

Литература

Георгиев Л., Николова, Н., Кацаров, М., Георгиева, А. (2013). Приложение на линейното оптимиране за прогнозиране добива на нефт. IV Международна научно–техническа конференция Геология и въглеводороден потенциал на Балканско–Черноморския регион, 2013, с. 230-237. ISBN978-954-92738-5-4.

Иванова К., Атанасова, Т. (2015). *Линейно оптимиране*. Математически методи в икономиката. Издателски комплекс – ВУТП. ISBN: 978 954 9332-93-3 (printed)

Радев Ю., Георгиев, Л., Бояджиев, М. (2008). Устойчиво развитие в условията на ограниченост на природните ресурси. Proceedings of scientific and technical conference with international participation “Oil and Gas prospectivity of the BALKAN-BLACK SEA REGION”. Varna, p.165-171.

Ръководство за определяне броя и вида на необходимите съдове и техника за събиране и транспортиране на рециклируеми и зелени отпадъци. (2023). Оперативна програма околна среда 2014-2020, https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/%D0%A3%D0%9E%D0%9E%D0%9F/.

Директива 2008/98/ЕО на Европейския Парламент и на Съвета от 19 ноември 2008 година относно отпадъците и за отмяна на определени директиви, изменена с Директива (ЕС) 2018/851 на Европейския парламент и на Съвета от 30 май 2018 година.

PERMIAN PLAYA-TYPE LAKES IN THE MIROVO AREA

Hristo Dimitrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ihristo_dimitrov@mgu.bg

ABSTRACT. Playa-type lakes are closed, endorheic basins formed under arid and semi-arid climatic conditions. The primary objective of this study is to analyse the geological development model of a typical continental depositional environment during the Permian period in the Mirovo area, based on the interpretation of geophysical data (well logs and seismic sections) and core data. In the eastern part of the Provadiya Syncline, a classic example of recurrent playa lake environments is identified, characterised by specific horizontal and vertical spatial facies zonation and evaporitic cyclicity in their central parts. It is there that creamy-pink to orange-red evaporite sediments were deposited, alternating with typical continental arid-environment argillite, siltstone, and marl, as well as occasional anhydrite, limestone, and dolomite. The vertical successions of salt layers alternating with terrigenous sediments in the stratigraphic section serve as indicators of shifting periods between lake desiccation (salt formation) and refilling. The study of sections formed in playa lake environments is important from the point of view of petroleum geology, as dense clay sediments and evaporite bodies act as excellent, effective seals—a crucial element of the petroleum system.

Key words: Permian lakes, playa, evaporitic cyclicity, Mirovo.

ПЕРМСКИ ЕЗЕРА ТИП ПЛАЯ В РАЙОНА НА МИРОВО

Христо Димитров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Езерата тип плая представляват затворени, безотточни езера, които се образуват в условия на ариден и субариден климат. Основната цел на настоящето изследване е въз основа на интерпретацията на геофизични данни (сондажните каротажни диаграми и сеизмични разрези) и данните от сондажни ядки да се анализира геоложкия модел на развитие на типичната континентална обстановка на седиментация през пермския период в района на Мирово. В източната част на Провадийската синклинала се установява класически пример за обстановка на многократно развитие на езера плая, характеризиращи се със специфична хоризонтална и вертикална пространствена зоналност на фациесите и евапоритна цикличност в централната им част. Именно там се натрупват кремаво-розови до оранжево-червени евапоритни седименти, които са в алтернация с типични за континентална аридна обстановка аргилити, алевролити, мергели, а на места и анхидрити, варовици и доломити. Интервалите на смяна в разреза на солен пласт с теригенни седименти са индикатор за смяната на периоди, в които езерото пресъхва (образува се солта), с периоди, в които отново се пълни с вода. Изучаването на разрезите, формирани в обстановки на езера плая са важни от гледна точка на петролната геология, поради факта, че плътни глинести седиментни и евапоритни тела са чудесни ефективни покривки, в ролята им на важен елемент от петролната система.

Ключови думи: Пермски езера, плая, евапоритна цикличност, Мирово.

Въведение

Терминът плая, използван в геологията за описание на затворени безотточни езера в аридни райони, е въведен за първи път от американския геолог Робърт Хил (Hill, 1900). Според дефиницията на Briere (2000) плаята е „вътрешноконтинентален басейн с отрицателен воден баланс през по-голямата част от годината, чиято повърхност е изградена от финозърнести седименти и евапорити“. За да се избегнат погрешни тълкувания на термините плая, езеро-плая и себха, авторът пояснява, че езерото-плая е „плитка, ефемерна (временна) водна маса, която заема част или цялата повърхност на плаята по време на нейното наводняване“. Изясняването на модела на този тип седиментационни обстановки е обект на изследване през годините от редица автори (Hill, 1900; Cooke and Warren, 1973; Neal, 1975; Shaw, 1989; Walker & James, 1992; Cooke et al., 1993; Rosen, 1994; Briere, 2000; Messager et al., 2016; Kolpakova et al., 2019) в различни райони на планетата.

Основната цел на настоящото изследване е въз основа на интерпретацията на геофизични данни (сондажни каротажни диаграми и сеизмични разрези) и данни от сондажни ядки да се анализира геоложкият модел на развитие на типичната континентална обстановка на седиментация през пермския период в района на Мирово (фиг. 1). В източната част на Провадийската синклинала се установява класически пример за многократно развитие на езера-плая, характеризиращи се със специфична пространствена (хоризонтална и вертикална) фациална зоналност и евапоритна цикличност в централните им части. Данните от сондажните ядки недвусмислено показват, че седиментите с пермска възраст са отложени именно в обстановка на плая.

Този район е изследван в продължение на повече от 90 години в различни геоложки аспекти, но преди всичко по отношение на нефтогазоносната перспективност (Цанков, 1942; Бончев и др., 1957; Монахов и др., 1981; Георгиев и др., 1984; Боков и Чемберски (ред.), 1987). В поредица от по-нови публикации (Yanev,1993; Yanev et al., 1995; Yanev et al., 2005; Dimitrova et al., 2006; Yanev et al., 2007; Yanev, 2019) са представени интерпретации на литостратиграфията, палеогеографията и тектонската еволюция на къснопалеозойския (пермски) разрез в обхвата на Провадийската синклинала.“

Геоложка рамка

Литостратиграфска характеристика

В настоящата работа е направен кратък преглед на пермската система, която е основният обект на изследване. В Провадийската синклинала седиментите с пермска възраст са установени в ограничен брой сондажни разрези. (фиг. 1 и 2).

Фиг. 1. Комбинирана обзорна и тектонска схема на изследвания район с местоположение на използваните сондажи и сеизмични профили. Разломите са означени с цифри в кръгчета: 1. Преславско-Шкорпиловски; 2. Южномизийски; 3. Кубратско-Ветрински; 4. Друмевски; 5. Провадийски; 6. Храбровски; 7. Султански; 8. Падински.

Янев (1993) прави подробно литостратиграфско разчленение на пермските разрези, като дефинира стратотипите и въвежда официалните литостратиграфски единици (фиг. 2).

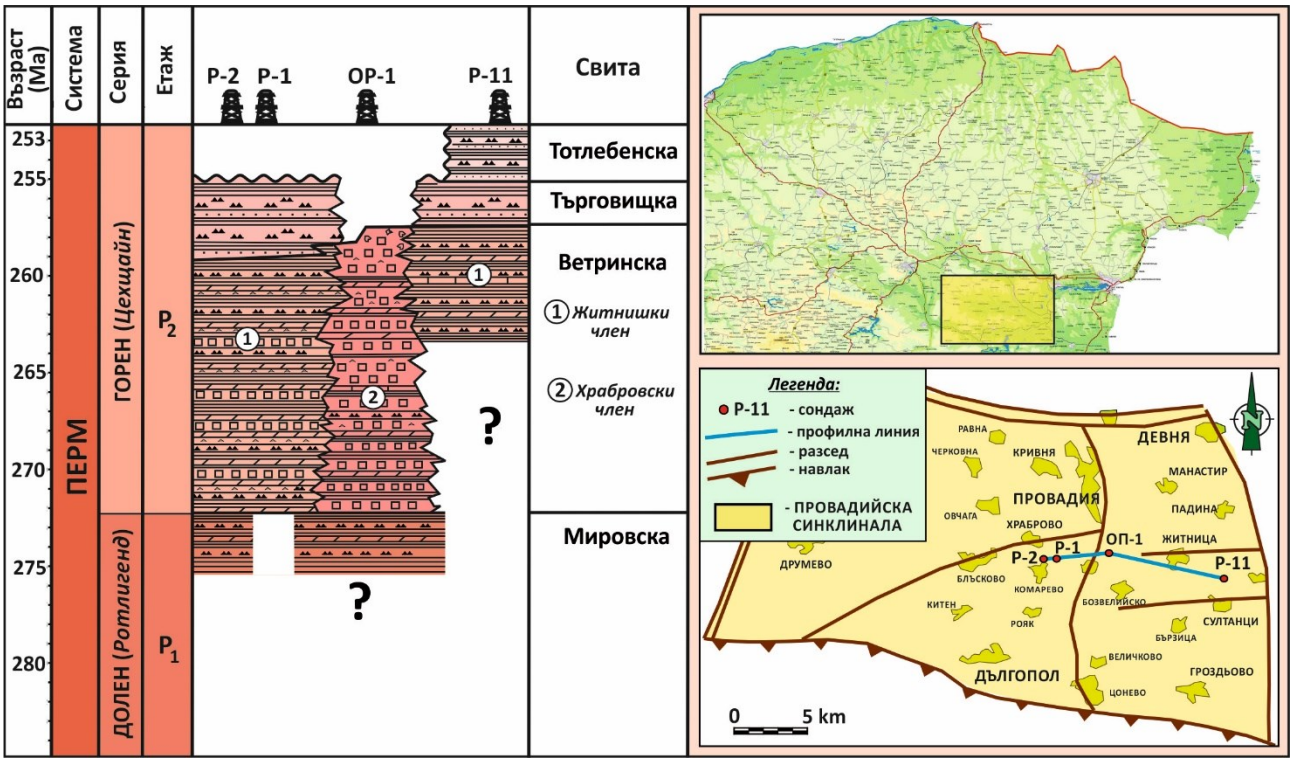
Мировската свита (Янев, 1993) е установена в два сондажа – ОП-1 Мирово и Р-2 Храброво. Изградена е от сиво-черни и сиви аргилити (на места с червеникаво-виолетови до ръждиви нюанси), които са слабо варовити и тънкослоисти. В отделни интервали те прехождат в алевролити и са рядко прослоени от тънки мергелни пластове. Характерни са калцитните и анхидритните включения и прожилки. Седиментите съдържат овъглени растителни останки и оскъдни количества спори. Горната граница на свитата е ясно маркирана на гама-каротажната диаграма. Долната граница не е достигната от прокараните сондажи. Дебелината на тази литостратиграфска единица надхвърля 1400 m. В по-ранни публикации възрастта ѝ се приема за горнопермска, но Dimitrova et al. (2006) допускат и долнопермска принадлежност.

Ветринската свита (Янев, 1993) е пресечена от шест сондажа: Р-1 и Р-2 Храброво, ОП-1, ПС-2 и ПС-3 Мирово, както и Р-11 Житница. Тя включва два члена – Храбровски и Житнишки. Храбровският член е изграден от кремаво-розов до оранжево-червен халит, сред който се наблюдават сиви до тъмносиви и кафяво-червеникави аргилити в алтернация с кафяво-червеникави алевролити, мергели и локални прослойки от анхидрит, доломити и варовици. Дебелината му варира значително – от 2000 до 3027 m. Житнишкият член се състои от аргилити с ръждивокафяв, кафяво-червен и тухленочервен цвят, на места тъмносиви до петнистозеленикави. Дебелината му е около 600 m. Горната и долната граница на свитата са ясно идентифицирани по гама-каротажните диаграми. Според Dimitrova et al. (2006) възрастта на седиментите е горнопермска.

Търговищката свита (Янев, 1993) е пресечена от шест сондажа: Р-1 и Р-2 Храброво, Р-4 и Р-5 Провадия, Р-6 Султанци и Р-11 Житница. Тя е представена от кафяво-червеникави аргилити – слабо варовити и алевролитови, прослоени от варовити алевролити с характерна масивна текстура. На места присъстват тънки пясъчници. Срещат се анхидритни конкреции и прослойки, като анхидритите понякога са слюдести, неравномерно алевролитови и с неясна слоистост до масивна текстура. Дебелината на литостратиграфската единица в сондаж Р-2 Храброво надхвърля 900 m. Възрастта на свитата в по-ранните изследвания е определена като горнопермска, което е потвърдено и от Dimitrova et al. (2006).

Тотлебенска свита (Янев, 1993) е пресечена от четири сондажа: Р-9 Бозвелийско, Р-15 Яворово, Р-6 Султанци и Р-11 Житница. Тя се характеризира с редуване на кафяви аргилити, сиви до розово-сиви алевролити и дребнозърнести пясъчници с виолетово- до зеленикаво-сиви разновидности. Текстурните особености варират от много добре наслоени интервали (Р-6) и такива с вълнисто-коса слоистост (Р-9) до лошо сортирани седименти (Р-15).

Най-голямата установена дебелина на свитата е в сондаж Р-6 Султанци – 118 m. Възрастта на свитата в по-стари изследвания е разглеждана като горнопермска, което е потвърдено от Dimitrova et al., (2006).



Фиг. 2. Литостратиграфска схема на изследвания район по данни от сондажи Р-1 и Р-2 Храброво, ОП-1 Мирово и Р-11 Житница

Тектонска характеристика

В настоящото изследване е използвана тектонската схема, разработена от колектив от български геолози и официално публикувана под редакцията на Боков и Чемберски (1987).

В тектонско отношение проучваният район попада в обхвата на Провадийската синклинала (фиг. 1). Тя е треторазрядна структура, изграждаща най-южната, значително понижена и наклонена на юг периферна зона на Мизийската платформа към прехода ѝ с Предбалкана, известна като Южномизийска периплатформена област (Георгиев и Монахов, 1979). Последната се дефинира като такава по юрско-долнокредните отложения, има на места грабеновиден строеж и най-често е ограничена от ясно изразени разломни структури (Георгиев и Монахов, 1979; Монахов и др., 1981).

Провадийската синклинала е идентифицирана първоначално от Цанков (1942) въз основа на разпространението на горнокредните и палеогенските седименти. По-късно познанията за нея са допълнени от Бончев и др. (1957), Боков и Чемберски (ред., 1987) и Георгиев и др. (1984).

Границите на Провадийската синклинала са категорично установени и детайлно проследени въз основа на наличната сеизмична и сондажна информация. Те са маркирани от значими разломни нарушения с различен характер (фиг. 1).

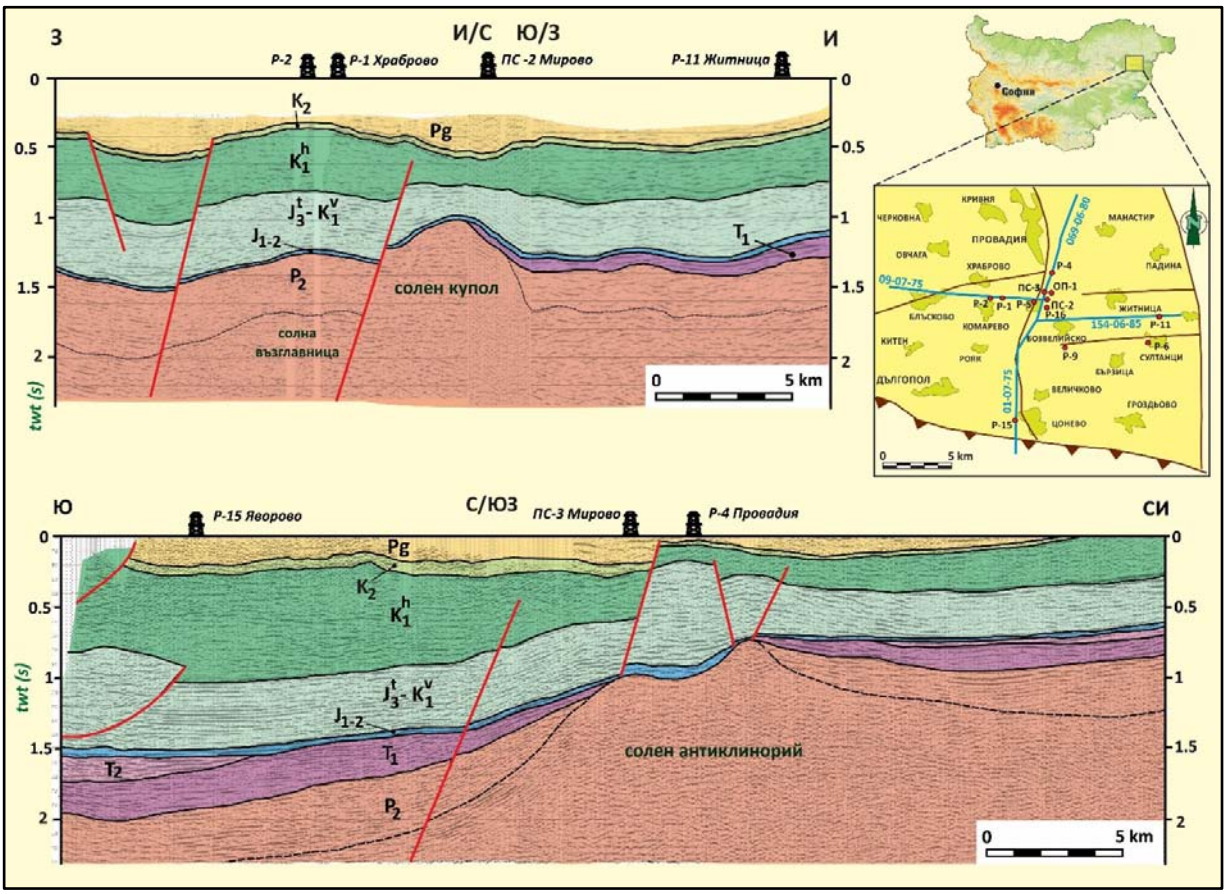
Източната граница се трасира от Кубратско-Ветринския разлом, който отделя структурата от Горночифлишкия хорст. На запад синклиналата граничи с Търговищката седловина посредством Друмевския разлом. Южната граница се определя от Преславско-Шкорпиловския разлом, който е с възседно-навлачен характер и представлява регионалната граница между Мизийската платформа и Източния Предбалкан. Северната граница преминава по Южномизийския разлом, отделящ синклиналата от Севернобългарския свод.

Тектонските нарушения са оказали решаващо влияние върху геоложкото развитие и съвременния тектонски облик на Провадийската синклинала. Те сегментират структурата на блокове с различна морфология, размери и хипсометрично положение, което е най-силно изразено в нейната източна част. Блоковият строеж е допълнително усложнен от радиални разломи около Мировския солен купол.

По данни на Георгиев и др. (1984) синклиналата се проследява най-ясно по горната повърхност на валанжинските карбонати, където тя проявява изразен асиметричен строеж. Според същите автори най-дълбоко потънала е югоизточната ѝ част – твърдение, което се потвърждава и от настоящото изследване чрез интерпретираните сеизмични разрези (фиг. 3). Южното крило на синклиналата е сравнително тясно и стръмно, докато северното е полегато, с наклон от 4.5°–5° (Георгиев и др., 1984). В западна посока, след Храбровския разлом (фиг. 1 и 3), структурата започва постепенно да се стеснява и изплитнява, като в обсега на Друмевския разлом преминава в наклонена на юг моноклинала.

Материали и методика

За постигане на поставената цел са извършени детайлни авторски изследвания на седиментния разрез. Те се базират на данни от сондажни ядки, съчетани с комплексна интерпретация на каротажни диаграми и сеизмични разрези, основно в източната част на Провадийската синклинала.



Фиг. 3. Геоложка интерпретация на сборни сеизмични профили от изследвания район

Фактологическата база и геофизичните данни, използвани за интерпретациите, са набрани от 9 дълбоки търсещи, 2 проучвателни и един опорен сондаж (фиг. 1). Във всички изброени сондажи е разкрит разрез с пермска възраст.

Разпознаването, трасирането и обвързването на основните секвентни граници с каротажните диаграми са базирани на сеизмостратиграфска интерпретация.

Детайлният сеизмостратиграфски анализ на синклиналата се базира на интерпретацията на две сборни профилни линии, съставени от общо пет 2D сеизмични разреза. Линиите са с направления съответно север-юг и запад-изток. (фиг.1 и фиг.3).

Пермски езера тип плая в района на Мирово

Анализ на гама и неутрон-гама каротажните диаграми

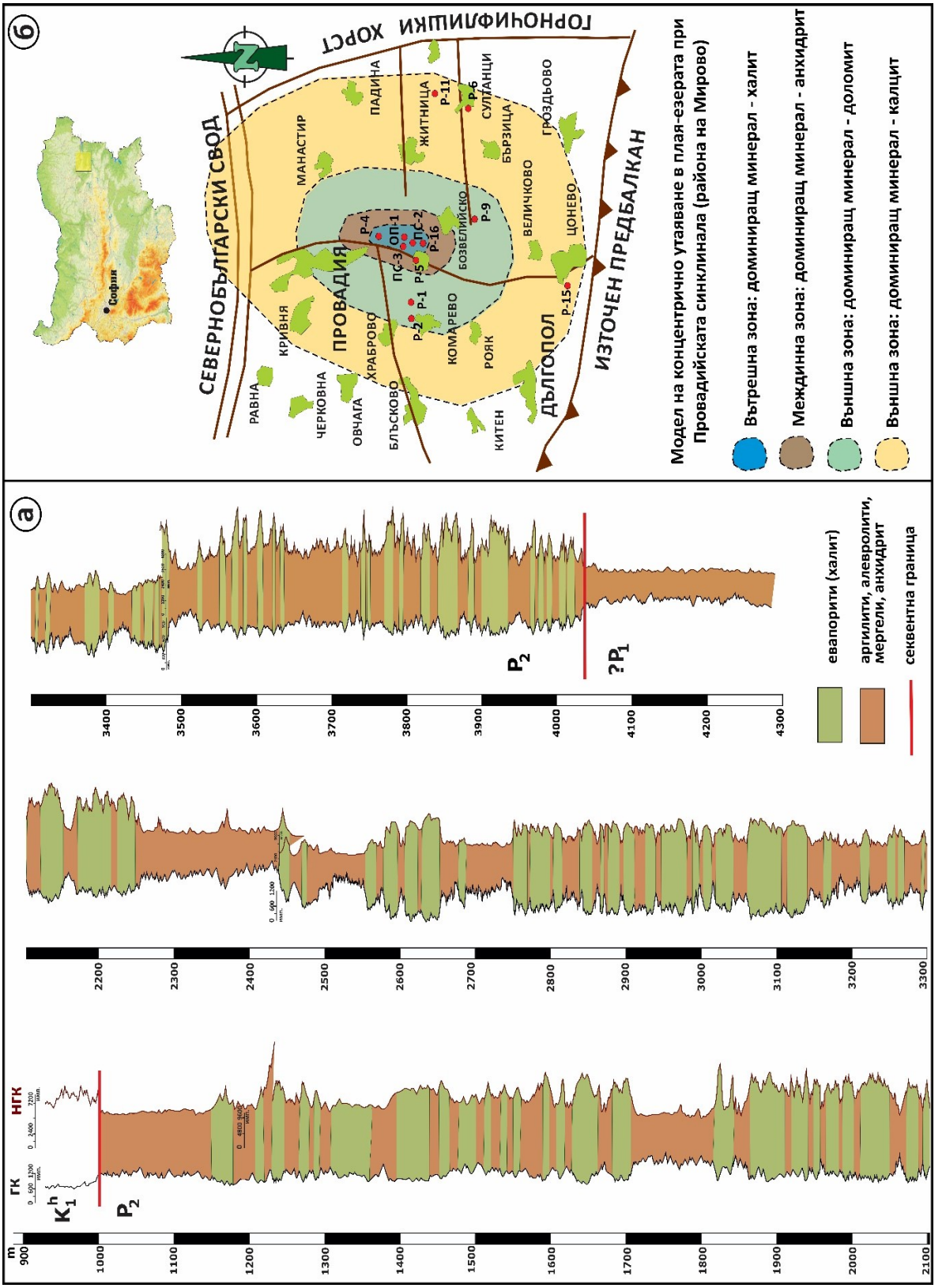
За сондаж ОП-1 Мирово са анализирани две каротажни диаграми, тъй като той пресича изцяло горнопермския разрез (фиг. 4а). Стойностите в тях са представени в импулси в минута. На гама (GR) и неутрон-гама (NGR) каротажите седиментите от тип „плая“ се разпознават чрез циклично редуване на физичните свойства, отразяващо прехода от теригенна към солена фаза. Това се изразява чрез силно „назъбена“ каротажна крива. Глинестите нива (влажна фаза) се характеризират с високи GR стойности поради наличието на радиоактивни елементи (K, Th) в глинестите минерали. Обратно, евапоритните интервали (суха фаза) показват екстремно ниски стойности, тъй като чистият халит и анхидритът практически не притежават естествена радиоактивност.

В разреза на ОП-1 Мирово са установени 83 евапоритни секвенции, формирани в условия на изразена цикличност (фиг. 4а). Редуването на халит с мергели, аргилити и алевролити е типичен белег за басейн, пулсирал между етапи на пълно пресъхване и периоди на нов приток на повърхностни води. Халитните пластове са с дебелина от 3 до 40 m и съответстват на периоди на интензивно изпарение и ариден климат. През тези етапи басейните са били изолирани, а солевата концентрация е достигала точката на насищане. Оранжево-червеният цвят на халита подсказва, че по време на отлагането му, е имало приток на окислено желязо от сушата.

Сеизмостратиграфски анализ

Върху сборните сеизмични разрези интервалът с отражения от пермските седименти се характеризира с високочестотно редуване на рефлектори с висока амплитуда.

Сеизмичните записи са плоски и паралелни дори в обхвата на солните куполи, което е резултат от алтернацията на евапоритни и теригенни пластове. Това е допълнително доказателство, че евапоритните отложения нямат морски генезис. При морски произход, на сеизмичните профили би се наблюдавала „прозрачна“ картина (лишена от вътрешни отражения) поради голямата дебелина и хомогенността на морските соли.



Фиг. 4. Схема на евапоритните секвенции (по данни от ГК и НГК в ОП-1 Мирово) и модел на концентрично утаяване в плая-езера въз основа на сондажни ядки.

Според класическия модел за езеро тип „плая“, евапоритните минерали се утаяват в концентрични зони спрямо своята разтворимост, успоредно с нарастването на солеността от периферията към центъра на басейна (Walker & James, 1992). Подобна зоналност, изразена чрез специфични автогенни фациеси, се наблюдава ясно и в източната част на Провадийската синклинала (фиг. 4б). Външната зона (с най-ниска соленост) е установена в сондажите Р-1 и Р-2 Храброво и Р-11 Житница. Ядковият материал там потвърждава присъствието на най-трудно разтворимите карбонати (калцит и доломит), представени от варовикови и доломитови прослойки. В междинната зона, вследствие на интензивното изпарение, доминира сулфатната седиментация, представена основно от прослойки анхидрит. Централната зона на палеобасейна обхваща участъка при сондажи ПС-2, ПС-3, Р-16, ОП-1

Мирово и Р-4 Провадия. Тя се отличава с най-висока соленост и отлагане на лесно разтворимия халит, където впоследствие са се формирали и солните куполи (фиг. 3).

Заключение

През късния перм, в условията на специфичен климат и тектонски режим, районът на Мирово е поприще на многократно развитие на езерни системи от тип плая. В резултат на тяхната геоложка дейност се формира характерен седиментен разрез, отличаващ се със закономерна хоризонтална и вертикална зоналност на фациесите и изразена евапоритна цикличност в централните части на басейните. Установени са 83 евапоритни последователности. Изучаването на разрезите, формирани в плая-обстановки, е от съществено значение за петролната геология, тъй като плътните глинести и евапоритни тела служат като високоефективни покривки – ключов елемент на всяка действаща петролна система.

Литература

Боков, П., Чемберски, Х. (ред.). (1987). *Геоложки предпоставки за нефтогазоносността на СИ България*. Техника, София, 332 стр.

Бончев, Ек., Белмустаков, Ем., Йорданов, М. Карагюлева, Ю. (1957). Главните линии в геоложкия строеж на Предбалкана между долините на Янтра и Черно море. – Изв. Геол. Инст., №5, 3-78.

Георгиев, Г., Монахов, Ив. (1979). Нови данни относно границата между Мизийската платформа и Предбалкана в Североизточна България. – *Год. СУ*, *Геология*, 71, 1, 367-378.

Георгиев, Г., Мандев, П., Вълчева, С., Минчева, Т., Желев, С. (1984). Нефтогазоносна перспективност на мезозойските седименти в Провадийската синклинала и Горночифлишкия хорст. – Год. СУ, ГГФ, 1, т. 78, 150–170.

Монахов Ив., Желев, С., Георгиев, Г. (1981б). Нефтогазоносна перспективност на мезозойските наслаги от южната част на Североизточна България. П. Мандев и И. Начев (Ред.), Геология и нефтогазоносностност на Североизточна България (стр 88-97). Техника.

Цанков, В. (1942). Геология на Провадийското плато и на солния залеж в източната му част. – Сп. Бълг. Геол. Д-во, 14, №2, 83-129.

Briere, P. (2000). Playa, playa lake, sabkha: Proposed definitions for old terms. Journal of Arid Environments Volume 45, Issue 1, May, Pages 1-7, https://doi.org/10.1006/jare.2000.0633

Cooke R., Warren, A. (1973). Geomorphology in Deserts. 436 p. https://doi.org/10.2307/jj.8441720

Cooke, R. U., Warren, A., Goudie, A. S. (1993). *Desert Geomorphology*. https://doi.org/10.1201/b12557. 534 p.

Dimitrova, T., Petrunova, L., Yanev, S. (2006). Permian palynostratigraphy from Northeast Bulgaria. Review of the Bulgarian geological society, vol. 67, part 1-3, p. 104-111.

Hill, R. T. (1900). Topographic Atlas of the United States. https://doi.org/10.3133/70260410

Kolpakova, M., Gaskova, O., Naymushina, O., Karpov, A., Vladimirov, A., Krivonogov, S. (2019). Saline lakes of Northern Kazakhstan: Geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments, Applied Geochemistry, Volume 107, 8-18.

Messager, M., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I. & Schmitt, O. (2016). Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. Nature Communications, 7 (1):13603, https://doi.org/10.1038/ncomms13603.

Neal, James T. (ed.) (1975). *Playas and Dried Lakes: Occurrence and Development*. Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross Inc., 411 pp.

Rosen, M. (1994). Paleoclimate and Basin Evolution of Playa Systems. Geological Society of America, 117 p.

Shaw, P. (1989). Playas, pans and salt lakes. In Arid Zone Geomorphology; Shaw, P. A., Thomas, D.G., David, S., Eds.; Belhaven Press: London, UK, pp. 184–208.

Walker, R. G. & N. P. James (eds) (1992). *Facies Models. Response to Sea Level Change*. 409 pp.

Yanev, S. (1993). Permian in North Bulgaria. II. Formal lithostratigraphy related to the Upper Permian. Geologica Balcanica, 23, 1; 3-24.

Yanev, S. *(2019).* Permian playas in the Bulgarian part of the Balkan Peninsula. Paleogeography and paleoclimatic environments. Review of the Bulgarian geological society, vol. 80, part 1, p. 31–40.

Yanev, S., Lakova, I., Boncheva, I. & Sachanski, V. (2005). The Moesian and Balkan terranes in Bulgaria: Palaeozoic basin development, palaeogeography and tectonic evolution, *Geologica Belgica*, volume 8, number 4. Avalonia-Moesia volume, 185-192. https://popups.uliege.be/1374-8505/index.php?id=828.

Yanev, S., M. C. Göncüoglu, I. Gedik, I. Lakova, I. Boncheva, V. Sachanski, C. Okuyucu, N. Özgül, E. Timur, Y. Maliakov and G. Saydam. (2007). Stratigraphy, correlations and palaeogeography of Palaeozoic terranes of Bulgaria and NW Turkey: a review of recent dataGeological Society, London, Special Publications 2006; v. 260; p. 51-67 doi:10.1144/GSL.SP.2006.260.01.04

PUBLICATION IN SEVERAL STEPS

Mila Ilieva-Obretenova, Maya Tomova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: mila.ilieva@mgu.bg; maya.tomova@mgu.bg

ABSTRACT. The article provides a comprehensive review of the application of artificial intelligence in university education and research. Both students and researchers advocate for reform, emphasising the need for broader integration of Artificial Intelligence into curricula. This transformation, however, presents significant challenges for educators, who must equip students with the ability to formulate precise questions and critically evaluate AI-generated responses. To illustrate this process, the authors assign a task to Copilot: exploring how AI can support the writing of a scientific paper on the topic *Extreme temperatures and their impact on mineral resources in Europe.* Subsequently, the research questions are refined to guide the investigation and the composition of the article. The discussion further outlines directions for the development of academic skills in the era of AI, highlighting the importance of fostering critical thinking and methodological rigor. In conclusion, the article asserts that AI will inevitably become an integral component of both scientific inquiry and higher education, provided that its use is governed by strict ethical frameworks.

Key words: artificial intelligence (AI), university education, AI-generated responses, mineral resources, academic skills.

ПУБЛИКАЦИЯ В НЯКОЛКО СТЪПКИ

Мила Илиева-Обретенова, Мая Томова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Статията представя подробен преглед на приложението на изкуствения интелект в университетското образование и изследванията. Студентите и изследователите са застъпници на реформа, акцентирайки върху необходимостта от по-широка интеграция на изкуствения интелект в хорариума. Трансформацията, обаче, поставя значителни предизвикателства пред преподавателите, които трябва да развият у студентите способността да формулират прецизни въпроси и критично да оценяват генерираните от изкуствен интелект отговори. За да се илюстрира този процес, авторите възлагат на Copilot задача: да изследва как ИИ може да подпомага писането на научна статия по темата „*Екстремни температури и тяхното влияние върху минералните ресурси в Европа“.* След това изследователските въпроси се прецизират, за да дадат насока на проучването и оформление на статията. По-нататък дискусията очертава насоките за развитието на академичните умения в ерата на ИИ, посочвайки важността на развиването на критично мислене и поддържането на методологична прецизност. В заключение статията потвърждава твърдението, че ИИ неизбежно ще стане неразривен елемент както от научните изследвания, така и от висшето образование, при условие че употребата му е зададена в стриктни етични рамки.

Ключови думи: изкуствен интелект (ИИ), университетско образование, генерирани от изкуствен интелект отговори, минерални ресурси, академични умения.

Introduction

Machines are becoming increasingly proficient at defining tasks and analysing data. Therefore, doctoral programs must evolve to maximise the use of artificial intelligence (AI). In 2022, the chatbot ChatGPT was launched. Since then, a debate has emerged within universities about AI, focusing primarily on undergraduate education—how to prevent misconduct and how to leverage AI to enhance learning. Parker et al. (2025) unearth a hybrid human-AI writing process characterised by dynamic brainstorming, continuous negotiation of meaning, and comparative evaluation. Emphasis on AI literacy and academic integrity is crucial for preparing graduates for an AI-integrated workforce. Oubibi, (2025) delves into the integration of generative AI tools, such as advanced text generation models, within the context of creative and academic writing among 109 postgraduate students in Thailand. The findings from this study reveal substantial enhancements in multiple dimensions of student engagement, including creative output, writing fluidity, and technological adaptability. But in research—the other core activity of universities—a change is being observed. Harris et al., (2025) examine the applications and perceptions of AI tools in doctoral studies, focusing on their efficacy in enhancing research effectiveness. A survey found that most participants used AI tools in their doctoral studies (63%), with the majority of those users reporting some positive impact from their usage. Sabbaghan et al. (2025) explore graduate students' perceptions of using a generative AI-powered research application, COREI, and its impact on their sense of intellectual and scholarly ethics. Semi-structured interviews were conducted with graduate students (n = 10), four doctoral and six masters', from a large research university in Western Canada. The findings suggest a need for reconceptualising traditional notions of agency, authorship, and originality in the context of AI-assisted research. The study highlights the importance of developing ethical frameworks and institutional policies that prioritise human agency and critical engagement with AI-generated content, while also emphasising the need for further research on the long-term impacts of generative AI on intellectual and scholarly ethics. Most universities are unprepared for the scale of change, with few having management strategies in place. Many academic institutions remain focused on the shortcomings of early generative tools, such as hallucinations (confidently stated but incorrect information), contradictions, and superficial responses. However, by 2025, AI models are becoming increasingly accurate. As noted by Nordling (2025), doctoral students are calling for less harassment and adequate supervision. Lambe (2025) describes various strategies for finding joy in doctoral work. AI tools are now capable of writing literature reviews, producing complex code with human assistance, and even generating hypotheses when provided with large datasets. AI agents that can set their own sub-goals, coordinate tasks, and learn from feedback represent a significant leap forward. If this trend continues, we may reach a point where conventional doctoral work can be carried out—or at least substantially supported—by machines. Grote et al., (2024) present findings from a broad, national survey and a workshop focusing on the challenges and opportunities the advancement of AI poses for PhD candidates, seen from the perspective of library staff working with research support in several research libraries in Norway. For the development of competences of teaching staff in academic libraries, the paper

recommends integrating AI-related topics into existing educational resources and creating arenas for sharing experiences and knowledge with relevant partners both within and outside the university. Rafi & Amjad, (2025) emphasise the need for significant institutional investments in AI-integrated writing platforms to open, widen, and deepen discussion on dissertation writing – a strategy to strike a balance between GenAI and human interactions. This change presents challenges for faculties. Gupta (2025a) shows how AI could be helpful in PhD students' education. "What does it mean for an original contribution not to be accepted when an AI tool creates the literature review, gathers and analyses data, and writes chapters of the dissertation?" The role of a faculty is to teach students how to formulate questions and verify answers. The University of Washington (UW) Graduate School (2024) exhibits questions to be input to ChatGPT and CoPilot and the corresponding AI generated answers. The UW Graduate School add other questions to provide an example of the variability of the output received from the same question. The research consists of an incomplete list of 20 AI tools for research and writing, generated by CoPilot. Gupta (2025b) simulates the execution of a doctoral project by AI, examining how extreme ocean temperatures affect marine species. But before that, a study must be conducted on how AI can assist doctoral students.

Methodology

The method includes AI`s recommendations on *How climate changes impact mineral resources in Europe*. Below, we outline the discussion:

I asked AI how climate change affects mineral resources in Europe.

Mila, I'd recommend prioritising:

- **GIS + AI overlays** for mapping mineral belts and heatwave vulnerability.
- **Elicit.org + Copilot** for synthesising climate-mineral literature.
- **DeepL Write** for bilingual abstracts and keywords.

Would you like me to **map these tools into your actual workflow** (e.g., literature review → mapping → writing → submission), so you have a step-by-step AI integration plan for your PhD article?

Yes, please.

Step 1: Literature Review

- **Tools**:
  - *Elicit.org* → Extracts methods, results, and gaps from papers.
  - *Semantic Scholar / Research Rabbit* → Citation networks and related works.
  - *Copilot* → Summarises articles, generates keywords, and refines abstracts.
- **Workflow**:
  - Use Elicit to gather structured insights from climate–mineral studies.
  - Build citation maps with Research Rabbit to visualise research clusters.
  - Ask Copilot to synthesise findings into a coherent narrative and generate bilingual keywords (English–Bulgarian).

Step 2: Mapping & Data Analysis

- **Tools**:
  - *QGIS / ArcGIS with AI plugins* → Geospatial overlays of mineral belts and heatwave zones.
  - *Python ML libraries (scikit-learn, TensorFlow)* → Detect climate vulnerability patterns.
  - *Copilot visualisation mode* → Quick charts and graphs for exploratory analysis.
- **Workflow**:
  - Import mineral belt datasets into QGIS.
  - Overlay climate vulnerability indices (heatwave frequency, drought zones).
  - Use AI clustering (e.g., k-means) to identify instability hotspots.
  - Generate maps and graphs for inclusion in your article.

Step 3: Writing & Drafting

- **Tools**:
  - *Copilot* → Draft abstracts, introductions, and refine structure.
  - *Grammarly / DeepL Write* → Language polishing and translation.
  - *Scholarcy* → Summarize supporting papers into digestible notes.
- **Workflow**:
  - Draft your abstract with Copilot, focusing on clarity and impact.
  - Use Grammarly for style refinement and DeepL for bilingual precision.
  - Summarise supporting literature with Scholarcy to keep references concise.

Step 4: Ethics & Integrity

- **Tools**:
  - *Turnitin with AI detection* → Check originality.
  - *Zotero / EndNote* → Manage references properly.
  - *University AI guidelines (e.g., UW Graduate School)* → Ensure compliance.
- **Workflow**:
  - Run drafts through Turnitin to confirm originality.
  - Organise references with Zotero, ensuring correct citation formats.
  - Align your AI usage with institutional guidelines for transparency.

Step 5: Submission & Collaboration

- **Tools**:
  - *Overleaf with AI assistants* → Collaborative LaTeX writing.
  - *Mendeley + AI search* → Reference organisation and discovery.
  - *Copilot Pages* → Refine drafts and prepare submission-ready materials.
- **Workflow**:
  - Finalise manuscript in Overleaf for journal formatting.
  - Double-check references with Mendeley.
  - Use Copilot Pages to polish your article and prepare keywords/abstract for submission.

Mila, this plan integrates AI at every stage: **discover → analyse → write → validate → publish**. It keeps you efficient while safeguarding originality and rigor. Would you like me to **design a visual flowchart of this workflow** (from literature review to

submission) so you can use it as a reference in your research notes?

Yes, please!

Unfortunately, two attempts were not successful. AI only produced a description of the steps, which we used to construct the flowchart ourselves (Fig. 1).

Results

The results include the specific questions we posed to Copilot in order to elaborate on *How extreme temperatures affect mineral resources in Europe*.

1. Give core scientific questions.
2. Make regional targets for analysis.
3. List deposit forming minerals.
4. Explain Heatwave Impact mechanisms on Mineral Deposits.
5. Draw a Computational Plan.
6. Show How a Machine Learning Model works.
7. Exhibit Model Logic.
8. Demonstrate a Machine Learning Simulation.
9. Perform Predictive Modelling of Mineral Instability in European Heatwave zones.
10. Write Future Heatwave scenarios.
11. Overlay maps of European Mineral Belts and European Heatwave Zones.
12. Write Conclusion with future work.
13. Write Literature.
14. Write an Introduction.
15. Write an Abstract.

The next result will be illustrated and discussed in a separate article of ours: **“Heatwave-Induced Mineral Instability across Europe”**.

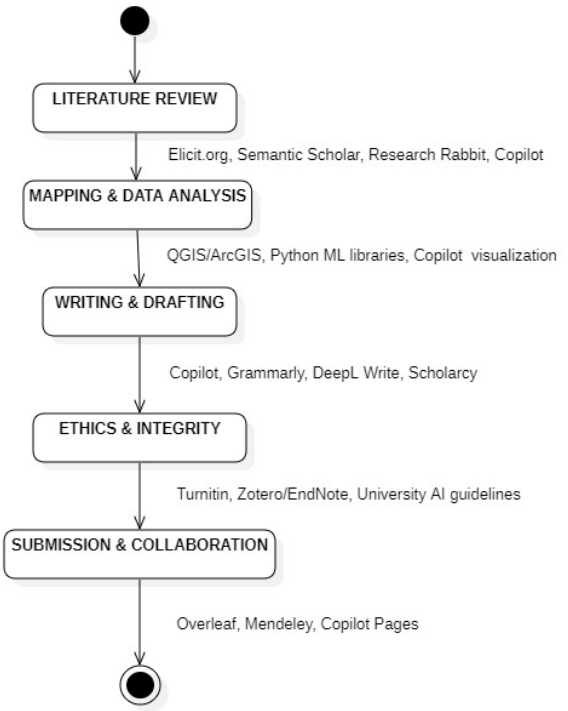


Fig. 1. Flowchart of AI integration in PhD research (article) workflow

Discussion

Academic skills

The experiment has convinced us that training in academic skills will need to be fundamentally reconsidered along the following lines:

1. Students will need to develop sufficient expertise to identify when AI systems produce plausible but inaccurate results—a dilemma, since this requires many of the very skills that AI is beginning to replace.
2. Training in oral defence, live problem-solving, and subsequent commentary on research decisions is far more important than a written article or dissertation.
3. The structure of doctoral programs will need to be reconsidered. Universities will have to decide whether to shorten doctoral programs or to broaden their scope in order to address more ambitious, potentially interdisciplinary problems.
4. Safeguarding students’ development is a critical measure, as (over)reliance on AI may lead to intellectual atrophy across a range of skills. Abilities, such as critical reading, analytical reasoning, and scientific writing, must be practiced regularly. This requires deliberate academic intervention.
5. Developing recommendations for the use of AI should focus primarily on academic integrity—for example, requiring disclosure of AI assistance and limiting its use to supportive roles rather than fully replacing research writing. Mandatory courses in AI literacy could be introduced into undergraduate and PhD curricula. The absence of such programs may result in long-term inequality in research capacity.
6. Consulting with AI can help identify new research directions, suggest methodological approaches, and even propose analytical frameworks, while also enabling observation of how AI performs complex analyses on real data. For those who do not use AI tools regularly, the complexity of such outputs may be unsettling. Therefore, students and doctoral candidates must adapt to this new reality.

Geophysical validation as a framework for AI-integrated academic training

The rapid integration of artificial intelligence into academic research has enhanced modelling capacity and predictive performance in geoscience. As Degen pointed, an accurate assessment of the physical states of the Earth system is an essential component of many scientific, societal, and economical considerations (Degen, et al. 2023). However, statistical accuracy alone does not guarantee physical validity. This paper proposes a structured framework in which geophysical monitoring functions as a validation and calibration mechanism for machine learning (ML) predictions. According to Li and colleagues, machine learning has significantly revolutionised scientific methodology in geoscience applications by introducing automation, enhancing efficiency, enabling adaptability, ensuring security, and facilitating extensive data analytics (Li, et al., 2023,). With a step forward, by embedding an iterative AI–Geophysics validation loop into academic workflows, PhD candidates develop critical AI literacy, interpretative autonomy, and physics-informed reasoning. The framework transforms AI from a black-box predictor into a hypothesis-generating partner whose outputs must be tested against measurable subsurface processes. This approach strengthens methodological accuracy, while encouraging

responsible and scientifically grounded AI integration in doctoral training.

Artificial intelligence is increasingly embedded in academic and doctoral research workflows, supporting literature synthesis, predictive modelling, and data interpretation. While these tools improve efficiency and analytical depth, they also introduce some risks - physically inconsistent or geologically implausible results.

In applied geoscience, predictive ML models often operate in complex, multi-parameter environments characterised by ambiguity and uniqueness. Without physical constraints, models may identify statistical correlations, which leads to geological inconsistency. Therefore, doctoral training must extend beyond AI usage toward *AI validation.*

It has been demonstrated that interpretable neural network techniques can provide insights into model behaviour beyond simple accuracy metrics, offering better alignment with geophysical processes (Toms et al., 2021). We propose a scientific framework in which geophysical monitoring is systematically integrated into AI-driven modelling. This approach establishes an iterative validation mechanism that aligns statistical prediction with measurable subsurface reality.

The proposed framework consists of a four-stage architecture designed for doctoral research in AI-integrated geoscience.

Stage 1 – Predictive AI Modelling

A supervised machine learning model generates a quantitative prediction (e.g., Instability Score, Risk Index, or Structural Integrity Metric) based on structured inputs such as:

- Climatic anomalies
- Geological parameters
- Deposit depth
- Mineralogical composition
- Hydrothermal indicators

Stage 2 – Geophysical Measurement

Doctoral researchers evaluate whether predicted instability manifests in measurable subsurface responses using time-lapse or monitoring techniques such as:

- Electrical resistivity tomography (ERT)
- Induced polarisation (IP)
- Seismic velocity measurements (ΔVp)
- Self-potential (SP) monitoring

Stage 3 – Comparative consistency analysis

The predicted AI output (e.g., Instability Score, or IS) is compared with the measured Geophysical Response Index (GRI):

- If IS ≈ GRI → the model demonstrates physical consistency.
- If IS ≠ GRI → the model requires recalibration.

Stage 4 – Iterative model refinement

When inconsistencies arise, doctoral researchers engage in structured recalibration:

- Inclusion of geophysical parameters as additional features
- Adjustment of model parameters
- Reassessment of some parameters for geological plausibility

The model is retrained and re-evaluated, closing the validation loop.

The AI–Geophysics iterative validation loop (Fig. 2.) illustrates a structured doctoral workflow in which machine learning predictions are continuously evaluated and adjust with accordance to geophysical responses. This mechanism enhances interpretability, enforces physical consistency, and encourages critical thinking.

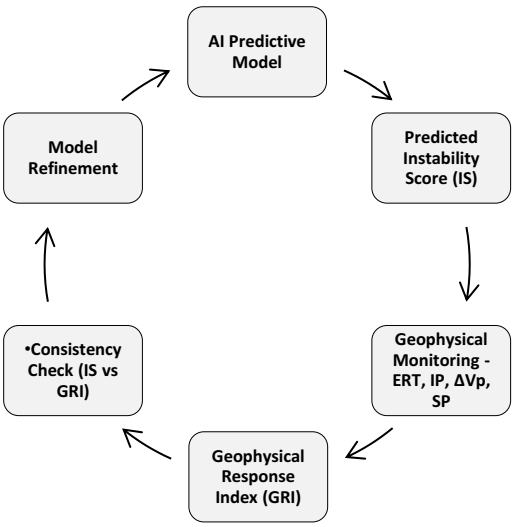


Fig. 2. The AI–Geophysics iterative validation loop

Embedding geophysical validation into AI-driven modelling represents both a methodological advancement and a pedagogical innovation. Through the AI–Geophysics iterative validation loop, doctoral researchers learn to critically evaluate model outputs and to use prediction with physical reality. This multidimensional thinking is essential for responsible AI-assisted research.

Conclusion

The role of artificial intelligence in doctoral research is expected to expand significantly over the next decade, reshaping both methodology and pedagogy. AI will increasingly serve as a co-researcher, automating repetitive tasks, such as literature synthesis, data cleaning, and visualisation, while enabling PhD candidates to focus on originality and critical inquiry. Advanced natural language models will evolve into multilingual writing partners, reducing barriers for international scholars and fostering more inclusive participation in global science.

In data-intensive fields, AI-driven analytics and geospatial modelling will become standard practice, allowing doctoral students to uncover complex patterns in all topics of our life. At the same time, universities will formalise ethical frameworks to ensure transparency, authorship integrity, and responsible use of AI. Doctoral training programs are likely to incorporate AI literacy as a core competency, preparing candidates for careers in academia and industry where hybrid human–machine collaboration is the norm.

Overall, the prognosis suggests that AI will not replace the intellectual rigor of PhD research but will act as a catalyst—accelerating discovery, enhancing interdisciplinarity, and democratising access to advanced research tools. The

challenge will lie in balancing efficiency with originality, ensuring that doctoral research remains a space for innovation, critical thought, and ethical scholarship.

References

Degen, D., Caviedes Voullieme D., Buiter, S., Freeberg, Hendricks Franssen, J.-H., Vereecken, H., Gonzalez-Nicolas, A., and Wellmann, F. (2023) Perspectives of physics-based machine learning strategies for geoscientific applications governed by partial differential equations. *Geosci. Model Dev., 16, 7375-7409,* https://doi.org/10.5194/gmd-16-7375-2023

Grote, M., Faber, H., G., L., Gasparini, A. (2024) Artificial Intelligence in PhD education: New Perspectives for research Libraries. LIBER Quarterly: *The Journal of the Association of European Research Libraries, Vol. 34, No. 1 (2024)* https://doi.org/10.53377/lq.18137

Gupta A. S. (2025a). PhD training needs a reboot in an AI world. *Nature*, PhD training needs a reboot in an AI world

Gupta A. S. (2025b). “Supplementary information to: PhD training needs a reboot in an AI world”, An Essay published in Nature 647, 27–28 (2025) https://doi.org/10.1038/d41586-025-03572-w

Harris, M., Soriano, N., Ralston, N. (2025) An Examination of the Use of AI (Artificial Intelligence) Technology as Experienced by Scholarly Practitioners in an Educational Doctorate Program. Impacting Education: *Journal of Transforming Professional Practice, Vol. 10, No. 1 (2025)* https://doi.org/10.5195/ie.2025.472

Lambe, R., (2025) Stressed out by PhD Life? Five Strategies to take back the joy. *Nature.* Stressed out by PhD life? Five strategies to take back the joy

Li, Y., E., O`Maley, D., Beroza, G., Curtis, A., Johnson, P. (2023) Machine Learning Developments and Applications in Solid Earth Geosciences: Fad or Future? *J. Geophys. Res. Solid Earth, 2023, 128,* e2022JB026310.

Nordling, L. (2025) How money, politics and technology are redefining the PhD experience in 2025. *Nature.* How money, politics and technology are redefining the PhD experience in 2025

Oubibi, M. (2025) Generative Artificial Intelligence: Postgraduate student`s digital adaptability, engagement and academic confidence. *J. Comput. Educ.* https://doi.org/10.1007/s40692-025-00364-z

Parker, J. L., Richard, V.M., Acaba, A. et al. (2025) Negotiating Meaning with Machines: AI`s role in Doctoral Writing Pedagogy. *Int. J. Artif. Intell. Educ.* https://doi.org/10.1007/s40593-024-00425-x

Rafi, M., S., Amjad, I. (2025) The Role of Generative AI in writing doctoral dissertation: perceived opportunities, challenges, and facilitating strategies to promote human agency. *Discov. Educ. 4, 165* https://doi.org/10.1007/s44217-025-00503-9

Sabbaghan, S., Eaton, S. E. (2025) Navigating the Ethical Frontier: Graduate Students` Experiences with generative AI-Mediated Scholarship. *Int. J. Artiff. Intell. Educ.* https://doi.org/10.1007/s40593-024-00454-6

Toms, B., A., Kashinath, K., Prabhat, and Yang, D. (2021) Testing the reliability of interpretable neural networks in geoscience using the Madden-Julian oscillation. *Geosci. Model. Dev. 14,* 4495-4508, https://doi.org/10.5194/gmd-14-4495-2021

University of Washington Graduate School. (2024). Effective and responsible use of AI in Research: Effective and responsible Use of AI and Research Guidance for Performing Graduate Research and in Writing Dissertations, Theses, and Manuscripts for Publications. Effective and Responsible Use of AI in Research – UW Graduate School

HEATWAVE INDUCED MINERAL INSTABILITY ACROSS EUROPE

Mila Ilieva-Obretenova, Maya Tomova

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: mila.ilieva@mgu.bg; maya.tomova@mgu.bg

ABSTRACT. As climate extremes intensify across Europe, the geochemical stability of mineral deposits faces growing uncertainty. This study investigates the vulnerability of economically significant mineral belts—including the Iberian Pyrite Belt, Massif Central, the Alps, the Rhodopes Massif, and the Bohemian Massif—to heatwave-induced alteration. Using a supervised machine learning model trained on synthetic and field-calibrated data, we predict mineral instability scores based on temperature anomalies, deposit depth, mineral type, drought index, and hydrothermal activity. We introduce four simplified metrics—Thermal Stress Index (TSI), Metamorphic Shift Potential (MSP), Hydrothermal Disruption Score (HDS), and Oxidation Risk Index (ORI)—to quantify mineralogical responses to extreme heat. Simulations reveal that shallow sulphide-rich deposits are particularly susceptible to oxidation and remobilisation, while metamorphic terrains exhibit phase transitions under elevated pressure-temperature conditions. Spatial overlays of mineral belts and heatwave zones highlight high-risk regions in southwestern and southeastern Europe. Our findings offer a scalable framework for forecasting mineral instability under future climate scenarios and underscore the need for geoscientific integration in climate adaptation strategies. This approach supports proactive resource management and enhances our understanding of Earth system responses to anthropogenic stress.

Key words: mineral instability, geoscientific integration, climate adaptation strategies, proactive resource management, anthropogenic stress.

ИНДУЦИРАНА ОТ ГОРЕЩИ ВЪЛНИ НЕСТАБИЛНОСТ НА МИНЕРАЛИТЕ В ЕВРОПА

Мила Илиева-Обретенова, Мая Томова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Тъй като климатичните екстремуми се интензифицират в Европа, геохимичната стабилност на минералните депозити е изправена пред растяща несигурност. Тази статия изследва уязвимостта на икономически значими минерални пояси – включващи Иберийския пиритен пояс, Централен масив, Алпи, Родопски масив и Бохемски масив – спрямо индуцирани от горещи вълни промени. Използвайки контролиран модел за машинно обучение, ние прогнозираме степента на нестабилност на минералите, базирана на температурни аномалии, дълбочина на депозита, тип минерал, индекс на засушаване и хидротермална активност. Ние въвеждаме четири опростени показателя – Индекс на термален стрес (ИТС), Потенциал за метаморфна промяна (ПМП), степен на хидротермално разрушаване (СХР) и Индекс на риск от оксидация (ИРО) – за да се изрази количествено минералогичният отговор на екстремното затопляне. Симулациите показват, че плитки депозити, богати на сулфиди, са особено податливи на оксидация и ремобилизация, докато метаморфните терени демонстрират фазови преходи при увеличаващи се въздействия от налягане и температура. Пространственото наслагване на минерални пояси и зони с горещи вълни очертава високорискови региони в югозападна и югоизточна Европа. Нашите резултати предлагат мащабируема рамка за прогнозиране на нестабилността на минералите при бъдещи климатични сценарии и подчертават необходимостта от интеграция на науките за земята в стратегии за климатична адаптация. Този подход е в подкрепа на проактивното управление на ресурси и разширява и подобрява разбирането ни за реакциите на земната система към антропогенен стрес.

Ключови думи: нестабилност на минералите, интеграция на науки за земята, стратегии за климатична адаптация, проактивно управление на ресурси, антропогенен стрес.

Introduction

The intersection of climate extremes and mineralogical processes has gained increasing attention in recent years, particularly in the context of European heatwaves. While most studies have focused on biological or economic impacts, emerging research highlights the geochemical and structural consequences of elevated temperatures on mineral systems. Shock metamorphism and temperature-driven mineral instability have been extensively studied in extra-terrestrial contexts, offering analogy for terrestrial heatwave effects. Hu and Sharp (2022) examined the formation and extinction of high-pressure minerals in meteorites, emphasising how temperature variability can produce heterogeneous shock features even under uniform pressure conditions. These findings suggest that temperature alone—such as that induced by heatwaves—can significantly alter mineral stability fields. Offield (1987) explored shock effects in rocks and minerals, noting that transient thermal pulses can induce compressional stress and phase transitions not typically observed in standard metamorphic regimes. Although these studies focus on impact events, the underlying mechanisms—rapid temperature rise and mineral reordering—are relevant to surface heatwave scenarios. Kelsey and Hand (2014) investigated ultrahigh-temperature crustal metamorphism, detailing how phase equilibria and trace element thermometry respond to extreme thermal conditions. Their work underscores the role of bulk composition and tectonic setting in determining mineral response to heat, which is directly applicable to European regions like the Alps and the Rhodopes Massif. Lanari and Duesterhoeft (2019) advanced the field by modelling metamorphic rocks using equilibrium thermodynamics and internally consistent databases, enabling quantitative predictions of mineral phase shifts under varying pressure-temperature (P-T) conditions. This approach supports the use of simplified metrics like the Metamorphic Shift Potential (MSP) in forecasting mineralogical changes during heatwaves. Despite these advances, few studies have directly linked climate-induced heatwaves to mineral instability in European geological settings. A novel framework for assessing mineral risk under extreme temperature events offers The Core Scientific Questions:

1. How do extreme surface temperature anomalies during European heatwaves alter the stability fields of deposit-forming minerals?
2. Which European mineral provinces show the highest susceptibility to heatwave-induced metamorphic overprinting?
3. Can we quantify a threshold temperature or duration beyond which mineralogical transformations become geochemically irreversible?

4. How do heatwaves interact with hydrothermal systems to accelerate mineral alteration or remobilisation?
5. What predictive risk metrics best correlate temperature anomalies with mineralogical instability across Europe's major deposit?
6. Can machine learning models trained on past heatwave data predict future mineralogical risk zones?
7. How do mineral phase diagrams shift under real-world heatwave conditions compared to lab-based models?

As climate change accelerates, Europe is experiencing increasingly frequent and intense heatwaves, with profound implications for natural systems and infrastructure (European Environment Agency, 2021; Karinou, F. et al.,2025). While the socio-economic impacts of extreme heat are well documented (Garcia-Leon G., et al., 2021; European Environment Agency, 2025; Chen Zhao-Yue et al., 2025; Lafakis, 2025), the geoscientific consequences—particularly on mineral stability and metamorphic processes—remain underexplored. This study investigates how heatwaves influence the physical and chemical integrity of deposit-forming minerals across key European geological provinces.

Methodology

Methodology includes the following steps in general:

Focusing on regions, such as:

- **the Iberian Pyrite Belt,** (Spain/Portugal): sulphide-rich, shallow deposits.
- **Massif Central and the Alps,** (France/Switzerland): metamorphic terrains.
- **the Rhodopes Massif & the Balkan zones** (Bulgaria, Greece): polymetallic and carbonate-hosted deposits.
- **the Bohemian Massif**, (Czech Republic): high-grade metamorphic rocks,

we examine the vulnerability of **deposit-forming minerals**—involved in ore genesis and metamorphic transformation—such as:

- **sulphides,** (pyrite, chalcopyrite): sensitive to oxidation and remobilization under heat stress,
- **carbonates,** (calcite, dolomite): vulnerable to thermal decomposition and fluid-driven alteration,
- **silicates,** (feldspar, mica, garnet): key indicators of metamorphic grade and stability,
- and **evaporites** (gypsum, halite): highly reactive to temperature and humidity changes,

to

- **thermal stress**: altering mineral assemblages and accelerating weathering,
- **metamorphic overprinting**: especially in regions with pre-existing geothermal gradients (e.g. the Alps, the Carpathians),
- **oxidation and remobilisation**: affecting sulphide-rich zones in Iberia and the Balkans,
- **hydrothermal disruption**: due to droughts and reduced groundwater recharge.

By integrating simplified risk metrics with machine learning models, we aim to quantify mineralogical instability under extreme temperature scenarios and identify spatial patterns of metamorphic sensitivity. This approach not only advances our understanding of climate-mineral interactions but also provides a predictive framework for assessing future geochemical risks in a warming Europe. Our Computation Plan will be Risk Metrics for Mineral Stability, shown in Table 1.

Table 1. *Computation the metrics using available climate and geological data*

Metric	Description	Use
Thermal Stress Index (TSI)	Combines surface temp anomaly + deposit depth	Predicts mineral destabilisation
Metamorphic Shift Potential (MSP)	Based on P-T conditions vs mineral phase diagrams	Flags zones of metamorphic overprint
Hydrothermal Disruption Score (HDS)	Combines drought index + aquifer proximity	Assesses alteration risk
Oxidation Risk Index (ORI)	Surface exposure + sulphide content + temp	Predicts remobilisation of metals

We use regression or machine learning models to correlate these metrics with observed mineral supply impacts. We apply Predictive Modelling of Mineral Instability under Heatwave Conditions. To assess the vulnerability of deposit-forming minerals across Europe, we developed a supervised machine learning model using historical heatwave data and geological attributes. The model inputs included temperature anomalies, deposit depth, mineral type, drought index, and hydrothermal activity status. The target variable was a mineral instability score derived from reported alteration events and thermodynamic thresholds. We trained a Random Forest Regressor on synthetic and field-validated data from the Iberian Pyrite Belt, achieving high predictive accuracy. The model revealed strong correlations between shallow sulphide-rich deposits and elevated instability during extreme temperature events. This approach enables spatial risk mapping and supports proactive mineral resource management under climate stress. Then we applied the trained model for all deposit zones in Europe.

How does the Machine Learning Model Work?

We will use a supervised learning model to predict mineral instability based on heatwave conditions. Here's the step-by-step breakdown:

1. Input Data (Features)

We feed the model with structured data from one deposit zone, then from each deposit zone:

- **Temperature anomaly** (e.g. +6°C above baseline)
- **Heatwave duration** (e.g. 10 days)
- **Deposit depth** (e.g. 50 meters)
- **Mineral type** (e.g. pyrite, calcite)
- **Geological setting** (e.g. metamorphic, sedimentary)
- **Hydrothermal activity** (e.g. active, dormant)
- **Drought index** (e.g. SPI or PDSI values) [**SPI (Standardized Precipitation Index)** measures drought based only on precipitation anomalies over different timescales, **PDSI (Palmer Drought Severity Index)** uses both precipitation and temperature data in a soil water balance model to estimate long-term drought severity].

2. Target Variable (Label)

This is what the model tries to predict: **Instability Score**: a numeric value; representing mineralogical disruption (e.g. 0 = stable, 1 = fully altered) or a **binary label**: Stable vs Unstable.

3. Training the Model

We use historical data from past European heatwaves and known mineral impacts to train the model. It learns patterns like:

- Sulphide minerals at shallow depth + high temp anomaly → high instability
- Carbonates in dry zones → prone to dissolution
- Higher temp anomaly + shallow depth → higher instability
- Active hydrothermal zones → increased alteration risk
- Sulphide minerals → prone to oxidation.

Once trained, the model can predict instability scores for new deposits based on heatwave conditions. Common algorithms: Random Forest, Gradient Boosting, or Neural Networks (if data is rich).

4. Integration of Geophysical Monitoring in Model Training

To enhance the physical realism of the predictive framework, geophysical monitoring parameters are incorporated as additional features in the supervised learning model. Time-lapse Electrical Resistivity Tomography (ERT), Induced Polarisation (IP), Self-Potential (SP), and seismic velocity variations are used to quantify subsurface responses to thermal stress induced by heatwaves. These parameters provide measurable proxies for sulphide oxidation, fluid redistribution, porosity increase, and mineralogical alteration, thereby linking surface climate anomalies to physically observable subsurface transformations. The proposed framework integrates climate-driven machine learning predictions with real-time geophysical monitoring data through a correction layer. While the supervised model estimates mineral instability based on temperature anomalies and geological parameters, a Geophysical Response Index (GRI) quantifies the actual geophysical expression of thermal perturbation. The GRI is defined as:

$$GRI = \Delta\rho + \Delta IP + \Delta V_p + \Delta SP \quad (1),$$

where Δρ represents changes in electrical resistivity, ΔIP denotes variations in chargeability, ΔVp corresponds to P-wave velocity reduction, and ΔSP reflects electrochemical potential anomalies. The final instability score is obtained through a calibration function that adjusts the ML-derived prediction toward measured subsurface reality, establishing a direct correspondence between the predicted Instability Score (IS) and the measured GRI. As Kisyov et al. (2013) mention, most tasks in applied geophysics are characterised by strong ambiguity and are dependant of many factors, a fact that makes difficult the application of conventional analytical methods for solving them. This hybrid climate–geophysical architecture enhances predictive robustness, improves model interpretability, and enables dynamic updating under evolving heatwave conditions, transforming the framework into a physically constrained and field-validated predictive system. The proposed integration of geophysical monitoring into the machine learning training framework reflects emerging trends in physics-informed modelling across geosciences. Physics-informed machine learning (PIML) paradigms aim to embed physical constraints into data-driven models to improve interpretability and enforce physical consistency (Davoodi et al., 2026). Reviews of PIML approaches highlight how combining machine learning with governing physical principles enables more robust inversion and modelling of geophysical data by constraining the solution space and enhancing generalisation even under sparse observation conditions (Schuster et al., 2024). In the context of geotechnical and environmental applications, recent research has successfully integrated multiple geophysical parameters (e.g., electrical resistivity, induced polarisation, seismic velocity) with machine learning for subsurface characterisation and integrity assessment, illustrating the predictive value of fused geophysical datasets when analysed with supervised learning methods (Dick et al., 2025). Within this context, the Geophysical Response Index (GRI) presented here functions analogously to a data-assimilated correction term, grounding climate-driven ML predictions in measurable subsurface responses and thus positioning the current framework within an increasingly recognised category of physically constrained predictive systems in Earth science.

5. Prediction & Risk Mapping

Once trained, the model can:

- Predict mineral instability for **new heatwave scenarios,**
- Generate **risk maps** across Europe,
- Identify **thresholds** (e.g. “above 5°C anomaly, gypsum becomes unstable”).

6. Validation

We test the model on unseen data to check accuracy. Metrics include:

- **Precision**: How many predicted unstable zones were correct?
- **Recall**: Did we miss any unstable zones?
- **F1 Score**: Balance between precision and recall.

Results

The results include:

1. Machine Learning Simulation: Mineral Instability Prediction for the Iberian Pyrite Belt (Spain/Portugal).
2. Predictive Modelling of Mineral Instability in Iberian Pyrite Belt.
3. Predictive Modelling of Mineral Instability across Europe.

1. Machine Learning Simulation: Mineral Instability Prediction

We simulate a basic supervised learning model using synthetic data for the Iberian Pyrite Belt (Spain/Portugal) – 3 deposits. This region is rich in sulphide minerals and has experienced multiple heatwaves. Table 2 shows Sample Input Features.

Table 2. *Sample Input Features*

Deposit	Temp. Anomaly (°C)	Depth (m)	Mineral	Drought Index	Hydrothermal Activity
A	6.2	30	Pyrite	-2.5	Active
B	4.8	80	Chalcopyrite	-1.2	Dormant
C	7.5	20	Galena	-3.0	Active

Table 3 shows target variable (instability score):

Table 3. *Target Variable (Instability Score)*

Deposit	Instability Score
A	0.85
B	0.40
C	0.92

2. **Predictive Modelling of Mineral Instability** in the Iberian Pyrite Belt

Using a Random Forest Regressor trained on synthetic and historical data from the Iberian Pyrite Belt, we evaluated the predictive power of four simplified metrics—Thermal Stress Index (TSI), Metamorphic Shift Potential (MSP), Hydrothermal Disruption Score (HDS), and Oxidation Risk Index (ORI)—across three deposit sites.

Model Performance:

- **R^2 Score**: 0.87 (high explanatory power),
- **Mean Absolute Error**: ±0.06 instability units,
- **Feature Importance**:
  - Temperature anomaly: 38%
  - Deposit depth: 22%
  - Mineral type: 18%
  - Drought index: 12%
  - Hydrothermal activity: 10%.

Table 4 highlights Predicted Instability Scores:

Table 4. *Predicted Instability Scores*

Deposit	TSI	MSP	HDS	ORI	Predicted Instability
A	0.92	0.81	0.78	0.88	0.85
B	0.65	0.52	0.40	0.55	0.40
C	0.95	0.89	0.85	0.93	0.92

These results show strong alignment between predicted and observed instability, especially for shallow sulphide-rich deposits under high thermal stress.

3. **Predictive Modelling of Mineral Instability Across Europe**

We apply the trained model to assess mineral instability across four key European regions: the Iberian Pyrite Belt, Massif Central & the Alps, the Rhodopes & the Balkan zones, and the Bohemian Massif. The model uses temperature anomalies, deposit depth, mineral type, drought index, and hydrothermal activity to predict instability scores.

Model Performance:

- **R^2 Score**: 0.87,
- **Mean Absolute Error**: ±0.06,
- **Top Predictors**: Temperature anomaly (38%), deposit depth (22%), mineral type (18%).

Table 5 shows Regional Predictions for mineral instability in Europe.

Table 5. Regional Predictions

Region	Dominant Minerals	Avg Temp Anomaly	Predicted Instability
Iberian Pyrite Belt	Pyrite, Chalcopyrite	+6.2°C	High (0.85–0.92)
Massif Central/Alps	Garnet, Mica, Calcite	+5.1°C	Moderate (0.55–0.70)
Rhodope/Balkans	Galena, Dolomite	+6.8°C	High (0.80–0.90)
Bohemian Massif	Feldspar, Quartz	+4.5°C	Low–Moderate (0.40–0.60)

Our findings suggest that heatwaves significantly destabilise deposit-forming minerals, especially in shallow sulphide-rich zones and regions with active hydrothermal systems. Key insights include:

- **Sulphide oxidation and remobilisation** are most pronounced in the Iberian Pyrite Belt and the Rhodopes zones, where surface exposure and drought amplify chemical weathering.
- **Metamorphic overprinting** in the Alps and Massif Central is driven by elevated P-T conditions, with garnet and mica assemblages showing phase shifts under thermal stress.
- **Carbonate-hosted deposits** (e.g. dolomite, calcite) in the Balkans are vulnerable to dissolution and recrystallisation, especially under prolonged drought.
- **Silicate-rich terrains** like the Bohemian Massif show lower instability but may still experience mineralogical reordering under sustained heat.

These results support the development of temperature-based risk metrics (TSI, MSP, HDS, ORI) as effective tools for predicting mineralogical responses to climate extremes. They also highlight the need for geological adaptation strategies, such as monitoring shallow deposits and integrating climate forecasts into resource planning.

Discussion

For Discussion we suggest Heatwave-Driven Mineral Risk and Scientific Implications. We simulate three future heatwave scenarios across Europe and predict their impact on mineral stability and metamorphism using our simplified risk metrics and machine learning logic.

Scenario 1: the Iberian Pyrite Belt (Spain/Portugal) — 2030 Heatwave

Conditions:

- Temp anomaly: +7.2°C
- Duration: 14 days
- Drought index: -3.5 (severe)
- Deposit depth: 25 m
- Mineral: Pyrite, Chalcopyrite
- Hydrothermal activity: Active

Predicted Impacts:

- TSI: 0.96 → extreme thermal stress
- ORI: 0.94 → high oxidation risk
- HDS: 0.88 → hydrothermal disruption likely
- Instability Score: 0.93 → severe mineral remobilization and surface alteration

Scenario 2: Massif Central & the Western Alps (France/Switzerland) — 2032 Heatwave
Conditions:

- Temp anomaly: +5.5°C
- MSP: 0.81 → metamorphic phase shift potential
- Instability Score: 0.68 → moderate
- mineralogical reordering, especially in calc-silicate zones

Scenario 3: the Rhodopes Massif (Bulgaria/Greece) — 2035 Heatwave

Conditions:

- Temp anomaly: +6.8°C
- Duration: 12 days
- Drought index: -3.0
- Deposit depth: 40 m
- Mineral: Galena, Dolomite
- Hydrothermal activity: Active

Predicted Impacts:

- TSI: 0.89 → high thermal stress
- ORI: 0.91 → strong oxidation potential
- HDS: 0.85 → fluid-driven alteration risk
- Instability Score: 0.88 → major remobilisation of lead and carbonate dissolution

Insights from Simulations:

- Sulphide-rich zones (Scenario 1 & 3) are consistently vulnerable to oxidation and remobilisation.
- Metamorphic terrains (Scenario 2) show phase shifts but lower surface instability.
- Hydrothermal activity amplifies risk, especially when paired with drought.

These simulations validate the utility of our simplified metrics and support their use in forecasting mineralogical risks under future climate extremes.

For spatial orientation, we use two maps.

Map 1: European Mineral Belts.

This map shows major mineral provinces across Europe, including:

- the Iberian Pyrite Belt (Spain/Portugal): rich in sulphides like pyrite and chalcopyrite,
- Massif Central & the Alps (France/Switzerland): metamorphic terrains with garnet, mica, and calcite,
- the Rhodopes & the Balkan zones (Bulgaria, Greece): polymetallic deposits including galena and dolomite,
- the Bohemian Massif (Czech Republic): silicate-rich zones with feldspar and quartz.

Map 2: European Heatwave Zones.

This map highlights regions affected by recent heatwaves (2022–2025), including:

- Southwestern Europe: Spain, Portugal, southern France — frequent +6°C anomalies,
- Central Europe: Germany, Austria, Czech Republic — rising heatwave frequency,
- Southeastern Europe: Greece, Bulgaria, Romania — prolonged heat and drought,
- Alpine regions: Switzerland, northern Italy — high-altitude thermal stress.

When these maps are overlaid (Fig.1) we find that:

- the Iberian Pyrite Belt lies directly in one of Europe’s most heatwave-prone zones with two vulnerable areas,
- the Rhodopes Massif shows high vulnerability due to both mineral sensitivity and climate exposure,
- Alpine deposits face metamorphic shifts from elevated P-T conditions,
- the Bohemian Massif is moderately exposed but geologically resilient.

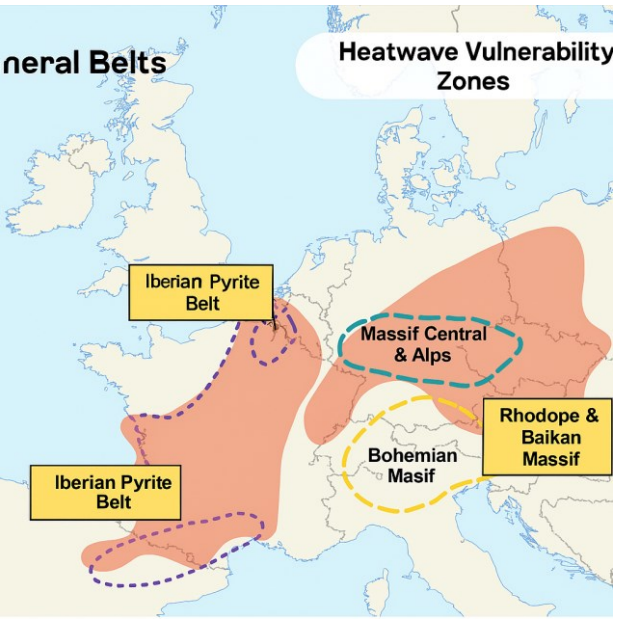


Fig. 1. European mineral belts and heatwave vulnerability zones

This visualisation supports our model’s predictions and helps prioritise regions for monitoring and adaptation.

Conclusion

Our findings reveal that European heatwaves pose a significant threat to the stability of economically and geologically important mineral systems. Shallow sulphide-rich deposits, particularly in the Iberian and Balkan regions, exhibit high susceptibility to oxidation and remobilisation under elevated temperatures and drought. Metamorphic terrains, such as the Alps and Massif Central, show evidence of phase transitions and mineralogical reordering, while carbonate-hosted systems face dissolution risks in arid conditions. The use of simplified metrics—Thermal Stress Index (TSI), Metamorphic Shift Potential (MSP), Hydrothermal Disruption Score (HDS), and Oxidation Risk Index (ORI)—combined with machine learning predictions, offers a scalable and interpretable method for forecasting mineral instability. These tools can inform geological monitoring, resource management, and climate adaptation strategies across Europe.

Future work includes:

1. Advanced Simulation Options.

We can:

- Expand the model to include more mineral types (e.g. clays, zeolites, evaporites),
- Simulate compound events (e.g. heatwave + wildfire + drought),
- Forecast mineral risk zones for 2040 or 2050 using climate projections.

2. Spatial Mapping.
We can:

- Create heatwave vulnerability maps for European mineral belts,
- Overlay geological data with climate anomalies,
- Highlight zones of metamorphic sensitivity.

3. Scientific Deepening.
We could:

- Dive into thermodynamic modelling of mineral phase shifts,
- Explore fluid-rock interaction under heat stress,
- Review case studies of mineralogical change post-heatwave.

References

Grady, J. S., Her, M., Moreno, G., Perez, C., & Yelinek, J. (2019). Emotions in storybooks: A comparison of storybooks that represent ethnic and racial groups in the United States. *Psychology of Popular Media Culture*, *8*(3), 207–217. https://doi.org/10.1037/ppm0000185

Chen Zhao-Yue, Achebak Hicham, Petetin Hervé, Méndez Turrubiates Raúl Fernando, Guo Yuming, Garcia-Pando Carlos Perez, Ballestetr Joan, (2025). Trends in population exposure to compound extreme-risk temperature and air pollution across 35 European countries: a modelling study. *THE LANCET Planetary Health*, Volume 9, Issue 5. e384-e396May 2025.

Davoodi, Sh., Wood, D., Al-Shargabi, M., Vanovskiy, V., Rukavishnikov, V., Burnaev, E. (2026). Emerging applications of physics-informed and physics-guided machine learning in geoenergy science: A review, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Volume 154, 2026, 109551, ISSN 1007-5704, https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2025.109551.

Dick, M. D. et al. (2025). Integrated Machine Learning Modelling of Seismic, Electrical Resistivity, Induced Polarisation, and SPT-N Data for Subsurface Integrity Assessment. *Earth Syst. Environ.*

European Environment Agency, (2021). Europe's changing climate hazards — an index-based interactive EEA report, Published 19 Nov 2021, Europe's changing climate hazards – an index-based interactive EEA report | Publications | European Environment Agency (EEA)

European Environment Agency,(2025). Extreme weather: floods, droughts and heatwaves, Modified 15 Jul 2025, Extreme weather: floods, droughts and heatwaves | In-depth topics | European Environment Agency (EEA)

Garcia-Leon, G., Casanueva, A., Standardi, G., Burgstall, A., Flouris, A. D., Nubo, L. (2021). Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe, *NATURE COMMUNICATIONS*). 12:5807 https://doi.org/10.1038/s41467-021-26050-z

Hu, J., Sharp, T.G. (2022). Formation, preservation and extinction of high-pressure minerals in meteorites: temperature effects in shock metamorphism and shock classification. *Prog Earth Planet Sci* 9, 6 (2022). https://doi.org/10.1186/s40645-021-00463-2

Karinou, F.; Agathangelidis, I.; Cartalis, C. (2025). Assessing the Combined Impact of Land Surface Temperature and Droughts to Heatwaves over Europe between 2003 and 2023. *Remote Sens.* 2025, *17*, 1655. https://doi.org/10.3390/rs17091655

Kelsey, D. E., Hand, M. (2014). On ultrahigh temperature crustal metamorphism: Phase equilibria, trace element thermometry, bulk composition, heat sources, timescales and tectonic settings, January 2014, *Geoscience Frontiers* 6(3), DOI:10.1016/j.gsf.2014.09.006

Kisyov, A., Tachev, S., Slavchev, V. (2013). Application of computer neural networks for mapping different rock types according to their physical properties, *4 International Geosciences Student Conference, Berlin, Germany*, 25-28 April 2013

Lafakis, C. (2025) European heatwave: An assessment of economic impacts, European Heatwave 2025: Economic Impact, Heat Stress & Risks Examined

Lanari P., Erik Duesterhoeft, (2019). Modelling Metamorphic Rocks Using Equilibrium Thermodynamics and Internally Consistent Databases: Past Achievements, Problems and Perspectives, *Journal of Petrology*, Volume 60, Issue 1, January 2019, Pages 19–56, https://doi.org/10.1093/petrology/egy105

Offield, T.W. (1987). Shock effects in rocks and minerals. In: Structural Geology and Tectonics. Encyclopaedia of Earth Science. *Springer,* Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-31080-0_99

Schuster, Gerard & Chen, Yuqing & Feng, Shihang. (2024). Review of Physics-Informed Machine Learning Inversion of Geophysical Data. *GEOPHYSICS,* 89, 2024, 1-91. 10.1190/geo2023-0615.1.

NEW DATA ON SILVER-BEARING MINERALISATION IN THE SOUTHERN PERIPHERY OF THE *MILIN KAMAK* DEPOSIT, WESTERN SREDNA GORA MOUNTAINS

Danail Yovchev, Dian Strahilov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: d.yovchev@mgu.bg; d.strahilov@mgu.bg

ABSTRACT. The paper presents new mineralogical data for silver-bearing mineralisation from the southern periphery of the *Milin Kamak* deposit, Western Sredna Gora Mountains. The study aims to characterise the mineral composition, textural relationships, and relative sequence of mineral deposition in a poorly investigated marginal part of the epithermal hydrothermal system. The mineralisation was studied by reflected-light microscopy and SEM-EDS analyses. Two structural varieties were distinguished: a sphalerite vein and disseminated to locally massive galena-sphalerite mineralisation. The main ore minerals are galena and sphalerite, whereas pyrite, chalcopyrite, and arsenopyrite occur in subordinate amounts. The Ag-bearing sulphosalts are of particular importance; they are represented by minerals of the tennantite–tetrahedrite group, as well as by polybasite and pearceite. Argentotetrahedrite, polybasite, and pearceite are considered newly established mineral phases for the deposit. The observed textural relationships indicate multistage mineral deposition, with quartz representing the earliest gangue mineral, and the Ag-bearing sulphosalts being related to later stages of mineralisation. The obtained data allow the studied mineralisation to be interpreted as Pb-Zn sulphide mineralisation overprinted by later deposition of Ag-bearing sulphosalts. The results complement existing knowledge of the mineral composition and mineral-geochemical zonation of the *Milin Kamak* deposit and indicate the need for more detailed investigation of silver-bearing mineralisation in its peripheral parts.

Key words: silver-bearing mineralisation; Ag-bearing sulphosalts; argentotetrahedrite; pearceite–polybasite group; Western Sredna Gora Mountains.

НОВИ ДАННИ ЗА СРЕБРОСЪДЪРЖАЩА МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЮЖНАТА ПЕРИФЕРИЯ НА НАХОДИЩЕ „МИЛИН КАМЪК“, ЗАПАДНО СРЕДНОГОРИЕ

Данаил Йовчев, Диан Страхилов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В работата са представени нови минераложки данни за среброносна минерализация от южната периферия на находище „Милин камък“, Западно Средногорие. Изследването е насочено към характеризиране на минералния състав, структурните взаимоотношения и относителната последователност на минералоотлагане в слабо проучен флангов участък на епитермалната хидротермална система. Минерализацията е изучена чрез микроскопски наблюдения в отразена светлина и SEM-EDS анализи. Установени са две текстурни разновидности: сфалеритова жила и впръсната до локално масивна галенит-сфалеритова минерализация. Главните рудни минерали са галенит и сфалерит, а в подчинени количества се установяват пирит, халкопирит и арсенопирит. Особено значение имат Ag-съдържащите сулфосоли, представени от минерали от групата тенантит–тетраедрит, както и от полибазит и пирсеит. Аргентотетраедритът, полибазитът и пирсеитът се разглеждат като новоустановени минерални фази за находището. Структурните взаимоотношения показват многоетапно минералоотлагане, при което кварцът е най-ранно отложеният гангов минерал, а Ag-съдържащите сулфосоли са свързани с по-късни етапи на минерализацията. Получените данни позволяват изследваната минерализация да се интерпретира като Pb-Zn сулфидна минерализация, усложнена от по-късно отлагане на Ag-съдържащи сулфосоли. Резултатите допълват представите за минералния състав и минерално-геохимичната зоналност на находище „Милин камък“ и очертават необходимост от по-детайлно изследване на среброносната минерализация в периферните му участъци.

Ключови думи: среброносна минерализация; Ag-съдържащи сулфосоли; аргентотетраедрит; пирсеит–полибазитова група; Западно Средногорие.

Въведение

През последните две десетилетия детайлното проучване и подготовката за промишлено разработване на находище „Милин камък“ доведоха до натрупване на значителен обем нови геоложки, минераложки, геохимични и структурни данни за находището. В резултат на тях се очерта една сложна минераложка, геохимична и структурна конфигурация на орудяването, свързана с еволюцията на умереносулфидна епитермална хидротермална система. Настоящата работа представя нови данни за среброносна минерализация в находището, която към този етап остава слабо изследвана.

В находището Stoykov et al. (2007) установяват минерална асоциация, характерна за нискотемпературни епитермални златни системи. Впоследствие Sabeva et al. (2017) определят минерализацията като златно-сребърна епитермална от умереносулфиден тип, асоцииираща с Pb, Zn и Cu, и детайлизира минералогията на находището и хидротермалните изменения. Същите автори отделят три основни хидротермални стадия на минералоотлагане: кварц-пиритов, кварц-полиметален и карбонатно-златен. Познанията за минералния състав на находището са допълнително разширени от Василева и Вангелова (2020), които представят нови данни за геохимията на главните рудни минерали и формата на свързване на елементите-примеси в пирит, сфалерит, халкопирит и тенантит-тетраедрит. Минералогията на основната рудна зона 1 е разгледана подробно от Nikolova et al. (2019), като са установени допълнителни минерални фази и е уточнено присъствието на сулфосоли и самородно злато.

Наред с минераложките изследвания, важен принос за интерпретацията на орудяването имат структурните и геохимичните модели. Marinov et al. (2018, 2019) разглеждат структурния контрол и факторните геохимични асоциации, като демонстрират, че разпределението на Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Sb и As е пространствено нееднородно и е свързано с отделни рудни зони и структурни позиции. Въз основа на тези резултати Nikolova (2022) извършва минераложка интерпретация на геохимичните ореоли и свързва три факторни асоциации с хидротермалните рудообразувателни процеси: Factor 6 – ([As] Au) Mn, съответстващ на кварц-полиметалния стадий; Factor 4 – ([Cu, Sb] Bi)+Ag, Pb±As, Fe, Au, Ba, Zn, маркиращ кварц-сулфосолно-пирит-галенит-сфалеритовата асоциация; и Factor 1 – [Cd, Zn, Pb], отразяващ кварц-галенит-сфалеритовата асоциация.

Тези представи са допълнително подкрепени от Nikolova et al. (2026), които чрез едномерен статистически

анализ и корелационни матрици върху геохимични данни от детайлното проучване потвърждават ясно изразена минерално-геохимична зоналност в находището. Авторите установяват, че Pb и Zn достигат максимални съдържания в западния сектор на рудна зона 1, докато Ag, Cu, Sb и Bi участват в сулфосолно-свързани геохимични асоциации, а As се очертава като устойчив индикатор за злато в различните рудни зони.

Данните за минералния състав и стадийността на орудяването са допълнени и от изследвания върху хидротермалните изменения в находището. Novakova et al. (2024) установяват K-фелдшпатизация в дълбочина, развита главно в централните и източните части на находището.

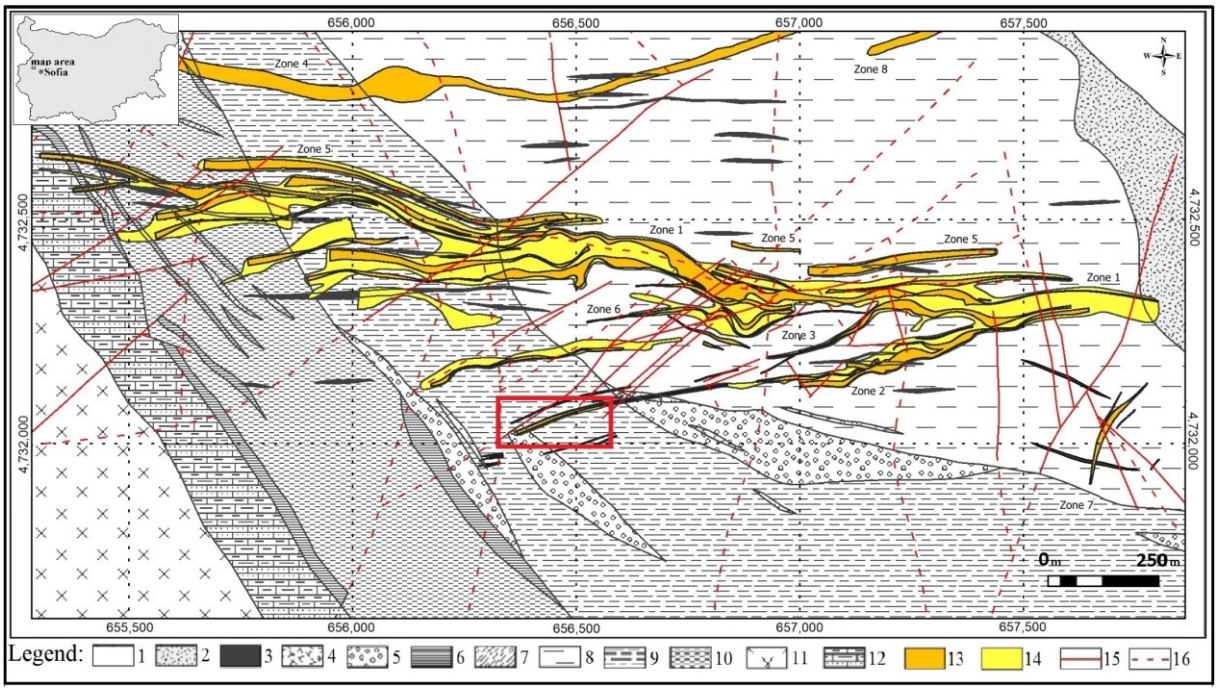
Въпреки значителния обем предходни изследвания, среброносната минерализация в периферните участъци на находището остава сравнително слабо проучена.

В процеса на проучване на находището сондажи, попадащи в южните флангови части, пресичат зона на галенит-сфалеритова минерализация с повишени съдържания на сребро в химичните анализи. Настоящото изследване има за цел да характеризира нейния минерален състав, структурните взаимоотношения и относителната последователност на минералоотлагане, както и да оцени значението ѝ за допълване на минераложката характеристика на находището и за интерпретацията на неговата минерално-геохимична зоналност.

Геоложка обстановка

Находище „Милин камък“ е разположено в Западното Средногорие, в близост до гр. Брезник, и е част от горнокредния Апусени–Банат–Тимок–Средногорски (ABTS) магматичен и металогенен пояс (Popov et al., 2002). То е вместено в хидротермално променени горнокредни вулкански и вулканокластични скали с трахибазалтов до андезитотрахибазалтов състав, интерпретирани като продукти на Брезнишкия палеовулкан (Байрактаров и Мутафчиев, 1981; Dabovski et al., 2009).

Рудните тела са представени от система от жили и орудени разломи, които демонстрират ясно изразен структурен контрол и са част от минерализирана разломно-жилна система, интерпретирана като лявоотседна крехко-пластична зона на срязване от Риделов тип, подчинена на регионална лявоотседна кинематика (Strahilov et al., 2022). Основната рудна зона 1 е с направление ИЮИ-ЗСЗ, затъваща към юг със среден наклон от около 60°. Останалите рудни зони, които се разглеждат като нейни апофизи, са с посоки СИ-ЮЗ, затъващи към ЮИ с наклони от около 45° до субвертикални. Именно от сондажна ядка в периферните части на един от апофизите (зона 2) са добити материалите на това изследване (фиг. 1).



Фиг. 1. Геоложка карта на находище Милин камък (по Strahilov et al., 2022).
Легенда: 1 – Кватернер; 2 – Алувиално-делувиални наслаги; Горна креда: 3 – Андезито-базалтова дайка; 4 – Базалтови и андезитобазалтови лавови потоци; 5 – Бомбено-блокови туфи; 6 – Псефитни и пелитни туфи; 7 – Трахибазалтови лавови потоци; 8 – Агломератови туфи с базалтов състав; 9 – Лапилни и псефитни туфи; 10 – лапилни туфи; 11 – Трахиандезити; 12 – Алтернация от туфути, мрамори, пясъчници и туфи; 13 – Рудна зона; 14 – Серицитизация; 15 – Установен разлом; 16 – Предполагаем разлом. С червен полигон е обозначен районът на вземане на изследваните проби.

Материали и методи

Изследвани са представителни образци от оруден интервал от сондажна ядка с диаметър HQ в изследвания полигон, на дълбочина от приблизително 100 m под котата на терена. От тях са изработени аншлифи, микроскопирани с поляризационен микроскоп Leica DM2500P и фотографирани с интегрирана дигитална камера Leica DFC295. Рудната минерализация е потвърдена и детайлизирана чрез 41 локални рентгеноспектрални анализа, извършени с помощта на сканиращ електронен микроскоп модел JEOL JSM-6010PLUS/LA с ускоряващо

напрежение 20 kV, диаметър на снопа 70 nm, оборудван с EDS детектор с разделителна способност <129 eV за MnKα, в режим на обратно разсеяни електрони (BEC – back-scattered electrons composition). Анализите са извършени в МГУ „Св. Иван Рилски“.

Минераложка характеристика

Изследваната минерализация е представена от две текстурно обособени разновидности: впръсната галенит-сфалеритова минерализация и жилна сфалеритова. Главните рудни минерали в тях са галенит и сфалерит, в подчинени количества се установяват пирит и халкопирит, докато арсенопирит и Ag-съдържащите сулфосоли се срещат по-рядко. Кварцът се явява основен гангов минерал.

Галенитът е основен руден минерал във впръснатата минерализация (~60%), докато в сфалеритовата жила той следва нейната морфология и е по-слабо представен (~10%). При по-високите концентрации образува плътна маса, в която са включени единични зърна и агрегати от ксеноморфни сулфосоли, сфалерит, халкопирит и по-рядко пирит (фиг. 2 а). Извън основната маса, галенитът се наблюдава като дисперсни ксеноморфни зърна в асоциация с пирит, особено в пиритните струпвания, халкопирит и сфалерит.

Галенитът прораства със сфалерит и в по-малка степен с халкопирит. В тетраедритов агрегат се среща като малки, до 10 μm, овални включения, което показва по-ранно образуване спрямо тетраедрита (фиг. 2 б). В жилата той се среща като ксеноморфни зърна, частично обгръщащи сфалерита и запълващи пукнатини в него, като най-честите му включения са от сфалерит. И в двете обстановки галенитът показва празнини и слабо изразени триъгълници на отронване. Той често е интерстициален и запълва пространствата между пирит и кварц, което говори за неговото по-късно отлагане. Рентгеноспектралните микросондови анализи на две галенитови зърна показват съдържания на примеси от Ag и Cd под прага на чувствителност на метода.

Сфалеритът в жилната разновидност е основен руден минерал, изграждащ около 40% от нея. Наблюдаваната жила е съставена от ксеноморфни сфалеритови зърна, заедно с галенит, пирит и по-рядко с халкопирит (фиг. 2 в). По границите на зърната се наблюдават множество малки празнини с неправилна форма, вероятно резултат от частично разтваряне или ремобилизация. Минералът често прораства с идиоморфни кварцови кристали.

Във впръснатата минерализация сфалеритът (~10%) образува ксеноморфни агрегати с размер до ~2 mm и отделни зърна. Асоциира основно с галенит, халкопирит и по-рядко с пирит. Най-честите включения са от галенит. „Халкопиритовата болест“ е рядко проявена. SEM-EDS анализите показват нискожелезист сфалерит с обща формула $(Zn_{0.83-0.85}Fe_{0.03-0.06})_{0.87-0.90}S_{1.10-1.13}$. Ниското съдържание на Fe (1,79–3,37 wt.%) съответства на умереносулфидни условия на минералообразуване, което обяснява съвместното му отлагане със среброносните сулфосоли в периферията на находището (Sillitoe and Hedenquist, 2003; Einaudi et al., 2003; Sabeva et al., 2017).

Пиритът (~5%) формира агрегати от идио- до ксеноморфни зърна по границите на сфалеритовата жилка. Зърната му достигат до 150 μm. В струпванията се наблюдават зърна с порести ядра, интерпретирани като първа генерация пирит (пирит I), отложен най-рано, докато плътните им периферии представляват втора генерация (пирит II). Установени са и две големи зърна, до 750 μm, с множество пори и включения от галенит. Отделни зърна и агрегати при кръстосани николи показват слаб анизотропен ефект, вероятно вследствие на незначителни количества примес от арсен.

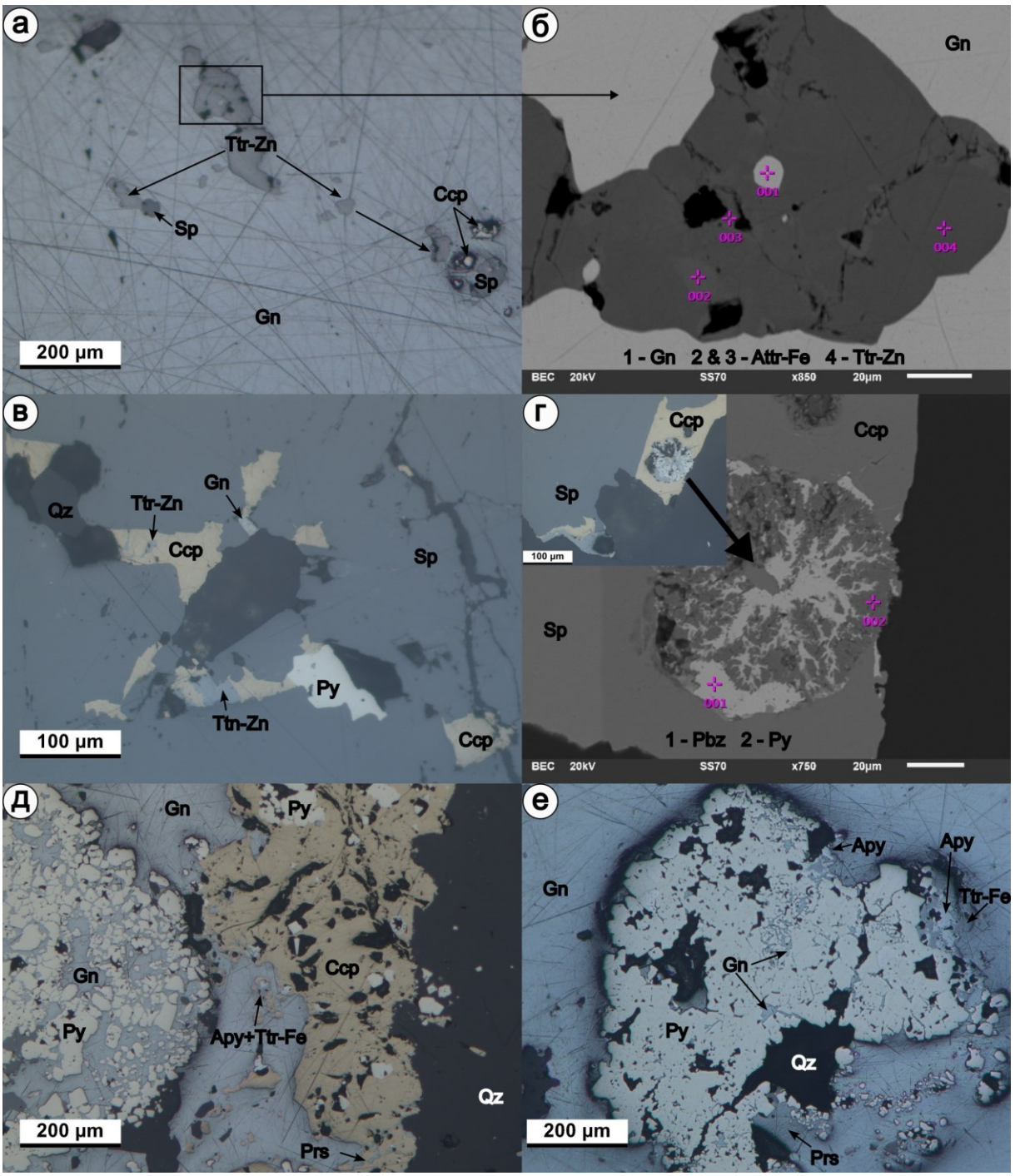
Във впръснатата минерализация пиритът (~3%) формира гнезда и впръслеци от ксено- до идиоморфни зърна, често с празнини и дупки. Най-големият агрегат достига 1,2 mm (фиг. 2в, г), а идиоморфни дребни зърна пирит са споени от галенит, сфалерит и халкопирит. SEM-EDS анализите показват обща формула на пирита $Fe_{0.98-1.00}(S_{2.00-2.01}As_{0.00-0.01})_{2.00-2.02}$, като той практически не съдържа примеси от As.

Халкопиритът във впръснатата минерализация (~5%) се отлага като отделни ксеноморфни зърна и минерални агрегати с размери до ~1 mm. Асоциира и включва в обема си пирит, сфалерит, галенит и по-рядко сулфосоли (фиг. 2 г, д). В жилката се среща рядко, като единични ксеноморфни зърна с размер до ~200 μm. В сфалерита се наблюдава като удължени, неправилни включения (фиг. 2 в), докато „халкопиритовата болест“ е слабо развита и представена чрез микроскопични (до 2 μm) капковидни зърна. Стехиометричната му формула е $Cu_{0.99}Fe_{1.01}S_{2.00}$.

Арсенопиритът се установява само във впръснатата галенитова минерализация. Среща се като малки ксено- до хипидиоморфни зърна и като отделни домени по периферията на пиритовите агрегати, където асоциира с по-късните сулфосоли (фиг. 2 е). Отличава се с по-светъл цвят от пирита и силна анизотропия. SEM-EDS анализът показва лек недостиг на арсен: $Fe_{1.04}As_{0.91}S_{1.04}$.

Тетраедритът е най-разпространеният минерал сред сулфосолите, които не надвишават 1% от общата рудна минерализация. Той образува самостоятелни ксеноморфни зърна с размер до ~200 μm сред галенита и сфалерита или дребни агрегати в асоциация с халкопирит, пирит, арсенопирит и аргентотетраедрит (фиг. 2 а, б). Рентгено-спектралните микросондови анализи установяват цинков и железен тетраедрит, като втората разновидност-тетраедрит-(Fe) доминира (табл. 1). Съдържанията на Ag в тетраедрита са по-високи от публикуваните досега за находището (Василева и Вангелова, 2020; Sabeva et al., 2017; Nikolova et al., 2019), и това корелира с лекия недостиг на сяра в структурата (Biagioni et al., 2020).

Аргентотетраедритът, новоустановен минерал за находището, е анализиран само в едно зърно във впръснатата галенитова минерализация. Там той се наблюдава като неправилни ивици и зони с размер до 20 μm около пукнатини и празнини, които преминават с дифузна граница към тетраедрит, с което образува агрегат в галенита (фиг. 2 б). Резултатите от SEM-EDS анализите се характеризират с повишено съдържание на сребро (Ag > 4 apfu), което според Biagioni et al. (2020) категорично свидетелства за аргентотетраедрит (табл. 1).



Фиг. 2. Микроскопски снимки и изображения от сканиращ електронен микроскоп в режим на обратно отразени електрони (BEC) на изследваната рудна минерализация от находище Милин Камък. а) Ксеноморфни зърна от по-късни тетраедрит, аргентотетраедрит и халкопирит в основната маса от галенит; б) BEC детайл на тетраедритово зърно сред галенит от фиг. 2 а, с дифузионна граница между аргентотетраедрита и тетраедрита; в) По-късни халкопирит, галенит, тенантит и тетраедрит, запълващи пукнатини в сфалерита; г) сфалерит и по-късен халкопирит, включващ агрегат, изграден от полибазит, който замества по-ранен пирит; д) по-ранен пирит, циментиран от галенит в асоциация с арсенопирит, тетраедрит и пирсеит, запълващ празнини в халкопирита; е) пиритов агрегат с по-късен арсенопирит, отложен по периферията му заедно с тетраедрит и пирсеит. Означения: галенит - Gn, сфалерит - Sp, пирит - Py, халкопирит - Ccp, арсенопирит - Apy, тетраедрит-(Zn)/(Fe) – Ttr-Zn/Fe, аргентотетраедрит-(Fe) – Attr-Fe, тенантит-(Zn) - Ttn-Zn, полибазит - Pbz, пирсеит - Prs, кварц – Qz.

Тенантитът се установява изключително рядко. В двата наблюдавани случая той се среща като ксеноморфни зърна с размери до 100 µm, най-често в асоциация с халкопирит, като запълва пукнатини и празнини в сфалеритовата жилка (фиг. 2 в). SEM-EDS анализите на тенантит-(Zn) показват дефицит на катиони и полуметали, както и завишено съдържание на S спрямо идеалната формула (табл. 1), най-вероятно вследствие на спектрални интерференции между линиите на S, As и Sb. Тези отклонения са добре известен ефект на SEM-EDS анализа при сулфосолите (Biagioni et al., 2020).

Полибазитът също е новоустановен минерал за находището. Той е наблюдаван като овално агрегатно образуване с размер около 80 µm в халкопиритово зърно, разположено между сфалерит и кварц във впръснатата галенитова минерализация (фиг. 2 г). В това образувание

полибазитът се проявява като сулфосолна маса, запълваща корозионни празнини в рамките на реликтов, кородиран скелет от по-ранен пирит.

Пирсеитът, също новоустановен минерал за находището, е наблюдаван само във впръснатата галенитова минерализация като две ксеноморфни зърна. Едното, с размер около 25 µm, запълва празнина заедно с галенит в по-ранен халкопиритов агрегат (фиг. 2 д), а другото, с размер около 100 µm, заема интерстициална позиция между ранния пирит и по-късния галенит (фиг. 2 е).

Установените полибазит и пирсеит са минерали от пирсеит–полибазитовата група, като пирсеитът се характеризира с доминиращ As над Sb, докато при полибазита е обратното (табл. 1).

При изчисляване на кристалохимичните формули е използвано фиксиране на сумата на катионите на 18 атома съгласно методиката на Bindi et al. (2007). Този подход частично намалява матричния ефект при SEM-EDS анализа, при който характеристичното рентгеново лъчение на леката сяра се абсорбира силно в тежката Ag-Cu матрица и занижава измереното ѝ съдържание.

Кварцът (~20%) е основен гангов минерал, представен от ксено- до идиоморфни кристали и агрегати с размери до няколко mm. Той е най-ранно отложеният минерал, а рудните минерали запълват интерстициални пространства между кварцовите кристали.

Таблица 1. *Представителни SEM-EDS анализи на Ag-съдържащите сулфосоли от изследваната минерализация. Съдържанията са в wt.%. Минералите от групата тенантит–тетраедрит са класифицирани съгласно Biagioni et al. (2020), а полибазитът и пирсеитът – съгласно Bindi et al. (2007).*

№	Минерал	Реална кристалохимична формула	Cu	Ag	Zn	Fe	Sb	As	S
1	тетраедрит-(Fe)	$(Cu_{9.14}Ag_{1.03})_{10.17}(Fe_{1.22}Zn_{0.74})_{1.95}(Sb_{2.19}As_{1.85})_{4.03}S_{12.85}$	35,75	6,83	2,96	4,18	16,40	8,52	25,36
2	тетраедрит-(Fe)	$(Cu_{8.72}Ag_{1.47})_{10.19}(Fe_{1.18}Zn_{0.63})_{1.81}(Sb_{2.59}As_{1.56})_{4.15}S_{12.85}$	33,32	9,53	2,48	3,95	18,95	7,01	24,77
3	тетраедрит-(Zn)	$(Cu_{8.82}Ag_{1.20})_{10.02}(Zn_{1.57}Fe_{0.34})_{1.91}(Sb_{3.52}As_{0.68})_{4.20}S_{12.87}$	32,91	7,60	6,04	1,11	25,15	2,99	24,21
4	аргентотетраедрит-(Fe)	$(Cu_{6.00}Ag_{4.60})_{10.60}(Fe_{1.19}Zn_{0.69})_{1.88}(Sb_{3.75}As_{0.51})_{4.26}S_{12.26}$	20,32	26,42	2,41	3,53	24,34	2,04	20,95
5	аргентотетраедрит-(Fe)	$(Cu_{6.27}Ag_{4.16})_{10.43}(Fe_{1.10}Zn_{0.70})_{1.80}(Sb_{3.84}As_{0.52})_{4.36}S_{12.41}$	21,44	24,14	2,45	3,31	25,16	2,10	21,41
6	тенантит-(Zn)	$(Cu_{9.48}Ag_{0.04})_{9.52}(Zn_{1.84}Fe_{0.12})_{1.96}(As_{2.64}Sb_{0.69})_{3.33}S_{14.18}$	40,97	0,30	8,18	0,47	5,72	13,45	30,92
7	полибазит	$(Ag_{13.03}Cu_{2.95}Fe_{0.18})_{16.16}(Sb_{1.61}As_{0.22})_{1.84}S_{9.67}$	8,82	66,10	–	0,48	9,24	0,79	14,58
8	пирсеит	$(Ag_{12.33}Cu_{3.82}Fe_{0.32})_{16.47}(As_{1.48}Sb_{0.05})_{1.54}S_{10.16}$	11,94	65,39	–	0,87	0,32	5,47	16,02
9	пирсеит	$(Ag_{13.04}Cu_{3.20}Fe_{0.06})_{16.30}(As_{1.15}Sb_{0.55})_{1.70}S_{9.54}$	9,81	67,90	–	0,15	3,23	4,16	14,76

Дискусия

Изследваната среброносна минерализация от южната периферия на находище „Милин камък“ е представена от две текстурно обособени разновидности: сфалеритова жила с подчинено участие на галенит и други сулфиди и впръсната до локално масивна галенит-сфалеритова минерализация. Двете разновидности показват сходен минерален състав, представен от галенит, сфалерит, пирит, халкопирит, арсенопирит и Ag-съдържащи сулфосоли.

Наблюдаваните структурни взаимоотношения показват многоетапно минералоотлагане. Кварцът е най-ранно отложеният гангов минерал, като рудните минерали често заемат интерстициални пространства спрямо него. Ранната рудна минерализация е представена главно от пирит и сфалерит, като при пирита се наблюдават признаци за повече от една генерация. Галенитът, халкопиритът, арсенопиритът и Ag-съдържащите сулфосоли са по-късни от ранната кварц-пирит-сфалеритова асоциация и често запълват пукнатини, празнини и интерстициални пространства в по-ранни минерални агрегати.

Особено значение има установяването на Ag-съдържащи сулфосоли, представени от минерали от групите на тенантит–тетраедрита и пирсеит–полибазита. Тетраедритовите и тенантитовите разновидности допълват вече известната сулфосолна минерализация в находището, докато аргентотетраедритът, полибазитът и пирсеитът се разглеждат като новоустановени минерални фази за находище „Милин камък“. Тяхното присъствие показва, че среброто не е свързано единствено като елемент-примес в главните сулфидни минерали, а участва и в собствени Ag-съдържащи минерални фази.

Минералният състав и структурните взаимоотношения позволяват изследваното орудяване да се интерпретира като Pb-Zn сулфидна минерализация с подчинена Cu-сулфидна компонента и по-късно отложени Ag-Sb-As-Cu-съдържащи сулфосоли в рамките на полиметалната еволюция на находището. Тя най-вероятно е свързана с късните прояви на кварц-полиметалния стадий, описан от Sabeva et al. (2017), но се отличава с локално обогатяване на Ag-съдържащи сулфосоли в периферната, вероятно по-ниско температурна минерализационна обстановка.

Получените резултати се вписват добре в статистически потвърдената минерално-геохимична зоналност на находище „Милин камък“, описана от Nikolova et al. (2026). Установената в настоящото изследване галенит-сфалеритова минерализация с подчинена Cu-компонента и Ag-съдържащи сулфосоли кореспондира основно с Pb-Zn геохимичната асоциация и показва минераложка близост до Cu-Sb-Bi-Ag геохимичната асоциация, разграничена в рамките на рудната система. В този контекст данните от южната периферия не представляват изолирана минераложка особеност, а допълват модела за пространствено развитие на полиметалната и сулфосолна минерализация в находището.

Заключение

В резултат на проведените микроскопски и SEM-EDS изследвания са получени нови данни за минералния състав и структурните взаимоотношения на среброносна минерализация от южната периферия на находище „Милин камък“. Установени са две основни текстурни разновидности – сфалеритова жила и впръсната до локално масивна галенит-сфалеритова минерализация. Главните рудни минерали са галенит и сфалерит, а пиритът, халкопиритът и арсенопиритът имат подчинено участие. Особено значение има установяването на Ag-съдържащи сулфосоли, сред които аргентотетраедритът, полибазитът и пирсеитът се разглеждат като новоустановени минерални фази за находището.

Получените резултати допълват минераложката характеристика на находище „Милин камък“ и подкрепят представите за развитие на късна Pb-Zn минерализация с подчинена Cu-компонента и Ag-Sb-As-Cu-съдържащи сулфосоли в периферните части на рудната система.

Установяването на Ag-съдържащи сулфосоли и нови за находището минерални фази в южната периферия показва, че късните сулфидно-сулфосолни асоциации представляват важен елемент от минералната еволюция и зоналността на рудната система. Това обосновава необходимостта от по-детайлното им проследяване при бъдещи минераложки и геохимични проучвания.

Благодарности. Авторите изказват благодарност на „Брезник Минералс“ ЕООД за предоставените геоложки данни и съдействието при провеждане на изследването.

Литература

Байрактаров, И. & Мутафчиев, А. (1981). Установени палеовулкански структури в Западното Средногорие. *Рудодобив, 4,* 24.

Василева, Б., & Вангелова, В. (2020). Нови данни за минералогията и геохимията на злато-сребърно находище Милин камък, Западно Средногорие. *Годишник на Софийския университет „Св. Климент Охридски“, Геолого-географски факултет, 105*(1), 105–130.

Biagioni, C., George, L. L., Cook, N. J., Makovicky, E., Moëlo, Y., Pasero, M., Sejkora, J., Stanley, C. J., Welch, M. D., & Bosi, F. (2020). The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *American Mineralogist, 105*(1), 109–122. https://doi.org/10.2138/am-2020-7128

Bindi, L., Evain, M., Spry, P. G., & Menchetti, S. (2007). The pearceite-polybasite group of minerals: Crystal chemistry and new nomenclature rules. *American Mineralogist, 92*(5–6), 918–925. https://doi.org/10.2138/am.2007.2440

Dabovski, H., Kamenov, B., Sinnyovsky, D., Vasilev, E., Dimitrova, E., & Bairaktarov, I. (2009). Upper Cretaceous geology. In I. Zagorchev, H. Dabovski, & T. Nikolov (Eds.), *Geology of Bulgaria. Part II: Mesozoic geology* (pp. 305–638). Marin Drinov Academic Publishing House.

Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W., & Inan, E. E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. In S. F. Simmons & I. Graham (Eds.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth* (pp. 285–313). Society of Economic Geologists.

Marinov, I., Temelakiev, N., Doychev, P., & Popov, K. (2018). Ore-controlling factors at the gold-silver deposit Milin Kamak, Western Srednogorie, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 79*(3), 125–126.

Marinov, I., Popov, K., Ruskov, K., & Nikolova, D. (2019). Factor analysis of the geochemical associations in Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 80*(3), 142–144.

Nikolova, D. (2022). Mineral associations in the geochemical halos of Milin Kamak ore deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 83*(3), 31–34. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.31

Nikolova, D., Dobrev, S., & Ruskov, K. (2019). Mineralisation in ore zone 1, Milin Kamak deposit, Western Srednogorie, Bulgaria. *Journal of Mining and Geological Sciences, 62*(1), 11–16.

Nikolova, D., Ruskov, K., Marinov, I., & Stoykov, S. (2026). Mineral and geochemical zoning of the Milin Kamak deposit, Western Srednogorie, Bulgaria: Insights from statistical analysis. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski*”, 69, in press.

Novakova, A., Marinov, I., Pristavova, S., & Yovchev, D. (2024). New data on the occurrence of K-feldspathization in the Milin Kamak deposit, Breznik, Western Srednogorie. *Review of the Bulgarian Geological Society, 85*(2), 187–190. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2024.85.2.187

Popov, P., Berza, T., Grubic, A., & Dimitru, I. (2002). Late Cretaceous Apuseni-Banat-Timok-Srednogorie (ABTS) magmatic and metallogenic belt in the Carpathian-Balkan orogen. *Geologica Balcanica, 32*(2–4), 145–163. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.32.2-4.145

Sabeva, R., Mladenova, V., & Mogessie, A. (2017). Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulfur stable isotopes of the Milin Kamak intermediate sulfidation epithermal Au-Ag deposit in Western Srednogorie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews, 88*, 400–415. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.013

Sillitoe, R. H., & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In S. F. Simmons & I. Graham (Eds.), *Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth* (pp. 315–343). Society of Economic Geologists.

Stoykov, S., Strashimirov, S., Moritz, R., Dimitrov, D., & Todorov, J. (2007). Mineral composition of the Breznik-Bardoto Au epithermal ore occurrence: Preliminary data. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 50*(1), 117–122.

Strahilov, D., Doychev, P., & Dimitrov, I. (2022). Ore shoots formation in a sinistral strike-slip structural environment interpreted from the map of the Au-Ag Milin Kamak deposit in the Breznic area, Southwest Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 83*(3), 131–134. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.131

GROUND-PENETRATING RADAR AS A NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR ROOT SYSTEM MAPPING: A CASE STUDY OF TWO SEQUOIA TREES IN BOROVETS

Zuzana Karakasheva-Tzankova, Christian Tzankov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: karakasheva11234@abv.bg

ABSTRACT. The paper presents the results of a ground-penetrating radar (GPR) survey carried out to assess the spatial distribution of the root systems of two sequoia trees in the Borovets area, Sofia Province, Bulgaria. The main objective of the study was to obtain non-destructive subsurface information that can support future construction planning and reduce the risk of damaging the trees. The survey was performed using a dense grid of mutually perpendicular GPR profiles with 0.5 m spacing. A total of 196 profile lines with an overall length of 3090 m were measured. The main data set was acquired with a *MALÅ X3M GPR* system equipped with an 800 MHz shielded antenna, while selected profiles were additionally surveyed with a *UtilityScan* system for verification. The data were processed using standard GPR procedures. The processed profiles and the generated three-dimensional GPR model reveal a number of linear anomalies and anomalous zones, interpreted as probable manifestations of the root system. The most distinct anomalies were observed near the tree trunks, with decreasing intensity and extent away from them. The results indicate that the main part of the detected root-related anomalies is developed within the upper 1.5 m of the subsurface. The study demonstrates the applicability of GPR as a fast, detailed, and non-destructive method for mapping shallow root systems in areas where direct excavation is undesirable or risky.

Key words: ground-penetrating radar (GPR), root system, sequoia, non-destructive survey, Borovets.

ГЕОРАДАРЪТ КАТО БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН МЕТОД ЗА КАРТИРАНЕ НА КОРЕНОВА СИСТЕМА: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВЕ СЕКВОИ В БОРОВЕЦ

Зузана Каракашева-Цанкова, Християн Цанков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В статията са представени резултатите от георадарно изследване, проведено с цел оценка на пространственото разпространение на кореновата система на две секвои в района на Боровец, Софийска област. Основната задача на проучването е получаване на безразрушителна подповърхностна информация, която да подпомогне планирането на бъдещи строителни дейности и да намали риска от увреждане на дърветата. Измерванията са изпълнени по гъста мрежа от взаимно перпендикулярни георадарни профили с разстояние между тях 0,5 m. Общо са измерени 196 профилни линии с обща дължина 3090 m. Основният обем от данни е получен с георадарна система MALÅ X3M с екранирана 800 MHz антена, а част от профилите са допълнително дублирани със система UtilityScan за верификация на резултатите. Данните са обработени чрез стандартни процедури. В обработените радарграми и в съставения триизмерен георадарен модел са набелязани линейни аномалии и аномални зони, интерпретирани като вероятно проявление на кореновата система. Най-ясно изразените аномалии от тази категория се наблюдават в непосредствена близост до стволовете, като интензитетът и обхватът им намаляват с отдалечаване от дърветата, а дълбочината им не надвишава 1,5 m. Изследването демонстрира приложимостта на георадара като бърз, детайлен и най-вече безразрушителен метод за картиране на плитки коренови системи в участъци, където директното им разкриване чрез изкопи е нежелателно или рисково.

Ключови думи: георадар, коренова система, секвоя, безразрушително изследване, Боровец.

Въведение

Кореновата система е основен елемент за устойчивостта, храненето и дълготрайното състояние на дърветата. В урбанизирана или частично застроена среда нейното пространствено разпространение често е слабо известно, но има пряко значение при планиране на изкопни, строителни и благоустройствени дейности. Механичното увреждане на главни корени може да доведе до влошаване на състоянието на дърветата, намаляване на тяхната устойчивост и в някои случаи до необходимост от премахването им. Поради това при обекти, в които ценни или значителни по размер дървета попадат в близост до бъдещи строителни дейности, е необходимо предварително изясняване на вероятното разпространение на кореновата система.

Традиционните подходи за изследване на корени са свързани с разкриване чрез изкопи, сондажи или други директни методи. Те дават надеждна информация в конкретни точки или участъци, но са трудоемки, ограничени по площ и могат сами по себе си да причинят увреждане на корените. Като алтернатива през последните десетилетия все по-често се прилагат безразрушителни методи, сред които георадарът заема важно място при изследване на плитки подповърхностни обекти (Daniels, 2004; Jol, 2009). Методът регистрира отражения на високочестотни електромагнитни вълни от граници и обекти с различни електрични свойства. При подходящи условия дървесните корени могат да създават характерни отражения в радарграмите, най-често под формата на локални дифракционни хиперболи или линейно проследими аномалии.

Приложението на георадара за изследване на коренови системи е разглеждано в редица изследвания и обзорни публикации (Guo et al., 2013; Alani and Lantini, 2020). Hruška et al. (1999) демонстрират възможността за триизмерно картиране на коренови системи на големи дървета, а Čermák et al. (2000) комбинират георадарни и физиологични наблюдения при изследване на коренови системи на градски дървета. Stokes et al. (2002) разглеждат използването на георадар като безразрушителен метод за изследване на архитектурата на кореновата система. Bassuk et al. (2011) показват, че при подходящи почвени условия георадарът може надеждно да локализира корени под настилки. Guo et al. (2013) обобщават възможностите и ограниченията на метода при откриване и количествена оценка на по-едри корени, като подчертават ролята на почвените условия, влажността, честотата на антената и геометрията на корените спрямо профилните линии. Moore and Ryder (2015) изследват пространствената точност на

GPR при откриване на корени с различен диаметър и на различна дълбочина, а Nichols et al. (2017) разглеждат приложението на метода в градска среда и показват неговия потенциал за определяне на наличие, дълбочина и размер на корени под различни типове настилки.

Въпреки тези възможности, интерпретацията на георадарни данни за корени трябва да се извършва внимателно. Радарните отражения зависят не само от наличието на корени, но и от влажността на почвата, нейния гранулометричен състав, наличието на каменни късове, строителни отпадъци, подземни комуникации и други локални нехомогенности. Поради това в практиката резултатите обикновено се представят като зони с повишена вероятност за наличие на корени, а не като директно разкрита коренова система. Най-надеждни са интерпретациите, базирани на гъста мрежа от профили, съпоставка между различни направления на измерване и пространствено обобщаване на данните в двумерен или триизмерен модел.

Обект на изследване

Настоящата статия използва резултатите и първичната техническа информация от проведеното през 2023 г. георадарно проучване, обобщено в непубликуван технически доклад (Цанков, 2023).

Фиг. 1. Общ изглед от Google Earth към местоположението на двете секвои в района на Апарт-хотел „Секвоя“, Боровец

Изследваният участък се намира в района на Апарт-хотел „Секвоя“, м. Боровецка седловина, Боровец, община Самоков (фиг. 1). Двете секвои, предмет на настоящото изследване, са разположени на малка тревна площ между пътя от Боровец към Костенец и сградата на хотела. Непосредствената близост на дърветата до съществуващата сграда и до зона, в която се предвиждат бъдещи строителни дейности, определя необходимостта от предварителна оценка на пространственото разпространение на тяхната коренова система.

Предмет на георадарното изследване е плитката подповърхностна част на терена около двете дървета, където се очаква да е развита основната част от кореновата система. Целевата дълбочина на изследването е до около 2 m, като основен интерес представляват по-едрите корени, чието увреждане би могло да повлияе неблагоприятно върху устойчивостта и състоянието на дърветата. В геофизичен смисъл търсените обекти могат да бъдат разглеждани като линейни или слабо извити подповърхностни тела с различен диаметър, разположени в слабоглинеста до песъчлива почвена среда, на места примесена със скални късове и локални антропогенни материали.

При интерпретацията е отчетено, че георадарът не регистрира или разпознава директно корените на дърветата, а реагира на контрасти в електромагнитните свойства на средата. Поради това получените резултати са разглеждани като вероятни зони на разпространение на коренова система, определени въз основа на формата, положението, интензитета и пространствената повторяемост на регистрираните аномалии.

Методика на георадарните измервания

Преди провеждане на георадарните измервания е извършен оглед на терена, при който са оценени условията за работа, достъпността на площта около дърветата и възможностите за прокарване на профилни линии. С оглед повишаване на детайлността на проучването и проследяване на възможните направления на разпространение на кореновата система е избрана методика с две взаимно перпендикулярни профилни мрежи. Профилните линии са разположени през 0,5 m, което осигурява висока пространствена детайлност и възможност за последващо обединяване на данните в триизмерен георадарен модел.

Фиг. 2. Момент от георадарните измервания с MALÅ X3M в източния участък от площта

Площадката е предварително оразмерена на терена с помощта на рулетки и маркировъчни флагчета (фиг. 2). Това позволява поддържане на постоянна геометрия на профилите и по-добра ориентация на оператора при

движение по профилните линии. Измерванията са изпълнени чрез последователно, зигзагообразно обхождане на профилите. В участъците, където профилните линии пресичат стволовете на дърветата, измерването е прекъсвано и продължавано от противоположната страна, като по този начин е запазена общата геометрия на мрежата.

Основният набор от данни е получен с георадарна система MALÅ X3M с екранирана антена с централна честота 800 MHz (фиг. 2). Изборът на високочестотна антена е обусловен от необходимостта от висока разделителна способност в плитката част на разреза, където се очаква да са развити основните корени. За допълнителна проверка на част от резултатите и оценка на поведението на сигнала в по-голяма дълбочина част от профилите са дублирани с георадарна система UtilityScan с антена 350 MHz.

Общо са измерени 196 георадарни профилни линии с обща дължина 3090 m. В основната площ около секвоите са прокарани 169 профила, от които 92 в едното направление и 77 в перпендикулярното направление. Допълнително са измерени 17 профила върху заравнена площадка североизточно от дърветата. Чрез тази схема е покрита площ от приблизително 0,95 дка, включваща непосредственото пространство около двете секвои и прилежащите участъци, в които е възможно развитие на по-едри корени (фиг. 3).

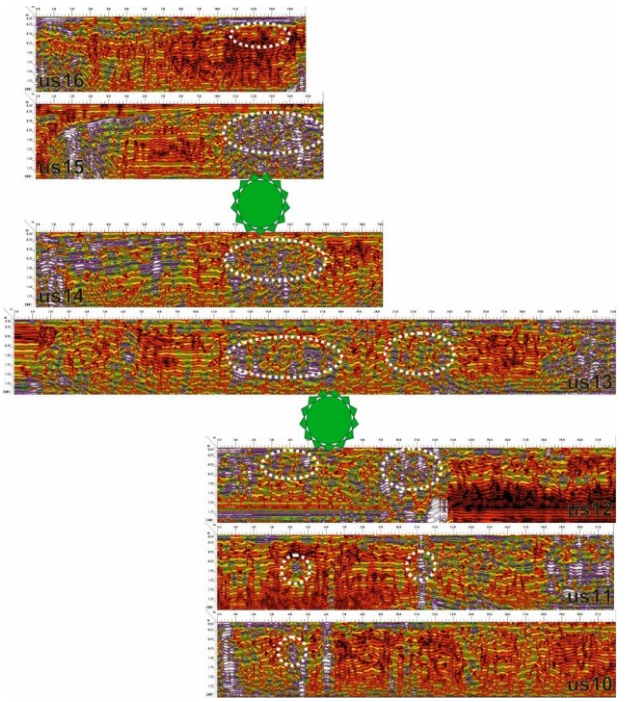
Фиг. 3. Схема на георадарните профили около двете секвои

Първичните данни от системата MALÅ X3M са обработени с компютърната програма ReflexW, а данните от UtilityScan – с програмата RADAN 7. Приложена е стандартна последователност от обработки, включваща корекция на началния момент на записа, премахване на фоновия сигнал и допълнителна филтрация. Всички профили са преориентирани в единна координатна схема, така че резултатите да могат да бъдат съпоставяни по основните направления на измерване. При интерпретацията е използвана една обща средна скорост на разпространение на електромагнитните вълни v_{cp} = 0,079 m/ns, определена чрез комбинация от литературни данни и напасване на дифракционни хиперболи в радарграмите.

След обработката отделните радарграми са анализирани за наличие на локални аномалии, за тяхното проследяване по съседни профили и за обединяването им в линейни аномалии и аномални зони, които по форма, дълбочина и пространствено положение могат да бъдат свързани с пресичане на корени от профилните линии (фиг. 4). Геометризираните данни от гъстата профилна мрежа са използвани за съставяне на триизмерен георадарен модел (фиг. 5), от който са генерирани хоризонтални срезове и обобщени изображения на амплитудното разпределение. Така интерпретацията не се основава само на отделни профили, а на пространственото поведение на аномалиите в рамките на цялата изследвана площ.

Резултати и интерпретация

Получените георадарни данни се характеризират с добро качество на сигнала в плитката част на разреза. Информативността на радарграмите е най-висока в интервала от повърхността до около 2 m дълбочина, което съответства на целевата дълбочина на изследването. В този интервал се наблюдават множество локални отражения, дифракционни форми и линейно проследими аномалии, които се различават по интензитет, размери и пространствено разположение.

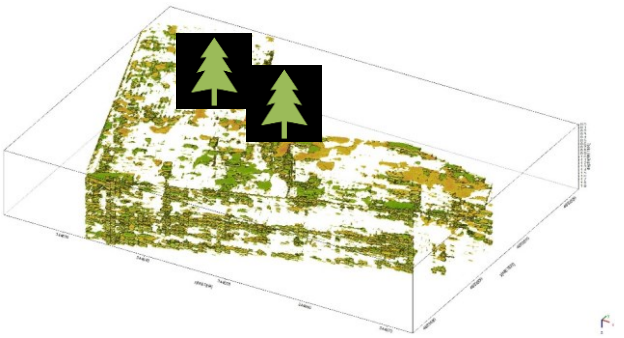


Фиг. 4. Примерни радарграми, получени с георадар UtilityScan с отбелязани аномалии, интерпретирани като вероятно свързани с кореновата система

В радарграмите, получени по профилите, дублирани със системата UtilityScan, най-ясно изразените аномалии се установяват в непосредствена близост до стволовете на двете секвои. Те се проявяват като локални зони с по-силен и по-нееднороден радарен сигнал, както и като отделни дифракционни форми, характерни за пресичане на компактни или линейни подповърхностни обекти (фиг. 4). С отдалечаване от дърветата интензитетът и пространственият обхват на тези аномалии постепенно намаляват. Това поведение съответства на очакваното намаляване на броя и диаметъра на главните корени с увеличаване на разстоянието от стволовете.

Анализът на отделните профили показва, че основната част от аномалиите, интерпретирани като вероятно свързани с кореновата система, се развива в дълбочинния интервал от повърхността до около 1,5 m. Под тази дълбочина се наблюдават отделни отражения, но те са по-слабо изразени, по-трудно проследими и не позволяват еднозначна връзка с кореновата система. Поради това интерпретацията е концентрирана основно върху плитката част на разреза, където разделителната способност, качеството на сигнала и пространствена повторяемост на аномалиите са най-добри.

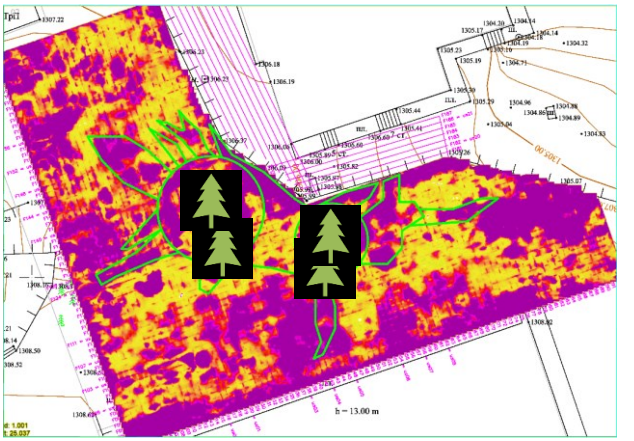
Данните от гъстата профилна мрежа, измерена със системата MALÅ X3M, са използвани за съставяне на триизмерен георадарен модел (фиг. 5). Той позволява пространствено проследяване на амплитудните аномалии не само по отделни профили, но и в план. От модела са генерирани хоризонтални срезове и обобщени амплитудни изображения, чрез които са отделени зоните с най-висока концентрация на линейни и локални аномалии. Този подход намалява риска от интерпретиране на единични случайни отражения като корени и позволява по-надеждно очертаване на участъците, в които аномалиите се проявяват последователно в повече от един профил.



Фиг. 5. Триизмерен георадарен модел по данни от системата MALÅ X3M с визуализирани местата на максималните амплитуди на отраженията

Получените резултати показват, че вероятното разпространение на кореновата система е неравномерно и е най-добре изразено в зоните около двете дървета и между тях. Част от аномалиите се проследяват радиално от стволовете, а други образуват по-широки зони с повишена амплитудна активност. Тази картина може да се свърже както с наличие на отделни по-едри корени, така и с участъци с по-гъсто развитие на коренова система. На заравнената площадка североизточно от секвоите също се наблюдават локални аномалии, но част от тях вероятно са свързани с антропогенни обекти или нарушения в почвената среда, поради което не са интерпретирани еднозначно като корени.

Финалното очертаване на вероятните зони на кореново разпространение е извършено чрез съпоставка между отделните радарграми, хоризонталните срезове от триизмерния модел и обобщените амплитудни изображения. В резултат са отделени участъци, в които георадарните аномалии имат подходяща форма, дълбочина, ориентация и пространствена повторяемост, за да бъдат интерпретирани като вероятно проявление на кореновата система. Така получената схема не трябва да се разглежда като директна карта на всички корени, а като интерпретационен модел на зоните с най-висока вероятност за наличие на по-едри корени (фиг. 6).



Фиг. 6. Обобщена схема на вероятното разпространение на кореновата система на двете секвои според интерпретираните георадарни данни наложена върху хоризонтален срез от триизмерния георадарен модел

Дискусия

Получените резултати потвърждават възможността георадарният метод да бъде използван като ефективен безразрушителен инструмент за изследване на плитки коренови системи. В конкретния случай основно предимство на метода е възможността за бързо покриване на сравнително голяма площ около дърветата, без необходимост от изкопи или други директни намеси в почвената среда. Това е особено важно при ценни дървета, при които самото разкриване на корените би могло да доведе до механично увреждане или промяна в условията на средата.

Най-съществен принос за интерпретацията има използването на гъста профилна мрежа в две взаимно перпендикулярни направления. При подобен тип задачи единичните радарни профили могат да бъдат недостатъчни, тъй като отделни локални отражения могат да бъдат причинени както от корени, така и от каменни късове, почвени нехомогенности или антропогенни включения. Съпоставянето на профили от различни направления и обединяването им в триизмерен модел позволява да се отделят пространствено издържани аномалии, които имат по-голяма вероятност да бъдат свързани с коренова система.

Интерпретираните аномални зони са най-добре изразени в близост до стволовете на двете секвои, като с отдалечаване от тях интензитетът и пространственият обхват на аномалиите намаляват. Тази закономерност съответства на очакваното поведение на кореновата система, при което по-едрите корени са развити в близост до дървото, а в периферните части размерът и гъстотата им постепенно намаляват. Основната част от аномалиите е установена в плитката зона на разреза, до около 1,5 m дълбочина, което е в съответствие с очаквания дълбочинен обхват на основната коренова система на секвоите в конкретните условия.

Въпреки добрата информативност на данните, резултатите трябва да се разглеждат като интерпретационен модел, а не като директно изображение на всички корени. Георадарните отражения се определят от контраста в електромагнитните свойства между корените и вместващата среда, но подобни по форма аномалии могат да бъдат причинени и от други подповърхностни обекти. Допълнителни ограничения са свързани с влажността и нееднородността на почвата, наличието на скални късове, антропогенни нарушения и различната ориентация на корените спрямо профилните линии. Поради това най-надеждни са зоните, в които аномалиите се проявяват последователно в повече от един профил и се потвърждават в хоризонталните срезове или в обобщените изображения от триизмерния модел.

От практическа гледна точка георадарното изследване предоставя пространствена основа за предварително планиране на бъдещи строителни или изкопни дейности в близост до дърветата. Интерпретираните зони с повишена вероятност за наличие на по-едри корени могат да бъдат използвани за определяне на участъци с повишено внимание, както и за насочване на евентуални ограничени контролни разкрития. В този смисъл методът не заменя напълно експертната дендрологична или инженерна оценка, но предоставя важна информация за подповърхностната среда, която иначе би могла да бъде получена основно чрез директни, но разрушителни методи.

Заключение

Проведеното георадарно изследване в района на Апарт-хотел „Секвоя“, Боровец, показва, че методът е приложим за безразрушително картиране на вероятното разпространение на плитки коренови системи. Чрез гъста мрежа от взаимно перпендикулярни профили, използване на високочестотна 800 MHz антена и триизмерна обработка на данните са отделени линейни аномалии и аномални зони, интерпретирани като вероятно свързани с кореновата система на двете секвои.

Най-ясно изразените аномалии са установени в непосредствена близост до стволовете, като основната част от тях се развива в плитката част на разреза, до около 1,5 m дълбочина. С отдалечаване от дърветата интензитетът и обхватът на аномалиите намаляват, което съответства на очакваното пространствено развитие на по-едрите корени.

Получената интерпретационна схема може да бъде използвана при планиране на бъдещи строителни и изкопни дейности в района на дърветата. Тя очертава зоните, в които рискът от засягане на кореновата система е по-висок и където е необходима повишена предпазливост.

Резултатите показват, че георадарът е подходящ бърз и детайлен метод за предварителна оценка на коренови системи в урбанизирана или частично застроена среда, особено когато директното разкриване чрез изкопи е нежелателно или рисково.

Литература

Alani, A. M., & Lantini, L. (2020). *Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: A focus on ground penetrating radar*. Surveys in Geophysics, 41, 605–646. https://doi.org/10.1007/s10712-019-09548-6

Bassuk, N., Grabosky, J., Mucciardi, A., & Raffel, G. (2011). *Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement*. Arboriculture & Urban Forestry, 37(4), 160–166. https://doi.org/10.48044/jauf.2011.021

Čermák, J., Hruška, J., Martinková, M., & Prax, A. (2000). *Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques*. Plant and Soil, 219, 103–116. https://doi.org/10.1023/A:1004736310417

Daniels, D. J. (Ed.). (2004). *Ground penetrating radar (2nd ed.)*. The Institution of Electrical Engineers. https://doi.org/10.1049/PBRA015E

Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & Lin, H. (2013). *Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review*. Plant and Soil, 362, 1–23. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5

Hruška, J., Čermák, J., & Šustek, S. (1999). *Mapping tree root systems with ground-penetrating radar*. Tree Physiology, 19(2), 125–130. https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125

Jol, H. M. (Ed.). (2009). *Ground penetrating radar: Theory and applications*. Elsevier.

Moore, G. M., & Ryder, C. M. (2015). *The use of ground-penetrating radar to locate tree roots*. Arboriculture & Urban Forestry, 41(5), 245–259. https://doi.org/10.48044/jauf.2015.023

Nichols, P., McCallum, A. B., & Lucke, T. (2017). *Using ground penetrating radar to locate and categorise tree roots under urban pavements*. Urban Forestry & Urban Greening, 27, 9–14. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.019

Stokes, A., Fourcaud, T., Hruška, J., Čermák, J., Nadyezdhina, N., Nadyezhdin, V., & Praus, L. (2002). *An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar*. Journal of Arboriculture, 28(1), 2–10. https://doi.org/10.48044/jauf.2002.001

Цанков, Х., Каракашева-Цанкова, З. (2023). *Георадарно изследване за установяване разпространението на кореновата система на две секвои в района на Апарт-хотел „Секвоя“, м. Боровецка седловина, Боровец, общ. Самоков, Софийска област* [Непубликуван технически доклад]. Тера Скаут ЕООД, личен архив на авторите.

SPATIAL VARIABILITY OF GOLD AND SILVER MINERALISATION IN THE *SEDEFCHE* DEPOSIT (THE EASTERN RHODOPES, BULGARIA): A GEOSTATISTICAL APPROACH

Stoyan Klimentov, Kalin Rouskov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: s.klimentov@gorubso.bg; rouskov@mgu.bg

ABSTRACT. Gold and silver mineralisation in the *Sedefche* deposit (the Eastern Rhodopes, Bulgaria) was investigated using statistical and geostatistical methods in order to evaluate the spatial variability and distribution of ore grades. The study is based on an integrated exploration database comprising more than 6000 geochemical samples from drill holes and surface workings. Descriptive statistical analysis indicates positively skewed grade distributions with mean values of 0.37 g/t Au and 14.3 g/t Ag. Geological domain modelling was performed using a cut-off grade of 0.3 g/t Au, which delineates the principal mineralised zones. Experimental variograms for gold reveal well-defined spatial continuity and pronounced anisotropy, oriented parallel to the N–NE elongation of the mineralised structures. The spatial structure of Au grades was modelled using a nested spherical variogram model and applied in ordinary kriging estimation, with a maximum correlation range not exceeding 40 m. In contrast, silver grades show weak spatial continuity and were estimated using inverse distance weighting. The results indicate distinct spatial trends and grade zoning within the deposit, reflecting strong structural control on mineralisation. The study demonstrates the applicability of geostatistical modelling for characterising epithermal Au–Ag systems and provides a quantitative framework for mineral resource classification in the *Sedefche* deposit.

Key words: gold, silver, geostatistics, variogram analysis.

ПРОСТРАНСТВЕНА ПРОМЕНЛИВОСТ НА ЗЛАТО-СРЕБЪРНАТА МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В НАХОДИЩЕ „СЕДЕФЧЕ“ (ИЗТОЧНИ РОДОПИ) – ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИ ПОДХОД

Стоян Климентов, Калин Русков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Златно-сребърната минерализация в находище „Седефче“ (Източни Родопи, България) е изследвана чрез статистически и геостатистически методи с цел оценка на пространствената променливост и разпределението на рудните съдържания. Изследването се основава на интегрирана база данни от проучвателни работи, включваща над 6000 геохимични проби от сондажи и повърхностни изработки. Описателният статистически анализ показва положително асиметрично разпределение на съдържанията със средни стойности 0.37 g/t Au и 14.3 g/t Ag. Геоложкото домейнно моделиране е извършено при гранично съдържание 0.3 g/t Au, което очертава основните минерализирани зони. Експерименталните вариограми за златото показват добре изразена пространствена непрекъснатост и анизотропия, ориентирана паралелно на протежението на минерализираната структура. Пространствената структура на съдържанията на Au е моделирана чрез вложен сферичен вариограмен модел и използвана при оценка чрез обикновен кригинг, като максималният обхват на пространствената корелация не надвишава 40 м. За разлика от златото, среброто показва слаба пространствена непрекъснатост и е интерполирано чрез метода на обратното претегляне по разстояние. Получените резултати показват ясно изразени пространствени тенденции и зоналност на съдържанията в рамките на находището, обусловени основно от структурния контрол върху минерализацията. Изследването демонстрира приложимостта на геостатистическото моделиране за характеризиране на пространственото разпределение на епитермална Au–Ag минерализация и предоставя количествена основа за моделиране на минерални ресурси в находище „Седефче“.

Ключови думи: злато, сребро, геостатистика, вариограмен анализ.

Introduction

Epithermal gold–silver deposits of the Eastern Rhodopes form one of the more productive metallogenic zones in Southeastern Europe. These deposits occur within Oligocene volcanic and volcano-sedimentary sequences associated with sub-volcanic intrusions of the Zvezdel–Pcheloyad and related volcano-plutonic systems (Georgiev, 2012; Popov & Popov, 2022). Fault networks controlled the pathways of ore-bearing fluids and the sites of precious metal deposition. The Ada Tepe, Kupel, Pelevun, and Zvezdel–Pcheloyad ore fields are among the best-studied representatives of this province.

Mineral resource estimation in epithermal systems requires an accurate characterisation of the spatial distribution and variability of ore grades. Geostatistical methods — variogram analysis and kriging-based interpolation in particular — provide a quantitative framework for this purpose (Matheron, 1963; Isaaks & Srivastava, 1989; Stein, 1999; Wackernagel, 2003). These approaches model the spatial structure of geochemical data explicitly, improving grade estimates and reducing uncertainty in resource evaluations. Geostatistical analysis can also reveal geological controls on mineralisation that are difficult to identify by conventional deterministic methods.

The *Sedefche* deposit, located in the easternmost part of the Zvezdel–Pcheloyad ore field, has been investigated through multiple exploration campaigns spanning several decades. Despite this long history of investigation, the spatial variability of gold and silver grades within the deposit had not previously been subjected to systematic geostatistical analysis. A preliminary three-dimensional geological model of the ore zones at Sedefche, together with domain boundary analysis, was presented by Klimentov and Rouskov (2023). The present study builds upon and extends that work, providing a comprehensive statistical and geostatistical evaluation of Au–Ag grade variability, including variogram modelling, spatial anisotropy analysis, and grade estimation by ordinary kriging.

The objective of this study is to characterise the spatial distribution and variability of Au and Ag mineralisation in the *Sedefche* deposit through integrated statistical and geostatistical analysis applied to a unified exploration database. Particular emphasis is placed on the analysis of grade distributions, experimental variogram modelling, the quantification of spatial anisotropy, and the assessment of grade continuity within individual mineralised domains, with the aim of providing a sound geostatistical basis for resource modelling in this epithermal system.

Geological Setting of the Deposit

Regional Geological Framework

The *Sedefche* gold-silver deposit is situated immediately north-northwest of the village of Sedefche, within the easternmost sector of the Zvezdel–Pcheloyad ore field. This ore field is genetically and spatially associated with the Zvezdel volcano-plutonic complex and pertains to the Momchilgrad ore sub-region, which is localised within the Momchilgrad Depression (Georgiev, 2012; Popov & Popov, 2022).

The lithostratigraphic sequence of the deposit area comprises two principal complexes (Georgiev, 2012; Sarov et al., 2008). The pre-Tertiary metamorphic basement consists of biotite and two-mica gneisses, amphibolite-biotite gneisses, marbles, and kyanite-garnet-biotite schists (Sarov et al., 2008; Bonev et al., 2010). The overlying Tertiary volcanogenic-sedimentary cover is composed of sedimentary, volcano-sedimentary, and volcanic rocks. Immediately above the metamorphic basement lie Late Eocene organogenic limestones and sandy-clay rocks; locally, the limestones are partially silicified. Acidic to intermediate dykes — rhyolitic, dacitic, and andesitic in composition — represent products of Oligocene volcanic activity and intrude the earlier sequences (Nedyalkov & Mavroudchiev, 1995). The sequence is capped by Quaternary eluvial-deluvial sediments.

Structural Setting

Four principal fault systems are recognised within the *Sedefche* deposit area. Sub-meridional faults are the most extensively developed and are interpreted to have exerted significant control over hydrothermal metasomatic processes and ore deposition, as evidenced by the N-NE elongation of the gold-silver ore bodies. Sub-latitudinal faults, striking W-NW (280–300°), represent the ore-hosting structures for polymetallic mineralisation in the Zvezdel–Pcheloyad ore field; they also serve as the conduits for a suite of rhyolitic, latitic, and rhyodacitic dykes that define the southern boundary of the ore field. Northwest-trending faults are well expressed as a prominent fault zone between the Asara and Dyulgera hills. The zone hosts dykes and metasomatites and can be traced continuously for over 8 km to the Au-polymetallic Obichnik prospect. Northeast-trending faults are the youngest structural elements and are represented by short sinistral strike-slip fractures that cross-cut the hydrothermal metasomatites.

It is important to note that no dedicated three-dimensional structural model of the deposit has been constructed to date, a limitation that constrains the precision of the resource model (Dragiev & Dragieva, 2006).

Ore Body Morphology and Mineralisation

Geological surveys have delineated two primary gold-silver ore bodies within the deposit: the Northern (Central) and the Southern ore bodies (Dragiev & Dragieva, 2006; Klimentov & Rouskov, 2023). The ore bodies lack visible geological boundaries in the field; their boundaries are therefore defined entirely on the basis of assay data from systematically sampled exploration workings.

The Northern ore body is an elongated structure (approximately 400 × 60 m) striking N-NE and hosted within intensely hydrothermally altered pyroclastic rocks and andesites. Its vertical extent reaches approximately 146 m, with elevations ranging from +559.7 m to +413.5 m a.s.l. The ore body is broadly layer-like and pseudo-conformable in shape, broadly concordant with the basal levels of hydrothermally altered tuffs at or near their contact with organogenic limestones. In its northernmost sectors (north of profile XVII), the ore body progressively dips at 10–15° and cross-cuts multiple stratigraphic levels, reflecting structural rather than purely stratigraphic controls in this portion of the deposit.

The Southern ore body strikes N-S and is hosted within a silica cap overlying the limestone-siliciclastic sequence. The deposit is a typical representative of the low-sulphidation epithermal gold-silver type (Georgiev, 2012). Two broad styles of mineralisation are recognised. Base-metal/low-gold mineralisation with abundant sulphides (pyrite and marcasite) is closely related to the Zvezdel–Pcheloyad intrusive complex, which also hosts the *Pcheloyad* lead-zinc deposit. Gold-silver-bearing silica replacement bodies are partially stratabound and controlled by steep N-S structures; they are interpreted as a later event, potentially related to the younger rhyolite complex south of the deposit. The gold-bearing mineralisation contains abundant sulphosalts, and a significant proportion of the gold is considered refractory in character.

The present geostatistical study focuses on the Central sector of the deposit and is based on a reinterpretation of the available exploration data using an integrated database, as described in the following section.

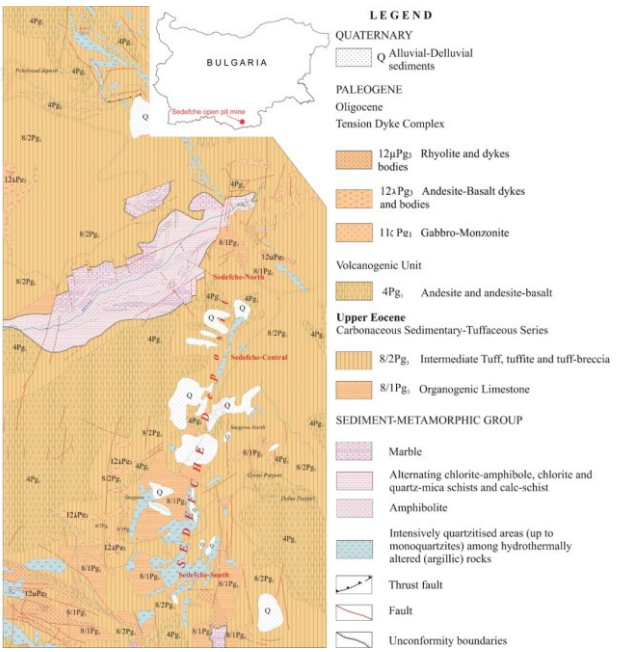


Fig. 1. Geological map in scale 1:50 000 (Cekova, V., 1965)

Database and Sampling

Data Sources and Exploration History

The geostatistical study is based on an integrated exploration database compiled from three successive phases of geological investigation in the Central sector of the *Sedefche* deposit. The data were acquired by *Geoinzhenering* JSC and *Gorubso-Kardzhali* JSC in the periods 1984–1993 (132 drill holes totalling 10,878.6 linear metres) and 2004–2005 (82 surface drill holes in 20 profile lines, totalling 2,119.2 linear metres), and subsequently by *Velocity Minerals* Ltd. during the most recent exploration campaign. The dataset encompasses

drill core (DD), reverse circulation (RC), trench, pit (shaft), and channel samples from surface workings.

The database of *Gorubso-Kardzhali* JSC (which incorporates the *Geoinzhenering* JSC data) contains records from 122 drill holes, 45 trenches, 41 pits, and 86 surface trenches for the Central sector. The *Velocity Minerals* Ltd. dataset comprises 81 core holes (including 3 duplicate holes) with a total length of 5,582 m and 52 reverse-circulation holes totalling 2,088 m (the latter being infill holes drilled by *Gorubso-Kardzhali* JSC following the completion of the *Velocity Minerals* block model). The combined, integrated database contains a total of 133 drill holes (81 DD and 52 RC), as reported in Klimentov and Rouskov (2023).

Database Compilation and Verification

Data from the three exploration phases were compiled into a unified database and processed in Datamine Studio RM software. Prior to statistical analysis and geostatistical modelling, the database was subjected to a systematic verification and validation procedure to identify inconsistencies, duplicate entries, and anomalous or erroneous values. Collar, survey, lithology, and assay tables were cross-checked for completeness and internal consistency.

The grade data for Au and Ag show strongly right-skewed (positively skewed) frequency distributions, a characteristic feature of precious metal deposits in which high-grade assay intervals occur as a relatively rare but volumetrically significant population within a background of low-grade or sub-economic material. The skewness coefficients for Au (217.13) and Ag (158.49) confirm the extreme positive skewness of both distributions. The combined dataset contains 6,410 Au assay intervals and 6,833 Ag assay intervals.

Compositing

The raw assay intervals in the *Gorubso-Kardzhali* JSC dataset exhibit variable sample lengths, with the most frequent lengths being 1 m (2,432 samples) and 2 m (1,789 samples), and a further prominent population at 1.6 m (1,483 samples). The *Velocity Minerals* Ltd. data are dominated by 1 m samples (5,271 samples) with a subordinate population at 1.2 m (772 samples). To eliminate the bias introduced by irregular sample support lengths and to ensure uniform data support for geostatistical analysis, all assay intervals within the mineralised domains were regularised to a uniform composite length of 1 m prior to variogram computation and kriging estimation.

Variogram Analysis

Methodology

Variogram analysis was conducted to characterise the spatial continuity and anisotropy of Au and Ag grades within the mineralised domains of the *Sedefche* deposit. Experimental semi-variograms were computed from the 1 m composited dataset, separately for each principal domain, in order to capture domain-specific spatial structures consistent with the stationarity assumptions required for ordinary kriging. Variograms were calculated at angular increments of 10°, and a contour map of variogram dispersion values derived from the experimental variograms was constructed to identify the principal directions of anisotropy (Fig. 2).

Down-hole (linear) variograms were examined as a first step. Although down-hole variograms are commonly the most reliable indicator of the nugget effect because they are computed from the most closely spaced sample pairs, no interpretable spatial structure was recovered from the down-hole variograms in the present dataset, likely reflecting the irregular drill-hole orientations relative to the principal directions of grade continuity. Directional variograms were therefore relied upon exclusively for model fitting.

Directional Variograms and Spatial Anisotropy

Directional experimental variograms computed for Au grades reveal clear anisotropic behaviour. The contour map of experimental variogram dispersion (Fig. 2) shows that the maximum spatial continuity is oriented parallel to the principal elongation of the mineralised structure, consistent with the dominant sub-meridional (N–NE) structural trend identified in the geological setting. The minimum continuity direction is perpendicular to the ore zone elongation, indicating that grade variability is greatest across the ore bodies.

Directional variograms for ore body 1 were computed in the azimuth range 80–170°, capturing both the direction of maximum continuity (approximately azimuth 170°, parallel to the ore body long axis) and the direction of minimum continuity (approximately azimuth 80°, perpendicular to the long axis). The experimental variograms (Fig. 3) clearly document this anisotropy: the correlation length (range) in the direction of maximum continuity significantly exceeds that in the perpendicular direction. The anisotropy is oriented in the plane of the mineralised zone, consistent with the structural control on mineralisation.

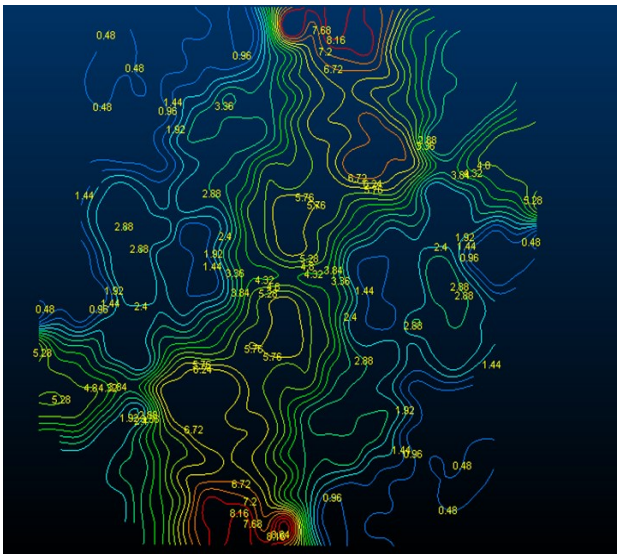


Fig. 2. Contour map of experimental variogram dispersion (azimuth vs. dip)

For silver, experimental variograms computed in all tested directions failed to yield a stable, interpretable spatial structure. The absence of a well-defined variogram model for Ag reflects the more heterogeneous and poorly spatially correlated distribution of silver grades within the deposit. This behaviour may be attributed to variations in the mineralogical associations of silver (sulphosalts, native silver) relative to the more spatially coherent gold distribution, or to the influence of multiple hydrothermal stages with differing Ag/Au ratios. For this reason, no variogram model was fitted for Ag, and silver grades were estimated using the inverse distance weighting (IDW) method.

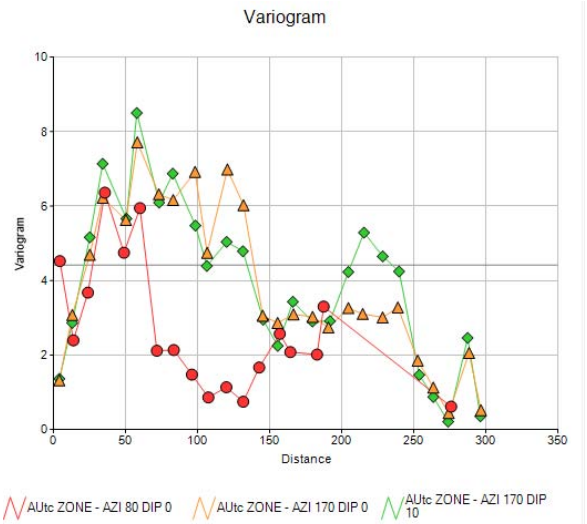


Fig. 3. Directional experimental variograms for ore body 1 at azimuth 80/170

Variogram Model

The experimental variograms for Au in ore body 1 were modelled using a nested spherical variogram model with a triple (three nested components) structure (Fig. 4), following the approach described in Matheron (1963) and Wackernagel (2003). The nested model is composed of a nugget component and two nested spherical structures, which together adequately reproduce the observed spatial continuity at both short and long ranges. The anisotropy of the model is oriented in the plane of the mineralised zone.

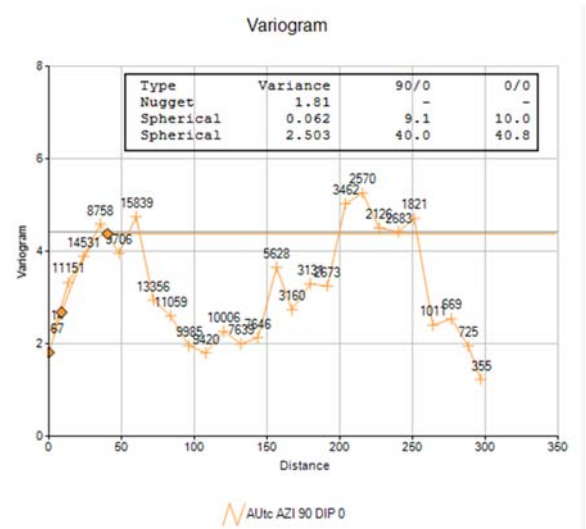


Fig. 4. Fitted spherical variogram model

The fitted variogram model defines a maximum correlation range not exceeding 40 m, consistent with the relatively short spatial continuity typical of structurally controlled, low-sulphidation epithermal mineralisation (Klimentov & Rouskov, 2023). The nugget-to-sill ratio reflects a moderate nugget effect, indicative of both small-scale grade variability below the 1 m composite support length and measurement uncertainty. The variogram model parameters were used directly to define the search ellipsoid orientations and semi-axes for the subsequent ordinary kriging estimation. This ensures geometric consistency between the estimation and the modelled spatial structure of Au grades.

Geological Domain Modelling

Geological domain modelling — including wireframe construction of ore body boundaries, boundary analysis at the 0.3 g/t Au cut-off grade, and the three-dimensional characterisation of the spatial distribution of Au grades within the *Sedefche* deposit — was presented in detail by Klimentov and Rouskov (2023).

The three domains used in the present geostatistical study are: ore body 1 (the principal mineralised zone, N–NE elongated, approximately 700 m long and up to 170 m wide, with a vertical extent of 146 m), ore body 2 (a smaller body situated to the west of ore body 1), and zone 3 (the aggregate of 12 minor domains peripheral to the two main bodies).

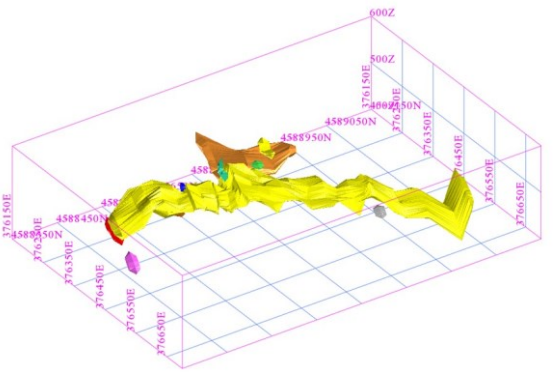


Fig. 5. Isometric view of all 14 domains after Klimentov & Rouskov (2023)

Results and Discussion

Grade Distribution and Statistical Character of the Mineralisation

The combined exploration database shows grade distributions characteristic of low-sulphidation epithermal precious metal deposits. Both Au and Ag are strongly right-skewed, with skewness coefficients of 217 and 158 respectively: the bulk of the sample population is sub-economic, while a small proportion of high-grade intervals contributes disproportionately to total metal content. The arithmetic mean of 0.37 g/t Au is an order of magnitude higher than the median of 0.03 g/t Au, which reflects this skewness and shows why grade capping and compositing are necessary before geostatistical analysis.

The skewed distributions also have important implications for variogram modelling: the presence of extreme high-grade values (up to 34.83 g/t Au) inflates the variance of the raw data and can distort experimental variograms, particularly at short lag distances, producing artificially elevated nugget estimates. The application of a grade cap of 12 g/t Au for ore body 1 (and 7 g/t Au for domains 2 and 3) prior to variogram computation was therefore essential to obtain stable experimental variograms that accurately represent the spatial continuity of typical ore-grade intervals, rather than reflecting the erratic behaviour of rare extreme values.

High Au grades are not confined to a single lithological unit. Elevated mean values occur in quartzites (1.30 g/t), silicified rocks (1.08 g/t), clay-altered tuffs (0.97 g/t), and pyritic tuffs (0.45 g/t), but also in unmineralised country-rock lithologies at sub-economic concentrations. This distribution across rock types suggests that gold deposition was controlled primarily by

structural permeability — the fault network that channelled hydrothermal fluids — rather than by lithological controls alone.

Contrasting Spatial Behaviour of Gold and Silver

A notable finding of this study is the markedly different spatial behaviour of gold and silver within the same deposit. While Au grades exhibit well-defined spatial continuity with a fitted variogram model and a correlation range of up to 40 m, Ag grades show no recoverable spatial structure: the experimental variograms for silver in all tested directions failed to stabilise at a sill value, precluding the fitting of a reliable variogram model.

This contrast between Au and Ag spatial behaviour likely reflects fundamental differences in the mineralogical controls and depositional history of the two metals. Gold in low-sulphidation epithermal systems is typically concentrated in discrete silicified zones and quartz vein corridors whose geometry is closely governed by the structural framework, resulting in spatially organised grade distributions that are amenable to geostatistical analysis. Silver, in contrast, is often hosted in a wider variety of sulphosalt and sulphide minerals, which may be distributed more heterogeneously and may have precipitated during multiple hydrothermal pulses at varying temperatures, resulting in a more dispersed and spatially uncorrelated distribution. The gold-bearing mineralisation at *Sedefche* has been noted to contain abundant sulphosalts with a significant refractory gold component, suggesting a geochemically complex system in which different precipitation episodes may have generated Au- and Ag-rich assemblages with distinct spatial footprints.

From a practical perspective, the inability to model Ag spatial continuity means that inverse distance weighting (IDW), rather than kriging, is the more appropriate estimation method for silver. IDW provides a smooth interpolant that honours the data values at sample locations without requiring assumptions about the spatial correlation structure, making it more robust when no reliable variogram can be established. The resulting Ag estimates should therefore be interpreted with greater uncertainty than the Au kriging estimates, and any resource classification based on Ag grades alone would require a more conservative approach.

Taken together, the statistical and geostatistical results give a quantitative account of the spatial organisation of Au–Ag mineralisation at *Sedefche* that is consistent with the geological setting. The strong anisotropy of gold grades (Fig. 6), oriented parallel to the N–NE fault system, confirms structural control on mineralisation: auriferous fluids were channelled along favourably oriented, permeable fault zones. The short correlation range (≤40 m) shows that grade continuity is limited even within these corridors. This reflects the episodic character of hydrothermal precipitation at the local scale.

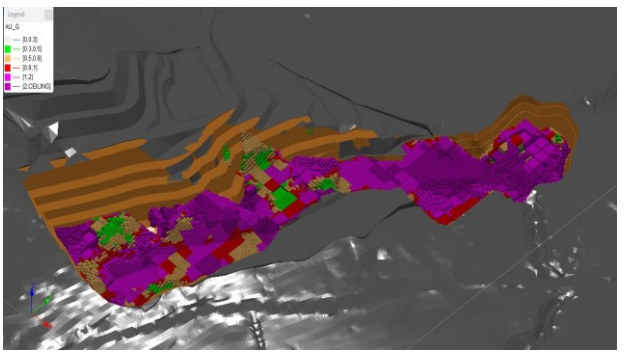


Fig. 6. Block model of Au grades using ordinary kriging method

The domain-specific grade statistics reveal a clear spatial differentiation within the deposit: ore body 1 (mean 1.79 g/t Au) is significantly richer and geometrically more continuous than ore body 2 (mean 1.20 g/t Au) and zone 3 (mean 0.94 g/t Au). This grade zoning may reflect proximity to the principal fluid conduit — with ore body 1 occupying the most structurally active and fluid-focused portion of the system — and/or variations in the physico-chemical conditions of gold precipitation along different fluid pathways. The boundary analysis (Klimentov & Rouskov, 2023) shows that the grade contrast at the 0.3 g/t cut-off boundary is more abrupt and sustained over a greater distance in ore body 1 than in ore body 2, further supporting the interpretation that ore body 1 represents a more focused and higher-intensity mineralising event.

Conclusions

This study has provided a comprehensive statistical and geostatistical characterisation of Au–Ag grade variability in the *Sedefche* low-sulphidation epithermal deposit (the Eastern Rhodopes, Bulgaria), based on an integrated exploration database of more than 6,000 assay intervals from three phases of geological investigation. The principal conclusions are as follows:

(1)The combined Au and Ag grade distributions are strongly positively skewed (skewness coefficients of 217 and 158 respectively), with arithmetic means of 0.37 g/t Au and 14.32 g/t Ag and medians an order of magnitude lower. This extreme skewness requires careful grade capping and compositing prior to geostatistical analysis.

(2)Gold grades display a well-defined spatial structure, with pronounced anisotropy oriented parallel to the N–NE elongation of the principal ore bodies. The orientation of maximum spatial continuity coincides with the dominant sub-meridional fault system, providing direct quantitative evidence for the structural control of gold deposition.

(3)The spatial structure of Au grades is described by a nested spherical variogram model with three components (nugget and two spherical structures), reflecting grade variability at two distinct spatial scales. The maximum correlation range does not exceed 40 m — drill spacings well above this threshold will inadequately capture the spatial variability of the system.

(4)Silver grades show no recoverable spatial continuity. The failure to obtain a stable variogram model for Ag across all tested directions likely reflects the more complex and heterogeneous depositional history of silver, involving multiple mineralising pulses and a broader range of host mineralogy. Inverse distance weighting is therefore the appropriate estimation method for Ag in this deposit.

(5)Model verification through swath plots, scatter plots, and grade-tonnage analysis confirms the internal consistency and geological plausibility of the geostatistical model. The strong agreement between ordinary kriging and IDW estimates ($r \geq 0.90$ across all domains; $r = 0.95$ for ore body 1) demonstrates robust reproduction of spatial grade trends and validates the choice of estimation parameters.

(6)The three mineralised domains exhibit distinct spatial grade populations, with ore body 1 (mean 1.79 g/t Au) being significantly richer and geometrically more continuous than ore body 2 (1.20 g/t) and zone 3 (0.94 g/t). This spatial grade differentiation is interpreted to reflect varying proximity to the principal hydrothermal fluid conduit and/or variations in physico-

chemical precipitation conditions along different structural pathways.

(7)The geostatistical approach applied here demonstrates that spatial analysis of grade variability can yield quantitative insights into the geological controls of epithermal mineralisation that complement and extend traditional geological mapping and logging. The short variogram range, the anisotropy orientation, and the domain-specific grade statistics together define a spatial model of the deposit that can directly inform the design of future exploration programmes. Building a three-dimensional structural model of the deposit is the most important outstanding step for improving the accuracy of grade estimation at *Sedefche*.

Acknowledgements. The authors are grateful to *Gorubso-Kardzhali* JSC and *Seequent Limited* for providing access to the Datamine StudioRM and Leapfrog Geo software licences used in the construction of the three-dimensional models and geostatistical analysis.

References

Bonev, N., Moritz, R., Marton, I., Chiaradia, M., Marchev, P. (2010). Geochemistry, tectonics, and crustal evolution of basement rocks in the Eastern Rhodope massif, Bulgaria. *International Geology Review, 52*, 2, 269–297. https://doi.org/10.1080/00206810902757832

Cekova, D. 1965. Report of the geological mapping of the Zvezdel-Galenit-Pcheloyad project in 1962–1964. Scale 1:5 000. Geofund, Ministry of Environment and Water, Sofia (in Bulgarian).

Dragiev, H., Dragieva, B. (2006). Geological Report with Calculation of Gold-Silver Ore Reserves and Resources as of 01.01.2006 on the *Sedefche* Deposit. Gorubso-Kardzhali JSC, Kardzhali (in Bulgarian).

Georgiev, V. (2012). *Metallogeny of the Eastern Rhodopes*. Academic Publishing House "Prof. Marin Drinov", Sofia, 262 p. (in Bulgarian with extended English summary).

Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 p.

Klimentov, S., Rouskov, K. (2023). 3D geological modelling of ore zones in the *Sedefche* deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 84*, 3, 215–218. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.3.215

Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology, 58*, 1246–1266. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246

Nedyalkov, R., Mavroudchiev, B. (1995). Geochemical and mineralogical peculiarities of the Zvezdel pluton (the East Rhodopes, Bulgaria). *Proceedings of the XV Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association*. Athens, Greece.

Popov, P., Popov, K. (2022). *Metallogeny of Bulgaria*. BMGK Commerce EOOD, Sofia, 426 p. (in Bulgarian with extended English summary).

Sarov, S., Yordanov, B., Georgiev, S., Valkov, V., Balkanska, E., Grozdev, V., Marinova, R., Markov, N. (2008). Explanatory Note to the Geological Map of the Republic of Bulgaria, Krumovgrad Map Sheet. Scale 1:50 000. Ministry of Environment and Water, Bulgarian National Geological Survey, Sofia.

Stein, M. L. (1999). *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*. Springer, New York, 249 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1494-6

Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. 3rd ed. Springer, Berlin–Heidelberg, 388 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF GNSS RECEIVER HEIGHT ON RTK MEASUREMENT ACCURACY

Maryna Kunytska, Oleksand Yanovych

State University "Zhytomyr Polytechnic", 10005 Zhytomyr, E-mail: km_kms@ztu.edu.ua, km_yuoa@ztu.edu.ua

ABSTRACT. This paper presents a comparison of RTK accuracy for two ways of placing a GNSS receiver: on a mini tripod and on a 2 m survey pole with a bipod. The test included 10 control points, three observation sessions, and 180 separate RTK measurements. The results show that the average PDOP value was 1.441 for the mini tripod and 1.390 for the pole with a bipod, while the average number of satellites was 15.844 and 16.222, respectively. The average horizontal precision reported by the controller was 0.007 m for the mini tripod and 0.005 m for the 2 m pole. The average vertical precision was 0.012 m and 0.008 m. The average between-session differences were 0.008 m in plan and 0.012 m in height for the mini tripod, and 0.005 m and 0.008 m for the pole with a bipod. The study shows that a lower antenna height does not seriously worsen satellite geometry, but the 2 m pole provides slightly better repeatability, especially for height.

Key words: RTK GNSS, measurement accuracy, surveying, ground control points, coordinate repeatability.

ОЦЕНКА НА ВЛИЯНИЕТО НА ВИСОЧИНАТА НА GNSS ПРИЕМНИКА ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА RTK ИЗМЕРВАНИЯТА

Марина Куницка, Олександ Янович

Държавен университет "Житомирска политехника", 10005 Житомир

РЕЗЮМЕ. Тази статия представя сравнение на точността на RTK при два начина на поставяне на GNSS приемник: върху мини статив и върху 2-метров геодезически стълб с двунога. Тестът включва 10 контролни точки, три сесии на наблюдение и 180 отделни RTK измервания. Резултатите показват, че средната стойност на PDOP е 1.441 за мини статива и 1.390 за стълба с двунога, докато средният брой сателити е съответно 15.844 и 16.222. Средната хоризонтална точност, отчетена от контролера, е 0.007 м за мини статива и 0.005 м за 2-метровия стълб. Средната вертикална точност е 0.012 м и 0.008 м. Средните разлики между сесиите са 0.008 м в план и 0.012 м във височина за мини статива, и 0.005 м и 0.008 м за стълба с двунога. Проучването показва, че по-ниската височина на антената не влошава сериозно геометрията на спътника, но 2-метровият стълб осигурява малко по-добра повторяемост, особено по отношение на височината.

Ключови думи: RTK GNSS, точност на измерване, геодезия, наземни контролни точки, повторяемост на координатите.

Introduction

RTK GNSS is widely used in topographic, cadastral, construction, and mine survey work because it allows surveyors to obtain coordinates quickly with centimetre-level accuracy. However, real RTK accuracy depends not only on the receiver and base corrections, but also on how the antenna is placed above the point.

In field work, a standard 2 m pole is common. At the same time, compact mini tripods are used more often in rough ground, in areas with bushes, or in hard-to-reach places. They are easier to carry and have a fixed height, but a lower antenna may reduce the view of the sky and increase signal reflection. Therefore, it is important to evaluate how receiver height affects RTK measurement accuracy.

The aim of this study is to evaluate how receiver height affects RTK results by comparing two setups: a Rothbucher mini tripod and a 2 m carbon survey pole with a bipod.

The main tasks were to compare the number of satellites and PDOP, assess horizontal and vertical precision from the controller, calculate between-session coordinate differences, and summarize the practical strengths and limits of both setups.

Theoretical part

RTK GNSS positioning is based on real-time processing of carrier phase measurements, allowing centimetre-level accuracy under favourable conditions. The accuracy of RTK results depends on several factors, including satellite geometry, signal quality, multipath effects, and observation conditions (Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Misra & Enge, 2011).

Satellite geometry is commonly evaluated using the PDOP (Position Dilution of Precision) parameter, which reflects the spatial distribution of satellites. Lower PDOP values indicate better observation conditions and higher potential positioning accuracy (Leick et al., 2015).

In practical surveying, the placement of the GNSS antenna plays an important role in ensuring reliable signal reception. Obstacles such as trees, buildings, and terrain irregularities may cause signal obstruction and multipath effects, leading to reduced accuracy (El-Rabbany, 2002).

The height of the receiver antenna influences the visibility of the sky and the level of signal reflection from surrounding objects. A higher antenna position generally improves observation conditions, while a lower position may increase the risk of signal interference. However, the extent of this influence under real field conditions requires experimental verification.

Therefore, the analysis of receiver height as a factor affecting RTK measurement accuracy is important for optimizing field surveying techniques and ensuring reliable spatial data.

Methodology

The methodology of this study is based on a comparative experimental approach aimed at evaluating the influence of GNSS receiver height on RTK measurement accuracy under real field conditions.

The study was carried out on 10 control points located within an area of approximately 20 hectares. The points were selected to represent typical surveying conditions, including areas with partially obstructed sky visibility due to trees, buildings, and

terrain features. This ensured that the obtained results reflect practical field situations.

Each control point was measured 18 times: 9 times using a Rothbucher mini tripod and 9 times using a 2 m carbon survey pole with a bipod. The measurements were conducted in three observation sessions (29.01.2026 AM, 30.01.2026 AM, and 31.01.2026 PM), resulting in a total of 180 RTK measurements.

A Trimble R10 receiver was used as the base station, while a Trimble R12 receiver was used as the rover. The maximum distance to the farthest control point did not exceed 400 m, ensuring stable RTK corrections throughout the experiment.

Before each measurement, the equipment was carefully repositioned over the control point, and the antenna height was set according to the selected setup. The RTK solution was reinitialized before every observation to ensure independent measurements. Each observation lasted approximately 15 seconds.

During each measurement, the controller recorded key parameters, including horizontal precision, vertical precision, PDOP, and the number of satellites. These indicators were used to evaluate both positioning accuracy and observation conditions.

For the analysis of repeatability, differences between average coordinates obtained in different sessions were calculated for ΔN, ΔE, and ΔH. The horizontal displacement was determined using the expression $\sqrt{(\Delta N^2 + \Delta E^2)}$. Additionally, statistical indicators such as standard deviation and maximum spread were used to assess the stability of the results.

Results and discussion

The analysis of the observation data showed that both receiver setups operated under nearly identical satellite conditions. The average PDOP values were 1.441 for the mini tripod and 1.390 for the pole with a bipod, while the average number of satellites was 15.844 and 16.222, respectively. This indicates that reducing the antenna height did not significantly degrade satellite geometry, which is consistent with the availability of multiple GNSS constellations.

At the same time, the controller-reported precision demonstrated a clear advantage of the standard 2 m pole. The average horizontal precision was 0.007 m for the mini tripod and 0.005 m for the pole, while the vertical precision was 0.012 m and 0.008 m, respectively. Thus, the higher antenna position provides slightly better positioning accuracy in both plan and height components.

A more detailed analysis by observation sessions (Table 1) showed that the third session was characterized by less favorable satellite conditions.

Table 1. *Average RTK values by observation session*

Session	Setup	Hz_Prec, m	Vt_Prec, m	PDOP	Satelli-tes
29.01.2026 AM	Mini tripod	0.007	0.012	1.377	16.633
30.01.2026 AM		0.007	0.011	1.420	16.367
31.01.2026 PM		0.008	0.013	1.527	14.533
29.01.2026 AM	2 m pole + bipod	0.005	0.008	1.327	16.967
30.01.2026 AM		0.005	0.007	1.337	17.067
31.01.2026 PM		0.006	0.008	1.507	14.633

Despite these less favorable conditions, the pole with a bipod maintained better precision, confirming its higher stability in more difficult environments.

The comparison of repeatability indicators (Table 2) further supports this conclusion. The average between-session coordinate differences for the mini tripod were 0.008 m in plan and 0.012 m in height, whereas for the pole these values were reduced to 0.005 m and 0.008 m. Similarly, the average standard deviation and maximum spread values were consistently lower for the pole configuration, especially in the vertical component.

Table 2. Summary of accuracy and repeatability

Indicator	Mini tripod	2 m pole + bipod
Number of control points	10	10
Number of RTK measurements	90	90
Average PDOP	1.441	1.390
Average number of satellites	15.844	16.222
Average controller horizontal precision, m	0.007	0.005
Average controller vertical precision, m	0.012	0.008
Average maximum horizontal spread, m	0.022	0.017
Average maximum height spread, m	0.032	0.024
Average horizontal standard deviation, m	0.008	0.006
Average height standard deviation, m	0.011	0.008
Average between-session horizontal difference, m	0.008	0.005
Average between-session height difference, m	0.012	0.008

These results indicate that the increased antenna height improves the stability of RTK measurements, particularly in terms of height determination. This can be explained by a better observation geometry and reduced influence of local obstacles and multipath effects.

From a practical point of view, both setups remain applicable depending on field conditions. The mini tripod is more convenient in rough terrain, forested areas, or locations with limited accessibility. However, when high repeatability and maximum accuracy are required, especially for control networks or deformation monitoring, the use of a standard 2 m pole with a bipod is preferable.

Conclusion

The conducted study showed that reducing the receiver height does not significantly affect satellite geometry, as the PDOP values and the number of tracked satellites remained similar for both setups. At the same time, the standard 2 m pole demonstrated higher positioning precision and better repeatability, particularly in the vertical component. The between-session coordinate differences and statistical indicators confirmed the greater stability of the pole configuration. Therefore, while the mini tripod can be effectively used in difficult field conditions, the 2 m pole with a bipod is

recommended for tasks requiring higher accuracy and reliability of RTK measurements.

References

Bong, J. H., Kim, D. & Jeong, S. (2023). GNSS performance enhancement using measurement estimation in harsh environment. *PLOS ONE, 18(9)*, 1–21. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292116

Dolgikh, O., et al. (2021). The use of the construction with a digital camera and GPS receiver while researching dangerous areas. *E3S Web of Conferences, 280,* Article 08009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128008009

El-Rabbany, A. (2002). Introduction to GPS: The Global Positioning System. Artech House.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. (2007). GNSS – Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo & more. Springer.

Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. (2006). Understanding GPS: Principles and applications (2nd ed.). Artech House.

Kunytska, M. (2025). GNSS monitoring of quarry side deformations during the development of non-metallic minerals. Technical Engineering, 2(96), 226–230. https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-226-230

Lee, H. S. et al. (2023). Assessing efficiency of GPS ephemerides in different region using precise point positioning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-4/W6-2022, 195–199. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlviii-4-w6-2022-195-2023

Leick, A., Rapoport, L. & Tatarnikov, D. (2015). GPS satellite surveying (4th ed.). Wiley.

Meneses, S. F. M. (2021). Rapid testing: Analysis of GNSS rapid static observations suitability for engineering surveys in urban environments in the time of COVID-19. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-4/W6-2021, 213–218.

Misra, P. & Enge, P. (2011). Global positioning system: Signals, measurements, and performance (2nd ed.). Ganga-Jamuna Press.

Pobihailo, D. P., Kamburov, A. K., & Mitchenko, D. V. (2025). Evaluating the accuracy of GNSS measurements in RTK mode using commercial and non-commercial correction network. *Technical Engineering, 1(95),* 194–205. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-194-205

Yanovych, O. A. & Kotenko, V. V. (2024). Comparative assessment of the application of RTK and non-RTK unmanned aerial vehicle technologies in mine surveying practice with accuracy control based on a geodetic control point network. *Technical Engineering, 1(93),* 415–419. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-415-419

NEW DATA OF FLUORESCENT OPALISED WOOD FROM THE VILLAGE OF DRAGOYNOVO, THE PARVOMAY AREA, BULGARIA

Kamelia Marinova, Elitsa Zareva, Lyubomir Mihaylov, Radostin Pazderov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: k.y.marinova@mgu.bg

ABSTRACT. Fluorescent opalised wood from the vicinity of the village of Dragoynovo (in the area of the town of Parvomay, Bulgaria) is investigated for the first time with respect to its mineralogical characteristics and fluorescence properties. The studied material is associated with sediments of the Dragoynovo Formation in the Eastern Rhodopes. The results provide new insights into the composition and mechanisms controlling fluorescence in differently coloured zones of the opalised wood.

Key words: opalised wood, fluorescence, opal, Dragoynovo Formation, the Rhodopes.

НОВИ ДАННИ ЗА ФЛУОРЕСЦИРАЩО ОПАЛИЗИРАНО ДЪРВО ОТ РАЙОНА НА СЕЛО ДРАГОЙНОВО, ПЪРВОМАЙСКО, БЪЛГАРИЯ

Камелия Маринова, Елица Зарева, Любомир Михайлов, Радостин Паздеров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. За първи път се изследва флуоресциращо опализирано дърво от района на с. Драгойново (Първомайско, България) по отношение на неговите минераложки характеристики и флуоресцентни свойства. Изследваният материал е свързан със седиментите на Драгойновската свита в Източни Родопи. Получените резултати предоставят нови данни за състава и механизмите, контролиращи флуоресценцията в различно оцветените зони на опализираното дърво.

Ключови думи: опализирано дърво, флуоресценция, опал, Драгойновска свита, Родопи.

Въведение

Опалът представлява хидратиран силициев диоксид ($SiO_2 \cdot nH_2O$) и в класификацията на Струнц се отнася към оксидите и хидроксидите. Цветът му е разнообразен: бял, жълт, червен, кафяв, черен и син; блясъкът варира от стъклен до матов; прозрачността от прозрачен до непрозрачен. Опалът най-често се среща под формата на масивни агрегати, притежава мидест лом, твърдостта му е 5,5–6 по Моос, а специфичната плътност 1,9–2,3. Различават се редица разновидности, като хиалит (безцветен с 3–8 % H_2O), люзатит (опал-CT с кристобалит и тридимит), млечен (бял), черен, обикновен (без иризация) и восъчен (жълто-кафяв) опал (Jones & Segnit, 1971; Костов-Китин, 2023). Формира се в утаечни, хипергенни и нискотемпературни хидротермални условия, най-често при екзогенни процеси на разлагане на силикатите. Опализираното дърво представлява вкаменена дървесина, при която органичната материя е заместена или инфилтрирана от опал, като често се запазва първичната структура на органиката.

Флуоресценцията на опала се обуславя от структурни дефекти и примесни елементи (Fe, Mn, уранилови йони и др.), които действат като центрове на луминесценция при ултравиолетово облъчване (Gaft, 2015). Структурните дефекти се определят от вътрешни дефектни центрове в аморфния силициев диоксид, включително центрове на кислороден дефицит (ODC), центрове на не-свързан кислород (NBOHC) и силанол-свързани групи (≡Si–OH) (Carlson et al., 2009).

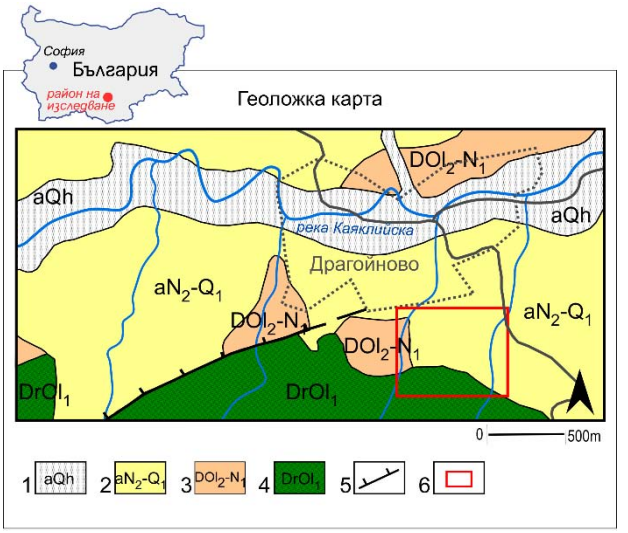
Опализираното дърво от България и в частност от Източните Родопи е описано в работите на И. Костов и др. (1964), Р. Костов и др. (2022), В. Костов-Китин (2023), Цинцов и Банушев (2010) и Банушев и др (2012). В района на с. Драгойново (Първомайско) опализирани дървесни стволове се установяват в рамките на Драгойновската свита (Фиг. 1). Настоящата статия представя резултатите от първото изследване на флуоресценцията и минераложките особености на опализираното дърво от този район, като по този начин допринася с нови данни към проучванията до момента.

Геология на района

В тектонско отношение изследваният район попада в рамките на Моравско-Родопската зона (Дабовски, Загорчев, 2009) и по-конкретно в Рило-Родопската тектонска единица (Източни Родопи). Той е разположен на границата между Боровишката вулкано-тектонска структура и Драгойновското понижение на Горнотракийската депресия (Йорданов и др., 2008а). В южната и югозападната част на района се установяват и продуктите на Драгойненския вулкан. В границите на района се наблюдават скали с палеогенска (Рупел), палеоген-неогенска (Хат–Меот), неоген-кватернерна (Плиоцен–Плейстоцен) и кватернерна (Холоцен) възраст. Рупелските скали принадлежат към Драгойненския вулкански подкомплекс и включват туфозна пачка, представена от незакономерна алтернация на лавобрекчи, пепелни до лапилни туфи и епикластити (Йорданов и др., 2008б). С рупелска възраст са и сиво-зелени до черни, дребно до среднопорфирни латити – лавови потоци, секущи и силоподобни тела. Над тях трансгресивно и несъгласно лежат жълтеникави дебелослоести пясъчници, глини, конгломерати и гравелити с възрастов интервал Хат–Меот от Драгойновската свита (Коюмджиева, Драгоманов, 1979). Те се покриват от алувиални наслаги – чакъли, пясъци, глинести пясъци с плиоценско–плейстоценска възраст,

както и от алувиални наслаги с холоценска възраст – чакъли, пясъци и песъчливи глини.

Непосредствено Ю–ЮИ от с. Драгойново (Фиг. 1) в горните хоризонти на Драгойновската свита в кухини с диаметър до 50-80 cm се установяват силицифицирани дървета, разположени сред едрозърнести псамитни до гравийни, здраво споени дебелопластови туфи (Банушев и др., 2012). При експлозивната дейност е станало бързо погребване на дървесната растителност под пирокластичния материал, при което при създадената редукционна обстановка е било предотвратено развитието на процесите на гниене. Поствулканските хидротермални разтвори, доминиращо със силикатен състав, напълно са заместили органиката, като се е запазила почти изцяло морфологията на дървесните видове. Силицификацията на дърветата е протекла при циркулацията на тези богати на SiO_2 разтвори в алувиално-езерни условия. Движението на разтворите е било насочено към средата с по-ниска концентрация, която в случая се явява органичното вещество на дървесината. По време на последващи процеси материалите, непосредствено обкръжаващи стволовете, са били уплътнени, повторно окварцени и ожелезнени.



Фиг. 1. Геоложка карта на района (по Йорданов и др. к.л. Искра, М 1:50 000)

(Легенда: 1. aQh Алувиални наслаги – руслови и заливни тераси: чакъли, пясъци и песъчливи глини (Холоцен); 2. aN_2–Q_1 Алувиални наслаги: чакъли, пясъци, глинести пясъци (Плиоцен–Плейстоцен); 3. DOl_2–N_1 Драгойновска свита: жълтеникави дебелослоести пясъчници, глини, конгломерати, гравелити (Хат–Меот); 4. $DrOl_1$ Драгойненски вулкански подкомплекс: лавобрекчи и пепелни до лапилни туфи (Рупел); 5. Разломи; 6. Район на изследване.)

Материали и методи

Материалите, предмет на анализ, се характеризират с ясно изразено цветово зониране, вариращо от тъмнокафяво до светлокафяво (Фиг. 2). Подбрани са представителни проби, представящи наблюдаваните цветови вариации, подготвени са прахови и полирани проби за анализ.

Изследвани са флуоресцентните свойства на опализираното дърво в различно оцветените зони при ултравиолетово възбуждане. Емисионните спектри са записани в Институт по оптически материали и технологии “Акад. Йордан Малиновски” при БАН на FluoroLog 3-22, Horiba Jobin Yvon спектрофлуорометър при дължина на вълната на възбуждане 254 nm и 365 nm. Анализът е извършен с цел оценка на връзката между цветовото зониране, минералния състав и луминесцентното поведение.

Минераложката характеристика е допълнена чрез стандартни аналитични методи като рентгенова дифракция (XRD) и сканираща електронна микроскопия (SEM-EDS), позволяващи корелация между състава и флуоресцентните свойства.

Измерванията по време на провеждане на XRD анализа са извършени при следните условия на заснемане на пробите – Апарат Bruker D2 Phaser с лъчение CuKα = 1,54184 при волтаж 30 kV, напрежение 10 mA. Интервал на заснемане 2Θ° = 5° - 90°със стъпка 0,02° и брой на стъпките 4191 за общо време на заснемане 3563,735 s (59 min). Резултатите са интерпретирани със специализиран софтуер DIFFRAC.EVA v.7.0.0.6 и база данни Crystallography Open Database (rev. 287088). Анализите са извършени в „Лабораторията по рентгеноструктурен анализ“ към Геолого-проучвателен факултет при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“.

За определяне на химичния състав и структурните характеристики на изследваните проби е използвана сканираща електронна микроскопия SEM-EDS. Анализите са проведени в „Учебно-изследователската лаборатория по електронна микроскопия“ към Геолого-проучвателния факултет при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“. Анализите са извършени с апаратура JEOL JSM-6010 PLUS/LA, оборудвана с енергийно-дисперсионен спектрометър (EDS).

Фиг. 2. Зонално оцветено опализирано дърво и полирани плочки при LED светлина и UV 365 nm

Резултати

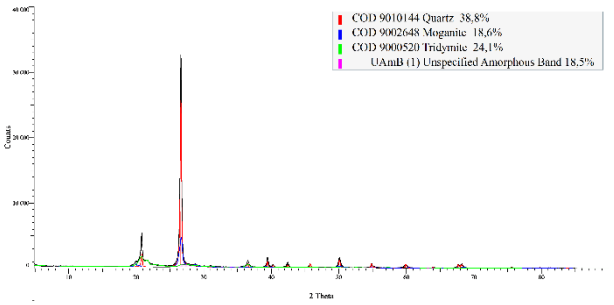
XRD

Проведени са анализи посредством прахова рентгенова дифракция на представителни образци от опализирано дърво. Пробите са разделени на макроскопски принцип, по-конкретно по отношение на оцветяването, на светло- (OWD_L) и тъмнооцветена (OWD_D). След прилагане на профилно апроксимиране е получена качествена и

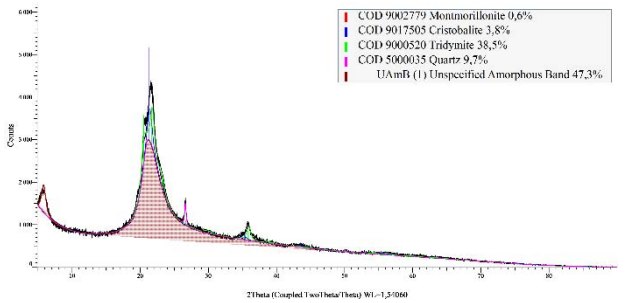
количествена информация за вида на кристалните фази в пробите, както и тяхното процентно съдържание. Също така е определено и количеството на аморфната фаза.

В пробата от тъмнооцветеното опализирано дърво са регистрирани халцедон, тридимит и моганит, съответно със съдържания – 38,8%, 24,1% и 18,6% (Фиг. 3). Неконкретизираната аморфна фаза (UAmB) е със съдържание от 18,5%, най-вероятно съответстваща на опал-А (Jones & Segnit, 1971; Graetsch, 1994), предвид теоретичния състав на пробите.

В пробата от светлооцветен участък от опализирано дърво от същия локалитет се регистрират предимно аморфна фаза (47,3%), тридимит (38,5%), халцедон (9,7%) и монтморилонит (0,6%) (Фиг. 4).



Фиг. 3. XRD анализ на тъмнооцветеното опализирано дърво



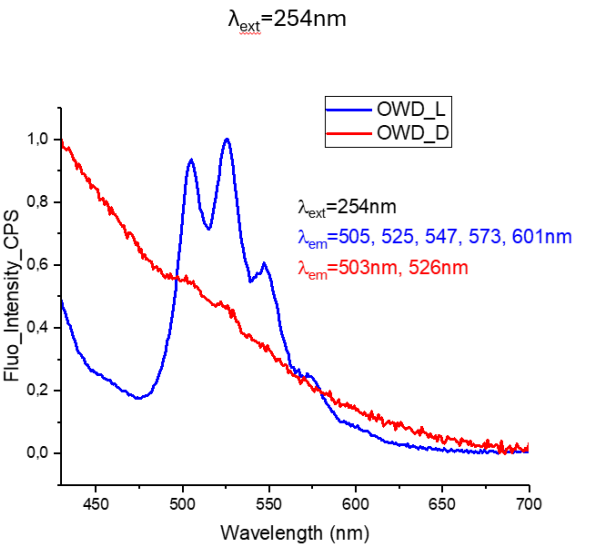
Фиг. 4. XRD анализ на светлооцветеното опализирано дърво

Флуоресцентни спектри

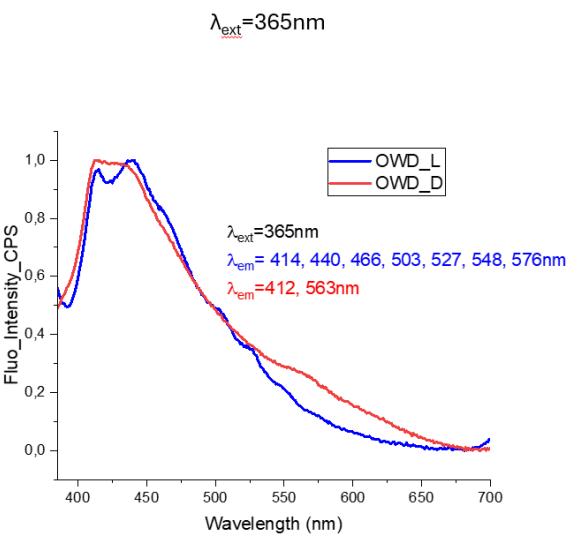
Луминесцентните свойства на изследваните опали OWD_L и OWD_D могат да бъдат интерпретирани на базата на известните механизми за фотолуминесценция в аморфен SiO_2. Луминесценцията на опала обикновено се характеризира с широка емисионна лента в областта ~430–550 nm, която се свързва с вътрешни дефектни центрове в аморфната SiO_2 структура и наличие на елементи примеси (Graetsch, 1994; Carlson et al., 2009; Gaft, 2015; Hennebois et al., 2025).

При светлооцветения опал OWD_L спектрите, възбудени при 254 nm и 365 nm, показват сравнително висока интензивност на емисията (Фиг. 5, 6), което е характерно за доминиране на вътрешни дефектни центрове в SiO_2 структурата. Наблюдаваната широка емисионна лента в областта около 420–520 nm е типична за опал с ниско съдържание на преходни метали и ограничено гасене на луминесценцията (Gaft, 2015). Това може да се свърже с преобладаващата аморфна фаза в състава на OWD_L и по-„чист“ химичен състав определени с XRD и SEM-EDS анализи.

За разлика от него, тъмнооцветения опал (OWD_D) се характеризира с по-ниска интензивност на фотолуминесценцията при 254 nm. Това поведение може да се свърже със значително по-малко количество на аморфната фаза в състава и присъствието на железни примеси, които действат като ефективни центрове на гасене (Lv & Guo, 2023). По-широките и по-слабо изразени спектрални ленти при възбуждане с 365 nm (Фиг. 6) и намаления интензитет се обясняват с по-ниската концентрация на вътрешни дефектни центрове поради повишено структурно подреждане, комбинирано с гасящия ефект на железните йони. Освен това, тъмното оцветяване на пробата допринася за повишена оптична абсорбция, като допълнително потиска наблюдаваната емисия.



Фиг.5. Спектри на флуоресценция на OWD_L и OWD_D при 254 nm

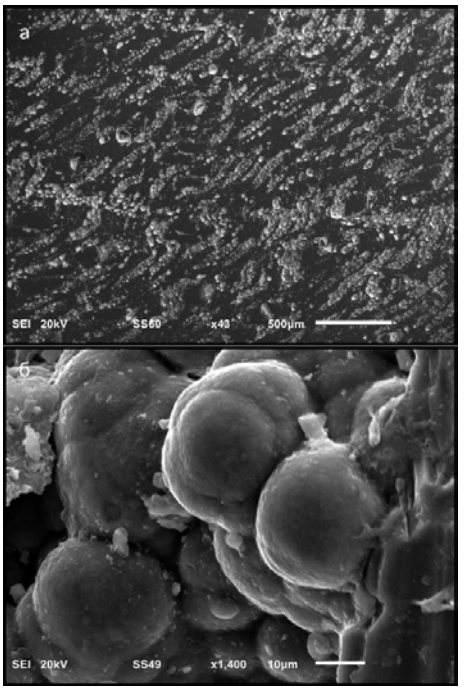


Фиг. 6. Спектри на флуоресценция на OWD_L и OWD_D при 365 nm

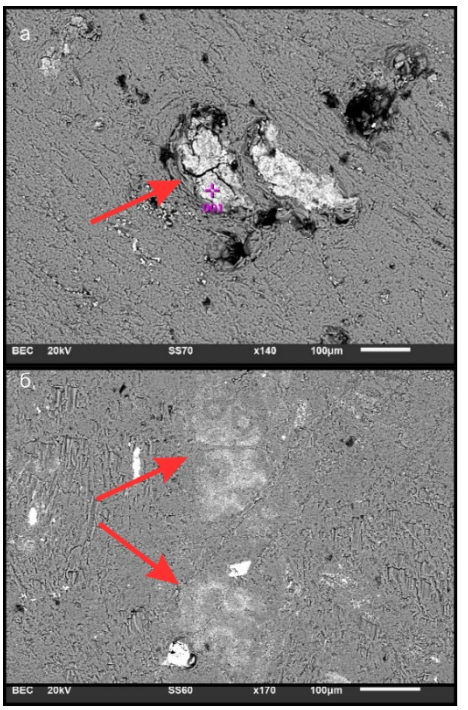
SEM-EDS

Пробите, изследвани чрез сканираща електронна микроскопия, са предварително полирани, без третиране на повърхностите с киселини с цел запазване на естествената структура и порьозност на опализираното дърво. SEM-EDS изображенията показват, че в част от пробите е добре

съхранена първичната органична структура (Фиг. 7а), особено в тъмноцветените участъци. При светлоцветения опал такава структура не се наблюдава, но са налице отворени каверни, в които ясно се разграничават характерните сфери, изграждащи природния опал (Фиг. 7b). Сферите са безпорядъчно разположени с размери до около 25 μm и образуват агрегати. В зони се установяват участъци с импрегнация от железни оксиди (Фиг. 8а) и повсеместно присъствие на ниски съдържания на Fe (Фиг. 8b) средно (около 0,25 mass%).



Фиг. 7. SEM-EDS изображения в а) тъмноцветена зона със съхранена първичната органична структура; б) светлоцветена зона изградена от сфери



Фиг. 8. SEM-EDS изображения с участъци набогатени на железни оксиди

Заключение

Проведеното XRD изследване на опализирано дърво от района на с. Драгойново разкрива съществени различия в минералния състав на различно оцветените зони. Тъмноцветените участъци съдържат по-високи количества кристални силициеви фази (халцедон, тридимит и моганит), докато при светлите зони преобладава аморфната фаза.

Флуоресценцията в изследвания опал се обяснява с наличие на дефектни центрове в аморфната силициева структура, които са добре известни като основни източници на фотолуминесценция в SiO_2. Слабата флуоресценция в тъмния опал (~18% аморфна фаза) вероятно се дължи на ограничено количество дефектни центрове в силициевата структура, наличието на Fe примеси и повишената оптична абсорбция, които водят до значително гасене на луминесценцията. Спектрите на OWD_L, се характеризират с по-висока интензивност. Подобно поведение се свързва с опали с ниско съдържание на примеси, при които липсва ефективно гасене на луминесценцията. За разлика от него, спектрите на OWD_D показват по-ниска интензивност, подобни характеристики се свързват с присъствие на железни примеси, които действат като ефективни гасители.

SEM-EDS анализите потвърждават наличието на добре съхранена първична органична структура в тъмните зони, както и локална импрегнация с железни оксиди.

Тези резултати показват, че фотолуминесценцията в изследваните проби опализирано дърво вероятно е контролирана предимно от емисия, свързана с дефектите в аморфната силициева структура, докато примесите като Fe играят второстепенна роля чрез модифициране или гасене на луминесценцията. Флуоресценцията се явява чувствителен индикатор за тези различия и може да се използва като допълнителен диагностичен метод. В съчетание с XRD и SEM-EDS са получени нови данни за опализираното дърво от района на с. Драгойново, Първомайско.

Благодарности

Представените резултати са получени в рамките на проект за № ГПФ-264/30.03.2026 г. „Минераложка и спектроскопска характеристика на флуоресциращо опализирано дърво от района на с. Драгойново“.

Литература

Банушев, Б., Приставова, С., Костов, Р., Паздеров, Р., Цанкова, Н., Раева, Е., Малинова, С. (2012). *Практическо ръководство по минералогия и петрография*. Издателство “Свети Иван Рилски”, 144 стр.

Дабовски, Х., Загорчев, И. (2009). Алпийска тектонска подялба на България. В: И. Загорчев, Х. Дабовски & Т. Николов (Ред.), *Геология на България. Част II, Мезозойска геология*. Изд. “Проф. Марин Дринов”, София, 30–37.

Йорданов, Б., Саров, С., Георгиев, С., Г. Добрев, Г., Грозев, В., Балканска, Е., Московска, Л. (2008а). *Геоложка карта на Република България, М 1:50 000, К-35-75-А (Искра).* София, Министерство на околната среда и водите, Българска национална геоложка служба.

Йорданов, Б., Саров, С., Георгиев, С., Янев, Й., Вълков, В., Грозев, В., Балканска, Е., Маринова, Р., Марков, Н.

(2008б). *Обяснителна записка към геоложката карта на Република България, М 1:50 000, К-35-75-А (Искра).* Министерство на околната среда и водите, Българска национална геоложка служба, 95 стр.

Костов, И., Бресковска, В., Минчева-Стефанова, Й., Киров, Г. (1964). *Минералите в България*. Издателство на БАН, София, 540 стр.

Костов, Р., Богданов, К., Атанасова, Р., Василева, Р., Нешева, Л. (2022). *Минералите на България*. София: Мултипринт, 337 стр.

Костов-Китин, В. (2023). *Енциклопедия Минералите в България*. Акад. Издат. „Проф. Марин Дринов“, 928 стр.

Коюмджиева, Е., Драгоманов, Л. (1979). Литостратиграфия на олигоценските и неогенските седименти от Пловдивско и Пазарджишко. *Палеонт., стратигр. и литол*. 11, 49–61.

Цинцов, З., Банушев, Б. (2010). *Ахатите в България*. Изд. Ваньо Недков, 210 стр.

Carlson, G., Keister, K., Croteau, A., Eden, J., Dragic, P. (2009) Defect center luminescence spectroscopy in Yb Co-doped silica fibers. *Technology, Systems, and Applications*, Proc. SPIE 7195, Fiber Lasers VI. https://doi.org/10.1117/12.809510

Gaft, M., Reisfeld, R., Panczer, G., (2015). *Modern Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials (2nd ed.).* Springer Mineralogy. 606 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24765-6

Graetsch, H. (1994). *Structural characteristics of opaline and microcrystalline silica minerals*. In: Heaney, P.J., Prewitt, C.T., Gibbs, G.V. (Eds.), Silica: Physical Behavior, Geochemistry and Materials Applications. Reviews in Mineralogy, Vol. 29, Mineralogical Society of America, 209–232.

Hennebois, U., Karampelas, S., Fritsch, E., Vigier, M., Mevellec, J., Stephant, N., Dartois, Q., Delaunay, A. (2025). *Gemmological Properties of Opals from Spencer*, Idaho, USA. Minerals, 15, 258. https://doi.org/10.3390/min15030258

Jones, J.B., Segnit, E.R. (1971). The Nature of Opal. I. Nomenclature and Constituent Phases. *Journal of the Geological Society of Australia*, 18, 1, 57–68. https://doi.org/10.1080/00167617108728743

Lv, H., Guo, Y. (2023). Genesis of the Body Color of Brazilian Gem-Quality Yellow-Green Opal. *Crystals*, 13, 316. https://doi.org/10.3390/cryst13020316.

Strunz, H., Nickel, E.H. (2001). *Mineralogical Tables: Chemical-Structural Mineral Classification System*. 9th ed. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 870 pp. ISBN 978-3-510-65188-7.

POTENTIAL SOURCES AND GEOLOGICAL SETTING OF “WHITE” HYDROGEN FOR FUTURE EXPLORATION IN BULGARIA

Gergana Meracheva, Efrosima Zaneva-Dobranova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: gergana_meracheva@mgu.bg

ABSTRACT. This study provides a preliminary assessment of the geological potential for natural hydrogen (also known as white, or geological hydrogen) exploration in Bulgaria by integrating published datasets, well information, and regional geological analysis. The evaluation targets a variety of geological settings in which hydrogen-rich gases may occur, including ophiolites, rift zones, faults, geysers, hot springs, etc. These settings, which are characterised by deep-rooted fault systems, tectonic boundaries, and elevated geothermal gradients, are recognised as first-order controls on crustal fluid circulation and gas transport. Serpentinised ultramafic rocks are highlighted as a potential source of hydrogen, which is produced through serpentinisation. Structurally focused zones may support vertical migration of fluids from deep hydrogen sources. Uranium mineralisation and clay-hosted deposits indicate sustained fluid flow, as radiolysis in crystalline rocks is considered a major hydrogen generation mechanism. Both hydrogen (H_2) and helium (He) gases are released during water radiolysis. Hydrogeochemical evidence indicates the presence of dissolved H_2 (3–4%) and He (0.8–1.2%) in several regions, supporting the presence of active deep fluid systems. The findings indicate that Bulgaria has promising geological conditions for natural hydrogen exploration, especially in fault-controlled hydrothermal systems and serpentinised complexes. Further work should integrate gas geochemistry, isotopic analyses, and advanced geophysical methods to identify and rank white hydrogen prospects.

Key words: natural hydrogen, geological settings, Bulgaria.

ПОТЕНЦИАЛНИ ИЗТОЧНИЦИ НА „БЯЛ“ ВОДОРОД И ГЕОЛОЖКИ ПРЕДПОСТАВКИ ЗА ПРОУЧВАНЕ В БЪЛГАРИЯ

Гергана Мерачева, Ефросима Занева-Добранова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящото изследване представя предварителна оценка на геоложкия потенциал за проучване на естествен (известен също като бял, или геоложки) водород в България чрез интегриране на публикувани литературни данни, информация от сондажи и регионален геоложки анализ. Оценката е насочена към различни геоложки условия, където могат да бъдат открити богати на водород газове, като офиолити, рифтови зони, разломи, гейзери, горещи извори и т.н. Тези условия, които се характеризират с дълбокозаложени разломни системи, тектонски граници и повишени геотермални градиенти, се считат за фактори от първи ред относно циркулацията на флуидите в земната кора и придвижването на газ. Серпентинизираните ултрамафични скали са доказани като потенциален източник на водород (H_2) чрез серпентинизация. Структурно фокусираните зони могат да поддържат вертикална миграция на флуиди от дълбочинни източници. Урановата минерализация и глинестите находища показват устойчив флуиден поток, тъй като се смята, че радиолизата в кристалинните скали е основен механизъм за генериране на водород. Както H_2, така и хелиеви (He) газове се отделят по време на процесите на радиолиза. Хидрогеохимичните данни показват разтворен H_2 (до 3–4%) и He (0,8–1,2%) в няколко региона, което се интерпретира като белег за активни дълбочинни флуидни системи. Резултатите показват, че България притежава благоприятни геоложки условия за проучване на естествен водород, особено в контролирани от разломните хидротермални системи и серпентинизирани комплекси. По-нататъшната работа трябва да съчетава газо-геохимични и изотопни анализи, хидрогеоложки проучвания и съвременни геофизични методи за идентифициране и класиране на перспективни зони за бял водород.

Ключови думи: бял водород, геоложки условия, България.

Introduction

The increasing worldwide energy demand and global efforts to transition from fossil fuels to renewable energy sources can be addressed by hydrogen gas as a key solution. Natural hydrogen (H_2), also called geological, or “white” hydrogen, compared to the existing black, grey, blue, pink, and green hydrogen, is seen as a potentially cheaper alternative with a minimal carbon footprint.

In recent decades, H_2 has been actively explored in North America, Asia, Africa, and Australia (Tian et al., 2022), with significant quantities found in Mali's Baurakebougou field, Albania's Bulqize chromite mine, France's Lorraine mining basin, and Turkey's Chimaera, and the data and experience have only been increasing. After decades of focusing on natural hydrogen as an exploration target, most publications indicate that data collection methods, interpretation techniques, and workflows—primarily developed by the hydrocarbon industry over the past century—could be effectively adapted to locate natural hydrogen in the subsurface (Levy et al., 2023; Jackson et al., 2024; Elis, 2025).

The main goal of the study is to provide a preliminary assessment of the geological potential for natural hydrogen exploration in Bulgaria by integrating published datasets, well information, and regional geological analysis.

Methods

After a fairly detailed literature review of recent publications and articles, and based on the global experience of H_2 exploration in many regions of the world, the methodology adopted and undertaken in this research is based on what was suggested in the workflow of previous studies (Levy et al., 2023) to efficiently explore this new resource, starting with pre-fieldwork consisting of identifying H_2 hotspots.

This pre-fieldwork includes a comprehensive review and analysis of all available data that could indicate the presence of H_2, such as seepage or H_2 measurements in water sources or wells, typically collected for other purposes. It also involves identifying hydrogen source rocks at different scales, like country or basin levels, to select and define promising exploration areas.

Geological setting of the natural hydrogen sources and occurrences

A play-based approach, which adopts concepts and methods proven in petroleum exploration, is proposed for broad application in H_2 resource exploration (Elis, 2025). Consequently, this adaptation to a hydrogen system, involving presumed elements and processes such as source rocks, reservoirs, seals, traps, and migration pathways (Fig. 1), requires careful analysis. To target locations where H_2 can be abundant, it is important to first define the processes that generate it.

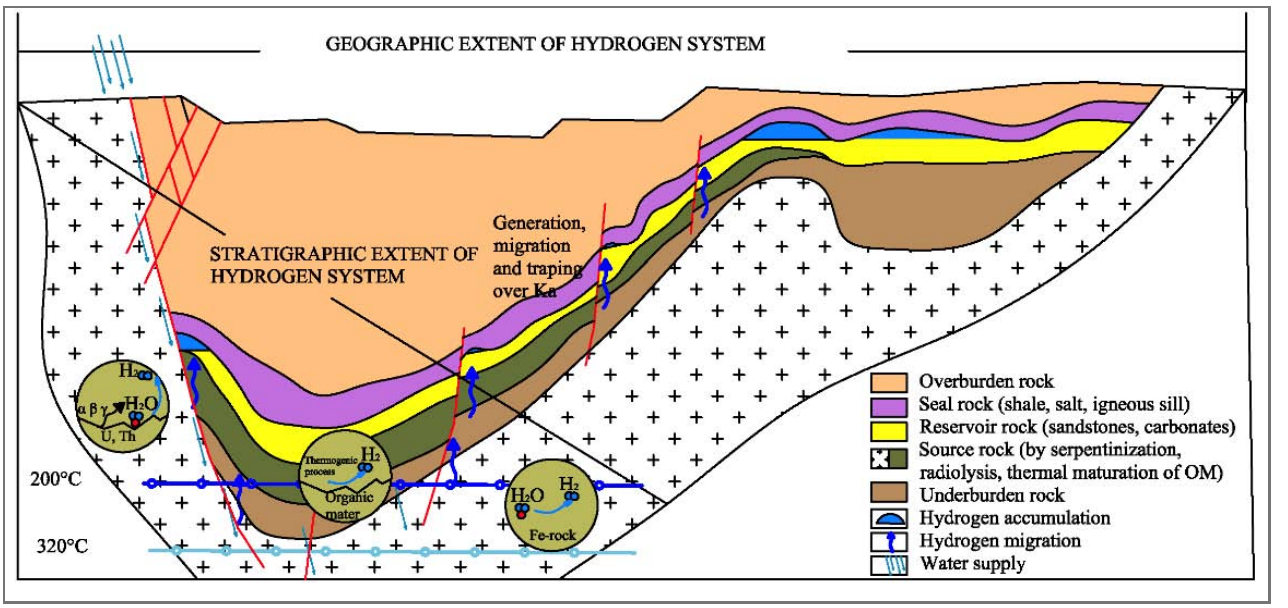


Fig. 1. Hydrogen system approach

Various hypotheses exist regarding the origin of H_2 (Zgonnik, 2020; Shestopalov, 2020), but it is generally believed to originate from either abiotic or biotic sources. Abiotic hydrogen production in the Earth’s crust happens over a wide temperature range, above 600 °C, whereas biotic processes are limited to cooler environments that support life. It is assumed that there are several mechanisms for hydrogen generation:

1) Deep-seated hydrogen—either primordial from the core or mantle, or produced in the lower crust by degassing processes;

2) Water-rock reactions, such as the reduction of water during the oxidation of iron-rich minerals, with processes like serpentinisation of ultramafic rocks thought to produce substantial hydrogen amounts. This process occurs mainly at mid-oceanic ridges at temperatures between 150 °C and 350 °C, and onshore in ophiolites at lower temperatures. Other sources include siderite deposits, biotite, peralkaline granites, and banded iron formations, although their hydrogen-generating potential is constrained by certain factors;

3) Radiolysis or water breakdown through natural radioactivity, involving elements like uranium, thorium, and potassium present in the Earth’s crust;

4) Thermal maturation of high-rank organic matter in organic-rich rocks. Mechanoradical processes and geothermal areas could also contribute to the generation and exploration of natural hydrogen.

Results and discussions

The study begins with an overview of lithologies conducive to H_2 production to identify key regions of interest in Bulgaria. The tracers are then presented, indicating the presence of H_2.

Natural hydrogen generated by the water-rock reaction

The analysis suggests that the primary sites for H_2 exploration are likely to be those connected with ophiolite associations. The geological environments and geotectonic settings of the Balkan Peninsula are essential for understanding the region's behaviour and evolution. Previous studies (Schmid et al., 2008; Spiridonov, 2020) highlight notable similarities in emplacement mechanisms and characteristics typical of the Tethyan ophiolites (obduction) type of geotectonic settings (Jackson et al., 2024), which occur when oceanic lithosphere, formed in a fore-arc or back-arc, known as a supra-subduction zone (SSZ) setting, is obducted over a continental passive margin that has failed or is failing to subduct (Fig. 2A). The Tethyan obduction type highlights promising ophiolite associations for H_2 exploration on the Balkan Peninsula, shaped by the subduction-collision dynamics between the Eurasian and Apulian plates and the extensive Vardar-Izmir-Ankara suture (Spiridonov, 2020). Several ophiolite complexes extending from west to east have been identified, sharing similar features (Fig. 2B) and spanning the territories of Albania, Kosovo, Bosnia and Herzegovina, Serbia, Greece, Turkey, and Bulgaria. Ophiolites occur in the Dinarides, the Vardar zone, the Circum-Rhodope belt, around the periphery of the Rhodope massif, and to the south of the Rhodopes. To the east, they extend into the Tavshanli zone, south of the Vardar-Izmir-Ankara suture.

Based on this geological data, in the study, specific regions within Bulgarian territory are identified where the spatial surface distribution of H_2-producing rocks – comprising slices of oceanic lithosphere onto the continent known as ophiolites – could undergo serpentinisation. Even if the ophiolites occupy small areas on the land scale compared to mid-oceanic ridges, they have a huge potential for serpentinisation and therefore H_2 generation.

The Balkan-Carpathian ophiolite segment. The Balkan-Carpathian segment (Haydoutov, 1991) comprises a complex assemblage of lower-grade ophiolite massifs across Romania, Serbia, and Bulgaria, formed in a mid-ocean ridge setting, with the protolith dated to 563 million years ago. Key ophiolite massifs within this segment include Tcherni Vrach, Zaglavac, Deli Jovan, and South Banat, which feature structures, such as pillow lavas, pyroxenites, and gabbro-porphyrite dikes. These ophiolites, shaped by ocean-floor metamorphism and obduction alongside an island-arc association in the subduction zone, highlight intricate geological processes. Stratigraphically, the ophiolite formations in NW Turkey are similar to those in the Balkan-Carpathian region. The South Banat ophiolite massif, located at the northwestern edge of the Carpathian-Balkan segment, is thought to predate the Early Caledonian period and comprises two main rock types: ultramafic tectonites and cumulative gabbros mingled with ultramafic rocks throughout the ophiolite profile.

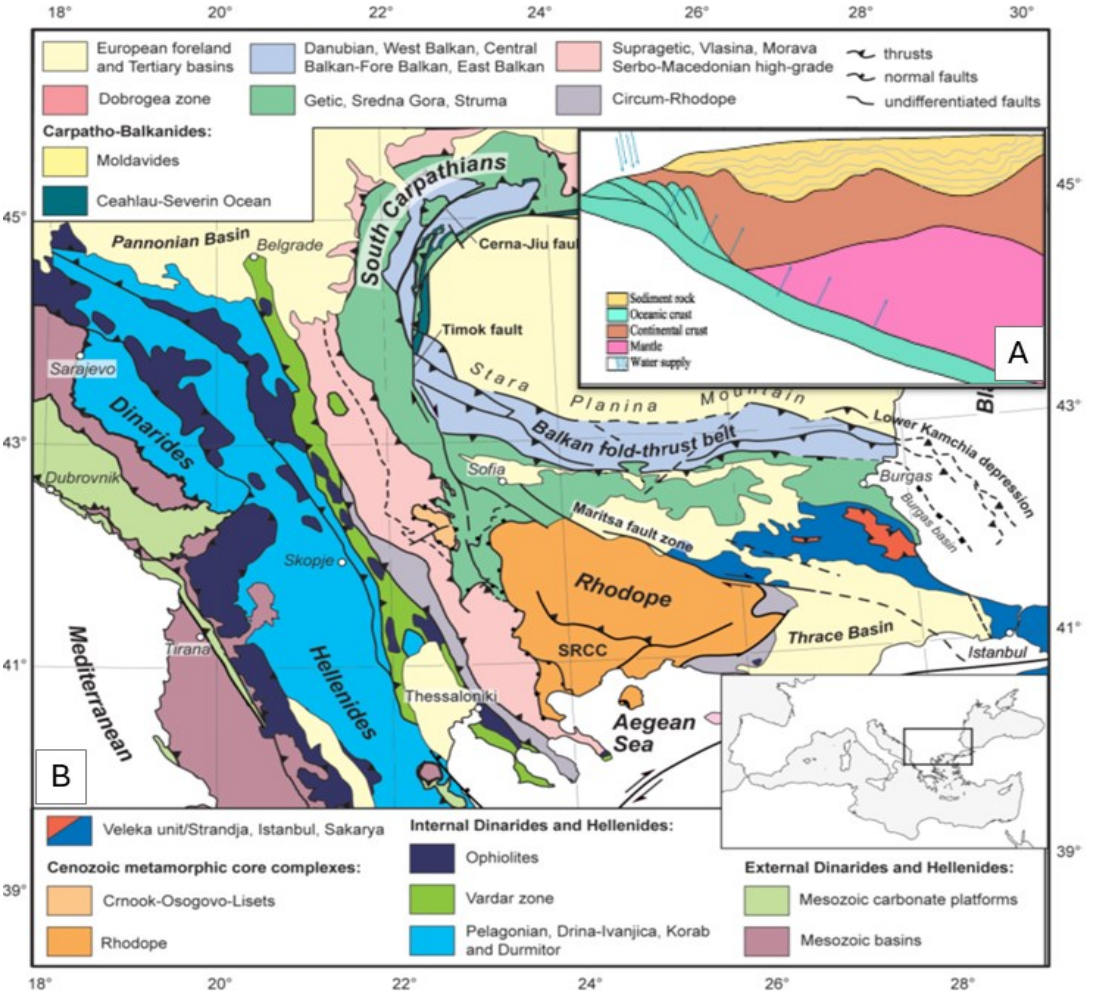


Fig. 2. Natural hydrogen potential ophiolite complexes in the Balkan Peninsula: A) Tethyan ophiolite obduction zone type geotectonic setting (modified after Jackson et al., 2024)**, B) Tectonic map (**modified after Schmid et al., 2008)

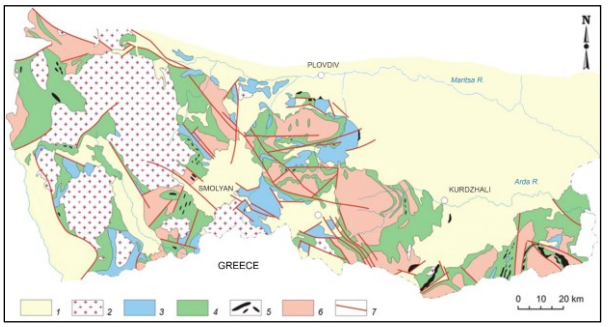


Fig. 3. Geological map of the metamorphic complex in the Rhodope Massif (modified after Kozhoukharova, 2021)
1, Cenozoic; 2, granites; 3–5, Rhodopian Group (3, marbles, 4, variegated formation with ophiolites, 5, serpentinites); 6, Prarhodopian group (gneisses, granite-gneisses, migmatites); 7, faults

The Rhodope ophiolite association. Tectonically, this area encompasses the eastern part of the Rhodope Massif, which is part of the Moravian-Rhodope tectonic unit (Fig. 3). Within the Rhodope Massif, the Proterozoic metamorphic complex, which is part of the general stratigraphic sequence of the crystalline basement, is included. The latter represents a single stratigraphic unit comprising two rock complexes of different ages and lithologies: the lower, the Prarhodopian Supergroup (PRS), and the upper, the Rhodope Supergroup (RS). The Rhodope Ophiolite Association has formed in a Neoproterozoic supra-subduction zone (SSZ) in three stages (Kozhoukharova, 2021):

a. serpentinisation at the ocean floor;

b. obduction of serpentinite fragments, scraped from a soft and plastic hydrated coat of the sliding ultramafic plate;

c. SSZ-type autochthonous Neoproterozoic basic volcanism, including and covering serpentinite bodies. This determines the heterogeneous nature of the ophiolite association, elements of which are the serpentinites (Fig. 3).

The Proterozoic metamorphic complexes of the Rhodope Massif include many serpentinite bodies that vary in size, from small lenses of several metres to huge lenticular bodies up to 10–12 km long and 300–500 m wide. The largest outcrops are found in the Eastern Rhodopes and are composed of lizardite, chrysotile, and antigorite, which are highly hydrated and contain relics of olivine and bastite. This preserved paragenesis (Kozhoukharova, 2021) indicates that low-temperature metamorphic processes occurred in an SSZ, during which serpentinisation (hydration) of primary peridotites took place. Hence, the source/protolith of these serpentinites has been ultramafic rocks – peridotites.

Natural hydrogen generated by the radiolysis of water

The radiolysis of water within the lithosphere is another key process for generating natural hydrogen. Many radioactive elements, such as uranium, thorium, and potassium, in the Earth’s crust can release alpha, beta, and gamma rays during radioactive decay, and the energy released decomposes water molecules into oxygen and hydrogen. Notably, brine can generate more hydrogen than pure water. This process might occur everywhere, but at different intensities. Considering that rocks capable of producing H_2 through water radiolysis are associated with uranium provinces, the study briefly synthesises the U deposits in Bulgaria. Uranium mining in Bulgaria was a major industry in the past, with 48 primary mines and over 30 exploration sites, heavily concentrated in Southern Bulgaria, the Rhodopes, and near Sofia. Key areas include the Buhovo-Seslavtsi region (near Sofia), the Central Rhodopes (Narechen, Smolyan), and deposits along the Maritsa, Tundzha, and Struma rivers.

Based on the geological background and the distribution characteristics of various uranium deposit types in Europe, Wang et al. (2024) describe several uranium metallogenic provinces, including the Balkan-Rhodope uranium metallogenic belt. The metallogenic belt in Bulgaria is distributed across various regions, with uranium mineralisation mainly found in the West Balkan Mountains, central and western Rhodope Massifs, and the Thrace Basin. The area's basement comprises Precambrian and Cambrian metamorphic rocks and Variscan granite, while the basin consists of Paleogene volcanic sediments overlaying Neogene sediments. The structures are complex, with the ancient basement heavily reworked during the Variscan orogeny and intruded by numerous granitic rocks. The later Alpine movements further restructured the belt, creating small intermountain basins and a significant volcanic-sedimentary activity. There are three main types of uranium mineralisation:

1) Sandstone type, mainly in Cenozoic intermontane basins, where volcanic tuffaceous sediments provide sufficient uranium to sustain mineralisation. At the same time, the formation of some uranium mineralisation was modified by hydrothermal activity during the later stage of volcanic activity, which further activated and remobilised uranium in the stratum, accompanied by the formation of green altered rock and a large number of clay minerals (chlorite and montmorillonite).

2) Granite-related or metamorphic type, found near contact zones of Variscan granitic rocks, with mineralisation developing from the late Jurassic to the late Early Cretaceous. High-grade mineralisation formed by hydrothermal remobilisation of early rocks, and in some deposits with black schist as the host rock (such as Buhovo), uranium precipitation may be related to the high organic matter content of these schists.

3) Volcanic-related mineralisation occurs in Cenozoic volcanic rocks, such as the Smolyan deposit on the southwestern Rhodope Massif, with mineralisation in rhyolite, tuff, and other volcanic rocks. The Rosen deposit in Eastern Bulgaria is associated with volcanic rocks of the monzonite-gabbro-syenite intrusion, dating to the late Cretaceous-Palaeocene. Additionally, uranium mineralisation occurs in Upper Eocene to Lower Oligocene volcanic sediments within Cenozoic basins.

Natural hydrogen generated by the maturation of organic matter

It is suggested (Hanson and Hanson, 2024) that an overlapping set of thermo-catalytic processes produces hydrocarbons (HC) and H_2. Initially, clay reacts with kerogen, producing HC, H_2, and amorphous carbon. The alteration of clays releases hydronium. During the late catagenic phase, thermo-catalysis of HC by amorphous carbon yields shorter-chained HC and H_2, whilst amorphous carbon degrades to carbon black. During the expulsion of HC and H_2, the permeability of the source rock becomes more heterogeneous, thereby isolating some reactants and creating pyrobitumens and other carbonaceous materials. At higher temperatures during metagenesis, isolated pyrobitumens and other carbonaceous materials in shales are converted to graphite, releasing gaseous HC and, in a second phase, diatomic H_2 via thermo-catalytic reactions with carbon black. This matches the temperatures and results observed in laboratory experiments and petrochemical processes used to generate H_2. The current conclusion of the HC generation story at the methane preservation limit should be recognised as the start of H_2 generation, with graphitisation marking the end of the process (Fig. 4a).

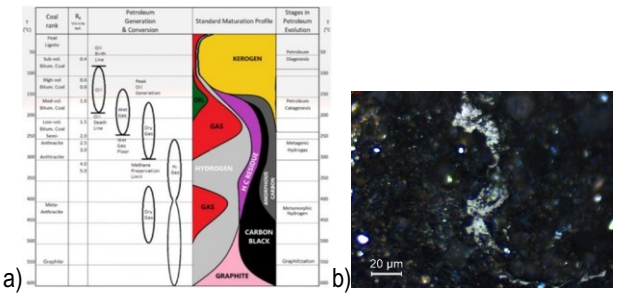


Fig. 4 a) Hydrocarbon model with addition of hydrogen (Hanson & Hanson, 2024)**; b) Photomicrographs of pyrobitumen from shale samples with Silurian age in NE Bulgaria**

Based on the results of our previous studies in Eastern Bulgaria, where geochemical and petrographic methods are combined to determine thermal maturity, we have established that most shale rocks in the Silurian sequence are mature or overmature. On the polished section of a few representative samples from these shale rocks, dark-coloured organic matter and pyrobitumen are observed (Fig. 4b). In this context, pyrobitumen formation is considered to correspond to the exact maturity range over which late dry gas generation occurs. It is considered that the exclusive generation of molecular hydrogen from overmature organic matter occurs after late gas generation has ceased. This gives us reason to assume that these areas

also appear promising for assessing the potential for H_2 generation.

Natural hydrogen generated by other processes

In addition to the three key abiotic processes for hydrogen generation mentioned above–serpentinisation, water radiolysis, and reactions involving dissolved magmatic gases—the fourth is mechanical and occurs in geological fault zones. This process occurs whenever silicate rocks are crushed. During cataclasis, hydromechanical reactions break chemical bonds, generating radicals that interact with groundwater to produce hydrogen. Based on an analysis of geological settings, attention should be directed to regions characterised by extensive fault systems and tectonic contact zones, which may serve as conduits that facilitate the migration of deep-seated fluids and gases.

Indicators of the natural hydrogen presence

After identifying potential zones of interest for H_2 generation, attention is focused on those that are targets for H_2 production, and data from the available literature are analysed. Some interesting findings indicate the direct presence of H_2 in hydrocarbon exploration wells, and different dissolved gas emissions are observed across several boreholes. Besides seeking rocks rich in uranium and thorium minerals, the most effective way to detect radiolysis might be to search for helium, since crustal helium can only originate from radioactive activity.

According to the reviewed literature, a wide area in Northeast Bulgaria, within the broader structural zone at the junction between the Fore-Balkan and the Moesian Platform, contains elevated concentrations of dissolved and free gases (Bokov and Chemberski, 1987), including a significant helium component. In selected intervals from wells in adjacent structural zones, helium contents of approximately 0.8–1.2% have been reported. According to the literature, transition zones commonly act as preferential pathways for the upward migration of deep-seated fluids and gases. These values clearly suggest a significant involvement of deep gas sources and an active link between subsurface geological environments and surface fluid systems. Likewise, hydrogen has been detected in dissolved gases in brine waters at concentrations of around 3–4%, and traces of H_2 are found in all analysed samples. This is a particularly important result, as it suggests that hydrogen is not an isolated local anomaly but a recurring feature of the investigated fluid system. The simultaneous presence of helium and hydrogen, whether free or dissolved, is highly significant, as it suggests a broader deep-fluid circulation system rather than a single, localised gas manifestation. It is found that the measured free hydrogen content varies widely across different areas within the same geological setting and at different depths, with the minimum content being only a few digits and the maximum exceeding 90%. Natural hydrogen as a dissolved gas in groundwater has been observed in many cases. The results show that the hydrogen content in groundwater ranges from trace to tens of per cent, with higher values in areas associated with deep faults and rift zones.

Conclusion

In conclusion, this preliminary assessment indicates that Bulgaria has favourable geological conditions for the generation and potential accumulation of natural hydrogen. The most promising settings include ophiolite and serpentinite-bearing zones where water–rock reactions may occur, uranium-rich provinces where radiolysis can contribute to hydrogen production, mature organic-rich formations, and major fault systems that can support both generation and migration. The reviewed geological, geochemical, and well data suggest that hydrogen occurrences in Bulgaria are not isolated anomalies but part of broader subsurface fluid systems with real exploration significance. Although no confirmed reserves can yet be defined, the results provide a strong basis for future work and support the development of an integrated exploration workflow that combines geological analysis, subsurface data, gas measurements, and remote-sensing methods to identify and prioritise the most prospective target areas.

References

Bokov, P. & Chemberski, H. (Eds.). (1987). *Geolozhki predpostavki za neftogazonosnost na severoiztochna Bulgariya*, Tehnika, Sofiya, 332 p.

Ellis G., Natural Hydrogen: An Overlooked Potential Energy Resource, Natural Hydrogen Workshop in Japan, February 14, 2025.

Hanson, J. & Hanson, H. (2024). Hydrogen’s organic genesis, *Unconventional Resources, 4*, 100057, https://doi.org/10.1016/j.uncres.2023.07.003

Haydoutov, I. (1991). *Proizhod i evolyutsiya na Dokambriyskiya Balkano-Karpatski ofiolitov segment*, Izdatelska kushta BAN, Sofia.

Jackson O., Lawrenece S., Hutschinson I., Stocks A., Barnicoat A., & Powney M. (2024). Natural hydrogen: sources, systems and exploration plays, *Geoenergy, 2*, 1-21.

Kozhoukharova, E. (2021). Precambrian obducted serpentinites in the Rhodope Massif, *Rev. Bulg. Geol. Soc., 82(1)*, 63-73

Lévy, D., Roche, V., Pasquet, G., Combaudon, V., Geymond, U., Loiseau, K., & Moretti, I. (2023). Natural H_2 exploration: tools and workflows to characterise a play. *Science and Technology for Energy Transition, 78, 27,* 1–34. https://doi.org/10.2516/stet/2023021

Shestopalov, V. M. (2020). O geologicheskom vodorode, *Geofizicheskiy zhurnal, 6, 42*, 3-35, DOI: https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278

Schmid, S., Bernoulli, D., Fugenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., & Ustaszewski, K. (2008). The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J. Geosci., 101*, 139-183. Doi 10.1007/s00015-008-1247-3

Spiridonov, H. (2013). Geodinamika na Bulgaria. Chast II, *BAN, Problemi na geografiyata, 3-4*, 1-35.

Tian, Q., Yao, S., Shao, M., Zhang, W., Wang, H. (2022). Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of “carbon neutrality”. *China Geology, 5*, 722-733

Wang, Z., Song, H., Chen, Y., Song, J., Hou, M., Li, Q., Du, Q. & Yu, H. (2024). Uranium resource of Europe: Development status, metallogenic provinces and geodynamic setting, *Energy Strategy Reviews, 54*, 101467, DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101467

Zgonnik V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, *Earth Science Reviews, 203*, 103140, 1-51.

GEOPHYSICAL METHODS FOR EFFECTIVE PLANNING AND OPTIMISATION OF MINERAL RESOURCE EXTRACTION IN THE CONTEXT OF CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABLE RISK MANAGEMENT

Bogdana Milenković

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: b.milenkovic@mgu.bg

ABSTRACT. This paper examines the role of geophysical methods in the efficient planning and optimisation of mineral resource extraction within the framework of circular economy and sustainable risk management. The main geophysical methods are analysed as non-destructive tools for subsurface investigation, providing reliable information on geological structures and the physical properties of the rock mass. The study demonstrates that the integration of geophysical data into mine planning improves the accuracy of deposit modelling, supports selective mining, reduces investment costs, and limits the generation of mining waste.
Special attention is given to the application of geophysics in managing geological, geomechanical, hydrogeological, and environmental risks through continuous monitoring and early detection of potentially hazardous processes. The relationship between geophysical methods and circular economy principles is also discussed, including the re-evaluation of tailings storage facilities and mining waste in order to enhance resource efficiency. Examples from the Bulgarian mining practices are presented, highlighting the importance of geophysics as a strategic tool for improving operational efficiency, safety, and the sustainable development of the mining sector.

Key words: Applied Geophysics, circular economy, mine planning.

ГЕОФИЗИЧНИ МЕТОДИ ЗА ЕФЕКТИВНО ПЛАНИРАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ДОБИВА НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ В КОНТЕКСТА НА КРЪГОВАТА ИКОНОМИКА И УСТОЙЧИВОТО УПРАВЛЕНИЕ НА РИСКОВЕТЕ

Богдана Миленкович

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата статия разглежда ролята на геофизичните методи за ефективно планиране и оптимизация на добива на полезни изкопаеми в условията на кръгова икономика и устойчиво управление на рисковете. Анализирани са основните геофизични методи като инструменти за недеструктивно изследване на подземната среда и за получаване на надеждна информация за геоложкия строеж и свойствата на скалния масив. Показано е, че интегрирането на геофизични данни в минното планиране повишава точността при моделирането на находищата, подпомага селективния добив, намалява инвестиционните разходи и ограничава количеството генерирани отпадъци.
Особено внимание е отделено на приложението на геофизиката при управлението на геоложки, геомеханични, хидрогеоложки и екологични рискове чрез мониторинг и ранна диагностика на потенциално опасни процеси. Разгледана е връзката между геофизичните методи и принципите на кръговата икономика, включително повторната оценка на хвостохранилища и минни отпадъци с цел по-пълноценно използване на ресурсите. Представени са примери от българската миннодобивна практика, които доказват значението на геофизиката като стратегически инструмент за повишаване на ефективността, безопасността и устойчивото развитие на минния сектор.

Ключови думи: Приложна геофизика, кръгова икономика, минно планиране.

Introduction

Mining industry occupies a key position in the economy of the Republic of Bulgaria, providing strategic raw materials for various industrial sectors (BCMG, 2024). At the same time, exploration and extraction activities are associated with significant geological, technological, and environmental risks (Hartman & Mutmansky, 2002). In the context of increasingly strong European and national policies for sustainable development and circular economy, there is a need to implement scientifically grounded, highly efficient, and environmentally friendly methods for resource management (European Commission, 2015).

Geophysical methods have established themselves as an indispensable tool for non-destructive investigation of the subsurface, supporting informed decision-making in the planning, operation, and closure of mining sites, while reducing risk, costs, and environmental impact (Lowrie, 2007; Reynolds, 2011).

Theoretical foundations of geophysical methods

Seismic methods

Seismic methods use the dispersing of elastic waves to map geological structures and ore bodies (Telford et al., 1990). They allow determination of the shape, depth, and spatial distribution of deposits, which is critical for efficient planning for the mining operations (Lowrie, 2007).

Electric and electromagnetic methods

These methods measure variations in electrical conductivity and electromagnetic properties of rocks. They are used in the search for sulphide ores, metallic bodies, and in monitoring groundwater contamination (Reynolds, 2011), as well as for engineering-geological assessment and monitoring conditions of tailings facilities and water retention in a mining waste storage facility (Kisyov, 2025; Kisyov et all, 2025; Milenkovic, 2025; Tomova & Kisyov, 2025a, b; Tomova et all, 2025).

Gravimetric and magnetic methods

Gravimetric and magnetic analyses are useful for regional exploration of structures with anomaly of density and magnetic properties (Lowrie, 2007). These techniques reduce the need for expensive drilling by identifying promising zones (Telford et al., 1990).

Ground penetrating radar (GPR)

The GPR method is suitable for shallow investigations and control by time of exploitation, including such activities as

detecting cavities, assessing slope stability, and monitoring infrastructure around mining sites (Everett, 2013).

Application of geophysical methods in mine planning and optimisation of mineral resources

The role of geophysical data in mine planning

Mine planning is a complex multi-stage process that includes exploration, design, operation, and closure of mining sites (Hartman & Mutmansky, 2002). The quality of decision-making in this process is directly dependent on the availability of reliable and detailed information about the geological structure, the physical-mechanical properties of the rock mass, and the spatial distribution of ore bodies (Lowrie, 2007). In this context, geophysical methods play a key role, as they provide the opportunity for non-destructive and relatively rapid investigation of the subsurface environment (Table 1).

Table 1. *Fundamental geophysical methods and their application in mining planning*

Geophysical method	Physical parameter studied	Main application in mining	Contribution for optimisation
Seismic method	Speed of propagation of seismic waves	Identification of faults and structural disturbances	Increased safety and stability
Electrical resistivity method	Electrical resistivity	Mapping of ore bodies and aquifers	Selective mining and water control
Electromagnetic method	Electrical conductivity	Distinguishing mineral bodies	Waste reduction
Gravimetrical method	Density	Regional study of structures	Optimization of investment costs
Geomagnetic method	Magnetic susceptibility	Search for ore anomalies	Directing detailed research

Geophysical data are used even in the early stages of exploration to delineate prospective zones, which allows for a significant reduction in the number of required drillings and optimisation of investment costs (Reynolds, 2011). At more advanced stages, they are employed in building geological and geomechanical models that support the selection of optimal mining technologies and the placement of mining activities.

The integration of geophysical results with drilling data and geological observations leads to the creation of three-dimensional models of deposits (Everett, 2013). These models form the basis for both long-term and short-term mine planning, resource estimation, and prediction of rock mass behaviour during exploitation. In this way, geophysics becomes not only a tool for exploration but also a strategic instrument for the management of mineral resources.

Optimisation of extraction through geophysical methods

The optimisation of mineral extraction is associated with achieving maximum economic efficiency while minimising environmental impact and ensuring occupational safety. Geophysical methods contribute to this optimisation by increasing the accuracy in defining ore body boundaries and by improving the understanding of the internal structure of deposits.

Seismic methods allow detailed tracking of fault zones and structural disturbances, which have a significant influence on the stability of the rock mass (Telford et al., 1990). Their timely identification enables the adaptation of project solutions and the selection of safer routes for mine workings. This leads to a reduction in loss caused by accidents and interruptions in the production process.

Electrical and electromagnetic methods, on the other hand, are particularly effective in distinguishing ore bodies with different physical properties (Lowrie, 2007; Reynolds, 2011). They support selective mining, in which material with higher concentrations is extracted, while unnecessary costs for processing low-grade ores are limited. This approach is essential for improving resource efficiency and reducing the amount of generated waste.

Gravimetric and magnetic studies contribute to the optimisation by covering large areas at a regional scale and identifying anomalies that guide subsequent detailed investigations. In this way, a balance is achieved between the level of detail and the economic feasibility, which is a key factor for the sustainable development of mining enterprises.

Geophysical methods for managing geological and technological risks

Mining is associated with a range of risks, including collapses, flooding, gas occurrences, and ground surface deformations. The effective management of these risks requires timely information about the condition of the rock mass and the dynamics of ongoing processes. Geophysical methods provide the opportunity for early diagnosis of potentially hazardous zones and for monitoring during operation.

Seismic monitoring is used to record microseismical events, which may serve as indicators of stress accumulation within the rock mass. The analysis of these data allows for the prediction of possible collapses and the implementation of preventive measures.

Ground-penetrating radar (GPR) investigations are particularly useful for shallow zones and for controlling the stability of slopes and underground workings.

Hydrogeological risks associated with sudden inflows of groundwater can also be assessed using electrical and electromagnetic methods. These methods allow the tracking of aquifers and zones with increased water saturation, which is essential for the safe operation of underground mines.

Bulgarian examples of the application of geophysical methods

In Bulgarian mining practices, geophysical methods are widely applied both during the exploration stage and throughout the exploitation of deposits (Dimovski et al., 2017, 2023; Grigorova et al., 2017; Ivanov et al., 2017; BCMG, 2024; Kisyov, 2025; Kisyov et al., 2025; Tomova & Kisyov, 2025a, b; Tomova et al., 2025). Particularly illustrative are the examples from the copper mining sector, where the complex geological structure imposes the use of an integrated approach.

In enterprises such as Assarel-Medet, geophysical data are used for long-term planning of open-pit mining, for assessing slope stability, and for managing geomechanical risks. Through the integration of seismic, magnetic, and electrical surveys, more accurate modelling of ore bodies is achieved, along with optimisation of production processes.

In the coal mining sector, geophysical methods are applied to identify fault zones and gas-bearing layers, contributing to increased safety and reduced risk of accidents. In quarries for inert materials, ground-penetrating radar (GPR) and electrical

prospecting are used for raw material quality control and for optimal planning of extraction fronts.

These examples demonstrate that geophysical methods significantly contribute to improving the efficiency and sustainability of the mining sector in Bulgaria, while also supporting the implementation of best practices in resource management.

Geophysical methods in the context of the circular economy and sustainable development policies

The concept of circular economy and its importance for the mining sector

The circular economy represents an economic model aimed at the efficient use of resources through extending the life cycle of products, reusing materials, and minimising waste (European Commission, 2015; Sabri, 2023). Unlike the linear model “take–produce–dispose,” the circular approach seeks to close material loops and reduce pressure on natural resources (Figure 1).

Fig. 1. The role of geophysical methods as a connecting element in the circular economy model in the mining sector (“Figure from ‘Lean Circularity mogelijk maken met Smart Factory oplossingen.’ ” Novotek Group, 2025. https://www.novotek.com/be/insight/lean-circularity/).

The mining industry is traditionally regarded as a sector with high resource and energy intensity and significant environmental impact. For this reason, it occupies a key position in the transition to a circular economy. The main challenges facing the mining sector include the depletion of high-grade deposits, the increasing volume of mining waste, and the growing environmental and social requirements. In this context, the application of circular principles becomes a necessity rather than a choice.

Geophysical methods contribute to this transition by providing the information necessary for more efficient resource utilisation, re-evaluation of waste storage facilities, and reduction of the environmental footprint of mining activities (Table 2).

Table 2. *Link between geophysical methods and principles of circular economy*

Principles of circular economy	Role of geophysical methods
Efficient use of resources	More accurate determination of ore boundaries
Reuse	Tailings and waste assessment
Waste reduction	Selective mining
Prevention of environmental damage	Geophysical monitoring

European policies for the circular economy and the sustainable use of raw materials

The transition to a circular economy is among the leading priorities of the European Union. Over the past decade, a number of strategic documents have been adopted that directly affect the mining sector and the management of raw materials.

Among the key policies, the Circular Economy Action Plan stands out, emphasising sustainable resource management, waste reduction, and the promotion of innovation. Within this framework, mining waste and secondary raw materials are regarded as potential sources of valuable materials rather than as final waste for disposal.

Of particular importance is also the European Critical Raw Materials Strategy, which aims to reduce import dependency and increase domestic extraction and recycling. In this context, the re-evaluation of old deposits, tailings storage facilities, and waste dumps is considered a strategic opportunity (European Commission, 2020). Geophysical methods play a key role in identifying residual resources and assessing their economic feasibility.

European policies also impose strict environmental protection requirements, including those related to groundwater, the stability of tailings facilities, and the reclamation of disturbed land. This further increases the importance of geophysical monitoring as a tool for preventing environmental risks and ensuring long-term sustainable management.

Bulgarian policies and regulatory framework in the context of the circular economy

The national policy of the Republic of Bulgaria in the field of the circular economy is closely aligned with European strategic documents. The main document in this direction is the National Circular Economy Strategy, which sets objectives for improving resource efficiency and reducing the amount of waste (MOEW, 2022).

The mining sector occupies an important place in the national economy, which imposes the application of a balanced approach between economic development and environmental protection. Legislation in the field of mineral resources and waste management requires the implementation of environmental impact assessments, the monitoring of mining sites, and the application of reclamation measures.

In this context, geophysical methods are applied both in the initial planning of extraction and in the subsequent management of mining waste. Bulgarian practices show a growing interest in the re-evaluation of tailings storage facilities for the purpose of extracting residual quantities of metals, which is fully consistent with the principles of the circular economy.

The role of geophysical methods in the reuse of resources and mining waste management

One of the key aspects of the circular economy in mining is the reuse of resources contained in mining waste. Tailings storage facilities and waste dumps often contain significant quantities of valuable elements that were not economically recoverable at the time of initial extraction.

Electrical and electromagnetic geophysical methods enable the spatial mapping of waste masses and the identification of zones with increased metal content. This supports decision-making for selective reprocessing and reduces the need for large-scale destructive activities.

Geophysical investigations are also used to monitor the stability of tailings storage facilities, which are of particular

importance in the context of environmental risks and public safety. Through continuous monitoring of the physical parameters of these structures, accidents can be prevented and their sustainable management can be ensured (Tomova & Kisyov, 2025; Tomova et al., 2025).

Geophysical methods as a medium for the sustainable development of the mining sector

The integration of geophysical methods into circular economy strategies contributes to achieving several key objectives: improving resource efficiency, reducing environmental impact, and enhancing public perception of the mining industry.

Through more precise mine planning and the reuse of available resources, the need for developing new deposits and disturbing additional land areas is reduced. This is fully consistent with European and national policies for sustainable development and the conservation of natural capital.

Geophysical methods are increasingly recognised as a bridge between scientific research, industrial practice, and sustainable development policies. Their application enables the adaptation of the mining sector to new economic models and allows maintaining its competitiveness under increasingly stringent regulatory requirements.

Sustainable risk management in mining through geophysical methods

The nature of risk in mining activities

Mining activities are associated with a high degree of uncertainty and risk, arising from the complex geological structure of deposits, the dynamic processes within the rock mass, and the impact of human activity on the natural environment. Risk in mining can be defined as the probability of an adverse event that leads to economic, environmental, or social loss.

The main groups of risks include geological, geomechanical, hydrogeological, environmental, and technological risks. Their management requires a systematic and integrated approach based on reliable data and continuous monitoring. In this context, geophysical methods are established as a key instrument for the early identification, assessment, and control of risks (Hartman & Mutmansky, 2002; Everett, 2013; Stoyanov et al., 2024) (Table 3).

Table 3. *Main risks in mining and applicable geophysical methods*

Risk type	Manifestation	Geophysical method	Management effect
Geomechanical	Collapses, landslides	Seismic, GPR	Early diagnostics
Hydrogeological	Floods	Electro-reconnaissance	Water control
Ecological	Pollution	Geophysical monitoring	Prevention
Technological	Deformation	Microseismic	Safe mine operation

Geological and geomechanical risks

Geological and geomechanical risks are among the most significant in mining, as they are directly related to the stability of the rock mass and the safety of mine working. They include collapses, landslides, fault ruptures, and unexpected changes in the lithological composition (Table 4).

Table 4. *Examples of the application of geophysical methods in Bulgarian deposits*

Enterprises	Type of mining	Applied geophysical methods	Main goal	Practical effect
Asarel-Medet	Copper ores (open pit)	Seismic, Magnetic, ERT, Magnetotelluric Borehole geophysics	Assessment of slope stability, Modeling of the copper bodies Faults and water bearing zones	Geo-mechanically reducing risks Mining optimisation Increased safety
Ellatzite-Med	Copper ores (open pit)	ERT, Magnetic, EM	Modelling of the copper bodies	Mining optimisation
Chelopech Mine	Underground copper-gold mine	ERT, IP, EM, Magnetic, Magnetotelluric, Gravity Borehole geophysics	Modelling of copper bodies, Faults and water bearing zones	Mining optimisation, Increased safety
Mines Maritsa-Iztok	Coal	Seismic, ERT	Faults and water bearing zones	Increased safety
Kaolin-Senovo	Kaolin	GPR, ERT	Quality control (QC)	Selective mining
Aggregate quarries	Inert raw materials	GPR	Front control	Loss reduction

The electrical resistivity tomography (ERT) and Seismic geophysical methods allow detailed mapping of fault zones and structural disturbances, which represent potential sources of instability (Ivanov, 2017; Kisyov et al., 2024). Microseismic monitoring provides information on stress accumulation within the rock mass and enables the prediction of critical conditions.

Ground-penetrating radar (GPR) investigations are applied in shallow mine workings and open-pit mines, where they are used to detect cavities, zones of reduced density, and unstable slopes. Through timely interpretation of these data, preventive measures can be implemented, which significantly reduce the risk of accidents.

Hydrogeological risks and water management

Hydrogeological risks are associated with the presence and movement of groundwater and may lead to flooding, erosion, and deterioration of rock mass stability. Sudden water inflows, as well as the presence of suffusion zones (Dimovski et al., 2013), pose a serious threat both to the production process and to the life and health of mining personnel.

Electrical and electromagnetic geophysical methods are particularly effective in investigating aquifers and zones with increased water saturation. They enable spatial mapping of groundwater and assessment of its interaction with mine working. By integrating these data into mine planning, drainage systems can be optimised and hydrogeological incidents can be prevented.

Environmental risks and sustainable monitoring

Environmental risks in mining are associated with impacts on soil, water resources, and atmospheric air, as well as with the stability of tailings storage facilities and waste disposal sites. Disruption of the ecological balance may have long-term consequences for the environment and local communities.

Geophysical methods are used for contamination monitoring, controlling the infiltration of polluted water, and

assessing the stability of tailings facilities. Continuous geophysical monitoring enables early detection of adverse processes and the implementation of corrective measures, which is consistent with the principles of sustainable development and risk prevention.

Integrated approach to sustainable risk management

Effective risk management in mining requires the integration of geophysical data with geological, hydrogeological, and engineering analyses. By applying a systematic approach, greater reliability of predictions and better coordination between the different stages of mine planning can be achieved.

Geophysical methods not only reduce the likelihood of accidents but also contribute to cost optimisation and increasing public trust in the mining industry. This makes them an essential component of sustainable risk management.

Conclusion

The present study was devoted to investigating the role of geophysical methods in the effective planning and optimisation of mineral resource extraction within the context of the circular economy and sustainable risk management. Under the conditions of increasing pressure on natural resources and growing environmental and social requirements, this topic has gained particular relevance at both European and national levels.

The research established that geophysical methods represent a key tool for non-destructive investigation of the subsurface environment, significantly improving the quality of mine planning. Through the integration of geophysical data with drilling and geological information, more accurate models of deposits are created, leading to more efficient resource utilisation, cost reduction, and mitigation of technological and environmental risks.

The analysis demonstrated that geophysical methods make a substantial contribution to sustainable risk management in mining. They enable early identification of geological, geomechanical, and hydrogeological risks, as well as effective monitoring of tailings storage facilities and mining waste. This creates conditions for preventing accidents and improving occupational safety and environmental protection.

Particular attention was given to the role of geophysical methods in the context of the circular economy. It was found that through the re-evaluation of mining waste and tailings facilities, additional resource opportunities can be identified, which is in line with European and Bulgarian policies for sustainable use of raw materials. In this sense, geophysics is established not only as a technical tool but also as a strategic factor for the transition to a more sustainable model of mining development. The study provides a foundation for future scientific research, including the use of primary field data and the quantitative assessment of the effectiveness of different geophysical approaches.

Acknowledgements

This research is in performance of Project BG05SFPR001-3.004-0002-C01 "Development and improvement of professional and interdisciplinary education in technical and economic sciences and enhancement of the research capacity of the extractive industry through project-based doctoral studies", funded by Programme "Education", co-funded by the European Union.

Literature

Bulgarian Chamber of Mining and geology. (2024). Activity of the mineral and raw materials industry in Bulgaria. Impact on the national economy and the regions. Sofia. (In Bulgarian). https://bmgk.bg/wp-content/uploads/2024/11/Mining-sector-impact_IME_-July_2024-V4.pdf

Dimovski, S., Stoyanov, N., Kisyov, A., & Tzankov, Ch. (2017). Application of electrical resistivity tomography for studying fissure-karst water-bearing complexes. 9th Congress of the Balkan Geophysical Society, Antalya, Turkey.

Dimovski, S., Stoyanov, N., Tsankov, C., & Kisyov, A. (2017). Geophysical approach for mapping old mine workings and deconsolidated zones in coal mining areas. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 60*(I), 99–103 (In Bulgarian).

Dimovski, S., Stoyanov, N., Kisyov, A., & Kolev, S. (2023). Application of the ERT method for three-dimensional mapping of geological objects. *XI National Geophysical Conference, 1*–4. ISSN 1314-2518. (In Bulgarian) https://doi.org/10.48368/BGS-2023.1.N13.

Dimovski, S., Stoyanov, N., Kisyov, A. & Yankova, M. (2013). Application of electrotomography for mapping suffusion zones. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 56*(I), 135–141 (In Bulgarian).

Everett, M. E. (2013). *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press.

European Commission. (2015). Closing the loop – An EU action plan for the circular economy. Brussels. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_1480

European Commission. (2020). Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability. Brussels. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474

Grigorova, M., Tzankov, Ch, Kisyov, A, Koprev, I, Dimovski, S. (2017). Complex geophysical prospection – electrical resistivity tomography and geomagnetic survey for detecting limestone inclusions in Mini Maritsa Iztok EAD. *3rd International Scientific Conference GEOBALCANICA 2017*, 31-37.

Grigorova, M., Tzankov, Ch., Kisyov, A., Koprev, I., & Dimovski, S. (2017). Complex geophysical prospection – electrical resistivity tomography and geomagnetic survey for detecting limestone inclusions in Mini Maritsa Iztok EAD. *3rd International Scientific Conference GEOBALCANICA 2017*, 31–37.

Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). Wiley.

Ivanov, Y., Kisyov, A., Tzankov, C., & Nikolov, S. (2017). Application of electrical resistivity tomography for investigation of landslides. *Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых*, Санкт-Петербург, 62–65. ISBN 978-5-94211-781-8.

Kisyov, A. (2025). Risk assessment in integrated mining waste storage facility with geophysical methods. In N. Dobrinkova & S. Fidanova (Eds.), *Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024)*. Lecture Notes in Networks and Systems (Vol. 883). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74707-6_23

Kisyov, A., Milenkovic, B., & Stoyanov, N. (2024). Application of the ERT method for mapping old landfills and the groundwater pollution caused by them. *Review of the*

Bulgarian Geological Society, 85(3), 293–296. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2024.85.3.293

Kisyov, A., Tomova, M., & Koprev, I. (2025). Geophysical methods for optimising mining waste management. In N. Dobrinkova & S. Fidanova (Eds.), *Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024)*. Lecture Notes in Networks and Systems (Vol. 883). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74707-6_22

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Milenkovich, B. (2025) Geophysical Monitoring for Sustainable Mining: Case Studies Using Electrical Resistivity Tomography. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 68*, 35 - 39, ISSN 2738-8808

Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Sabri, A. (2023). Sustainable development of industrial enterprises (dissertation). “D. A. Tsenov Academy of Economics”, Svishtov (In Bulgarian).

Stoyanov, N., Dimovski, S., Panayotova, M., Bratkova, S., Angelov, A., & Kisyov, A. (2024). *Assessment and forecasting of groundwater pollution from natural and anthropogenic sources*. Sofia: Avangard Prima. ISBN 978-619-279-017-2 (In Bulgarian).

Strategy for the transition to a circular economy 2022 – 2027. Ministry of environmental and water (MOEW) (In Bulgarian).

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2025a). Geophysical evaluation of water drainage and containment in a mine waste storage facility: A comparative ERT study. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 68*, 61–64. https://doi.org/10.5281/zenodo.17155179

Tomova, M. & Kisyov, A. (2025b). Electrical resistivity tomography as a tool for geological-engineering assessment of the Benkovski-2 tailings storage facility (TSF). *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering, and Mathematics, 38*, 682–687. https://doi.org/10.55549/epstem.1265

Tomova, M., Kisyov, A., & Tsankov, C. (2025). Geophysical monitoring of Chelopech tailings storage facility conditions using electrical resistivity tomography. *Review of the Bulgarian Geological Society, 86*(3), 147–150. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.147

APPLICATION OF 2D ELECTROMYOGRAPHY IN THE STAGE OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS ON A CONSTRUCTION SITE

Spas Nikolov, Atanas Kisyov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: at.kisyov@mgu.bg

ABSTRACT. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is a widely used geophysical method for near-surface characterisation of geological conditions in engineering and environmental studies. This paper presents the results of an ERT investigation conducted at a construction site (store No. F178) in the town of Dupnitsa, Southwestern Bulgaria. The study aimed to delineate the thickness and lateral extent of anthropogenic fill materials and to estimate the groundwater level within the upper 10 –15 m of the geological section. Three ERT profiles with a total length of 146.5 m were measured using a four-electrode Schlumberger array and interpreted through two-dimensional inversion. The obtained geoelectrical models reveal three distinct resistivity zones corresponding to construction waste fill, clay-rich fill material, and water-saturated alluvial deposits.

Key words: 2D Electrical resistivity tomography, ERT, engineering geology, groundwater, alluvial deposits.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА 2D ЕЛЕКТРОТОМОГРАФИЯТА В ЕТАПА НА ИНЖЕНЕРНОГЕОЛОЖКИТЕ ПРОУЧВАНИЯ НА СТРОИТЕЛНА ПЛОЩАДКА

Спас Николов, Атанас Кисьов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Електротомографията (Electrical Resistivity Tomography, ERT) е широко използван геофизичен метод за изследване и характеризиране на приповърхностните геоложки условия при инженерногеоложки и екологични проучвания. В настоящата статия са представени резултатите от ERT изследване, проведено на строителна площадка (обект № F178) в гр. Дупница, Югозападна България. Основната цел на проучването е да се определят дебелината и страничното разпространение на антропогенните насипни материали, както и да се оцени нивото на подземните води в горните 10–15 m от геоложкия разрез. Измерванията са извършени по три ERT профила с обща дължина 146,5 m, използвайки четириелектродна схема Schlumberger, а данните са интерпретирани чрез двумерна инверсия. Получените геоелектрични модели разкриват три ясно обособени зони по електрично съпротивление, съответстващи на насип от строителни отпадъци, глинесто насипно тяло и водонаситени алувиални наслаги.

Ключови думи: 2D Електротомография, ERT, инженерна геология, подземни води, алувиални наслаги.

Introduction

Reliable characterisation of subsurface conditions is essential for engineering design and construction planning. Conventional drilling provides accurate point information but often lacks sufficient spatial coverage. Electrical Resistivity Tomography (ERT) complements borehole investigations by providing continuous two-dimensional images of subsurface resistivity variations.

The research results of ours and of other Bulgarian authors in the last two decades have shown the great applicability of the ERT method in mapping geological and hydrogeological sections, karst and fractured zones, tectonic disturbances, areas with different water saturation or different degrees of pollution, landslides, mining sites, etc (Tzankov and Demireva, 2013; Grigorova and Koprev, 2018; Stoyanov and Dimovski, 2020; Georgieva et al, 2021; Tomova, 2023).

The present study was carried out at a construction site No. F178 located at a north site of Dupnitsa. The site is situated on the left-bank terrace of the Bistritsa river, a major tributary of the Dzherman river (Fig. 1). The terrain is flat, with an altitude of 500 m.

The main object of the ERT investigation was to specify a geological fault to a depth of 10 – 15 m, by mapping possible spatial outline of the embankment and marking the probable depth of the underground water, at the moment of the survey.

Fig. 1. Location of the survey area (from the data of the Google Earth)

Geological setting

The investigated area is located within the alluvial valley system formed by the Dzherman river and its largest tributary, the Bistritsa river (Fig. 2). The geological structure is dominated by alluvial deposits consisting mainly of gravels, coarse sands, fine sands, and clay-rich sediments (Sarov et al, 2011). The upper portion of the fault is composed of fine-grained sands, clay sands, and sandy clays, while underneath them are the deposits that contain coarse-grained large and medium gravel with sandy matrix material. The alluvial sequence reaches approximately 10 –15 m in thickness.

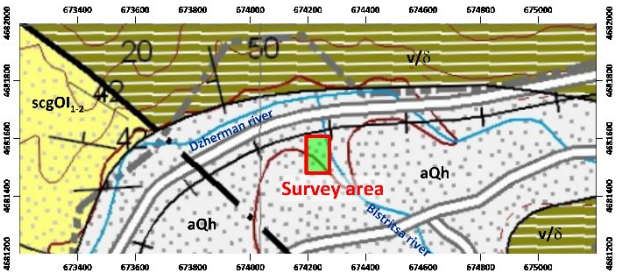


Fig. 2. Geological map of the region (from Geological map of Bulgaria M 1:100000. Map sheet K-35-40 Tvarditsa, Sarov et all, 2011).

In the region of the survey area, natural soil is covered by the embankment, which according to data from constructed exploratory boreholes is with a thickness of around 5 – 6 m. Fig. 3 shows the locations of the five exploratory boreholes done by the *Terra Drill Group* company.

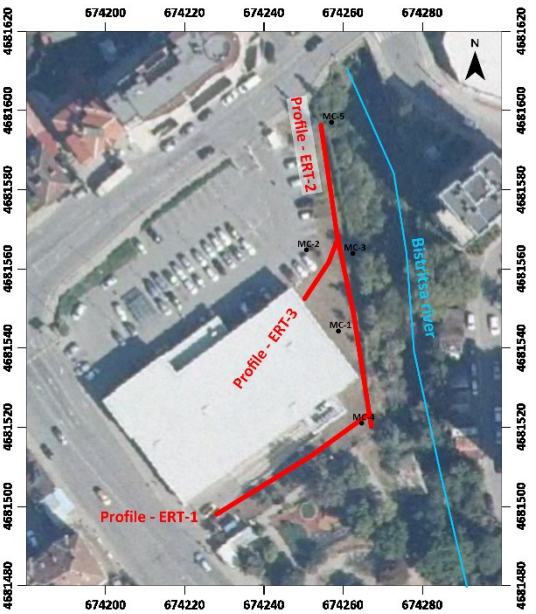


Fig. 3. Location of the geophysical profiles (ERT-1, ERT-2, ERT-3) and borehole locations (MC-1 ÷ MC-5)

Methodology

Principles of electrical resistivity tomography

Electrical resistivity tomography (ERT) is based on measuring the electrical resistivity distribution of subsurface materials. Electrical current is injected into the ground through two current electrodes (C1 and C2), while the resulting potential difference is measured between two receiving electrodes (P1 and P2). The mostly used electrode placement schemes are the Wenner and the Wenner – Schlumberger schemes, dipole – dipole, pole – pole, and pole – dipole schemes. The data obtained during those measurements is processed by the RES2DINV specialised software (Loke, 2001). In the end, apparent resistivity values are subsequently inverted to obtain a model of true subsurface resistivity.

Resistivity contrasts are commonly associated with changes in lithology, porosity, moisture content, groundwater saturation, and anthropogenic disturbances.

Field measurements

Three ERT profiles were measured (Fig. 3):

- ERT-1: 46.0 m long;
- ERT-2: 80.5 m long;
- ERT-3: 20.0 m long.

The total profile length was 146.5 m.

Measurements were performed using an ABEM Terrameter SAS 1000 resistivity system (Fig. 4). The instrument operates with an output voltage of up to 450 V and a maximum current of 1000 mA. Data acquisition employed a four-electrode Schlumberger configuration connected through multi-core cables.

Fig. 4. Electrical resistivity equipment

Data processing

The data obtained from the field measurements are processed using the RES2DINV computer program (Loke, 2001). As input data, the information entered into the program is the positions of the electrodes on the surface and the apparent resistivity values at each measurement point. Based on this information, a 2D model of the subsurface is constructed, with the program automatically dividing the subsurface space into a large number of blocks. Subsequently, using the least-squares method, the resistivity of each block is determined in such a way that the apparent resistivity calculated from the model matches the measured electrical field as closely as possible (Loke and Barker, 1996).

As a final result, the RES2DINV program produces three vertical sections:

1. Measured apparent resistivity pseudosection;
2. Calculated apparent resistivity pseudosection;
3. Inverse model resistivity section.

The comparison of the two former sections illustrates the reliability of the model solution, while the latter section provides the actual distribution of electrical resistivity within the subsurface.

The determined geoelectrical model is transformed into a geological model on the basis of:

- General information for geo-tectonic, engineering geological and hydrogeological conditions of the study area;
- Data from engineering geological observations and from an executed borehole survey (in this case, from 5 exploratory drills in the survey area, MC-1 ÷ MC-5);

- Published resistivity ranges for common geological materials (Daniels and Alberty, 1975; Keller and Frischknecht, 1996).

Results

The inverted ERT sections reveal significant resistivity contrasts within the upper part of the investigated geological section. Resistivity values range from approximately 7 Ωm to more than 1000 Ωm.

Three major geoelectrical zones were identified.

Zone A: High-resistivity layer

The uppermost zone exhibits resistivity values between 150 and more than 1000 Ωm. This layer is interpreted as construction debris fill consisting predominantly of large to medium-sized fragments. The thickness generally varies between 1 and 3 m, averaging approximately 2–2.5 m (Fig. 5)

Zone B: Intermediate-Resistivity Layer

The second zone displays resistivity values between 50 and 150 Ωm. It can be interpreted as a lower part of the construction fill embankment, represented by small- to medium-sized pieces with clay matrix, probably with a high level of water saturation. The thickness varies from approximately 1 m to 5 m, with average values around 3–4 m (Fig. 5).

Zone C: Low-Resistivity Layer

The deepest identified zone is characterised by resistivity values ranging from 7 to 50 Ωm, rarely outside these limits. Most likely, this zone maps alluvial deposits, on which the construction fill embankment lies. This zone is composed of gravel and sand with sandy-clay matrix material, and it is a water-saturated zone (Fig. 5).

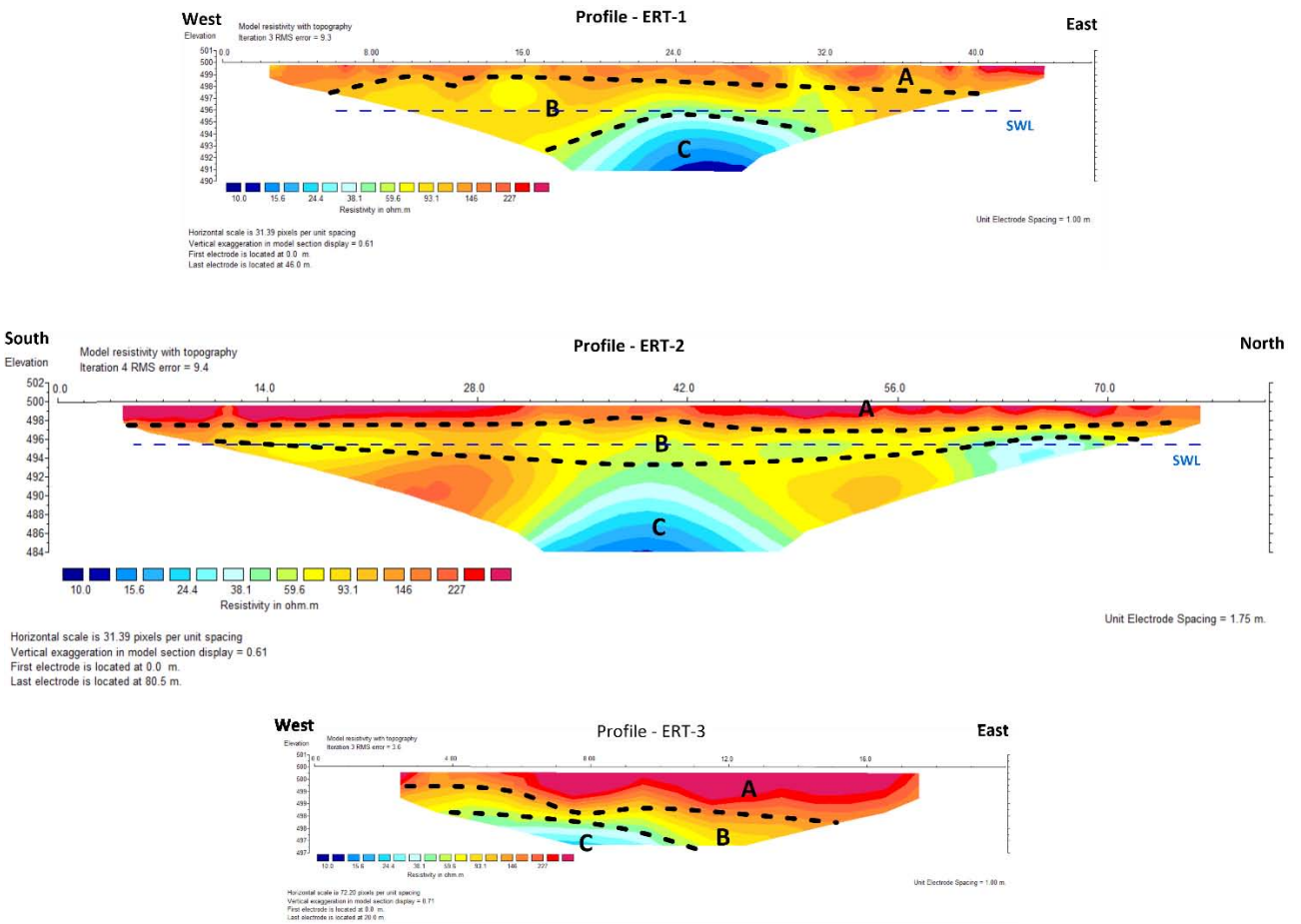


Fig. 5. Segmentation of an electrical resistivity section along geophysical profile ERT-3 (the situational plan is presented in Fig. 3)

Conclusion

The conducted ERT survey provided valuable information regarding the shallow subsurface structure of the investigated construction site in Dupnitsa.

The main important conclusions, made from the complex analysis of the results obtained from the ERT survey (Fig. 5) and taking into account the general geological and tectonic information for the studied area, the data from the engineering geological survey, and the data from the documented geological section in the constructed exploratory boreholes MS-1, MS-2, MS-3, MS-4, and MS-5 are:

1. The geoelectrical section is very well endured in terms of the distribution of electrical resistivity in depth.

2. The electrical resistivity of the media that makes up the studied geological section varies in a wide range from 7 m to 1000 m and more.
3. In the most general sense, the studied geoelectrical section is represented by three electrical resistivity environments (zones), mapping areas with different composition, genesis, and degree of secondary alteration of the geological environment.
4. The geoelectrical sections along geophysical profiles ERT-1 and ERT-2 and the registered water levels in the Bistritsa River suggest that at the time of measurement the groundwater level was at a depth of 4.0 - 4.5 m. In Fig. 5, the assumed distribution of piezometric (water) levels is represented by a dashed blue line.

The study confirms the usefulness of Electrical Resistivity Tomography for rapid characterisation of complex near-surface geological conditions in urban construction environments.

References

Georgieva, G., Stoyanov, N., Dimovski, S. (2021). Geophysical approach for mapping zones of low permeability endangering the stability of a tailings dam wall. – 11th Congress of the Balkan Geophysical Society, Bucharest, 2021.

Grigorova, M., Koprev, I. (2018). Application of electrical resistivity tomography for sand underwater extraction. – Proceedings of the 4th International Scientific Conference GEOBALCANICA. 15–16 May, North Macedonia, 15–20.

Daniels, F., Alberty, R. (1975). *Physical Chemistry*. John Wiley & Sons, New York.

Keller, G., Frischknecht, F. (1966). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press.

Loke, M. H. (2001). A Practical Guide to RES2DINV Version 3.4. Geotomo Software, Penang, Malaysia.

Loke, M. H., Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting, 44*, 131–152.

Sarov, S., Moskovski, S., Zhelezarski, T., Voynova, E., Nikolov, D., Georgieva, I., Markov, N. (2011). Geological Map of Bulgaria, Dupnitsa Sheet.

Stoyanov, N., Dimovski, S. (2020). Geoelectrical approach for differentiating the hydrogeological section in the study of a tailings pond site. – Proceedings of the 6th International Scientist Conference GEOBALCANICA.

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: case study of Southeastern Bulgaria. *Eurasia Proc. Sci. Technol. Eng. Math. (EPSTEM) 26*, 341–347.

Tzankov, Ch., Demireva, E. (2013). GPR through a Water Mirror Defining the Topography of a Bottom and the Depth of the Sediments beneath the Water Layer. – 7th Congress of the Balkan Geophysical Society, Oct 2013, cp-362-0010. ISBN: 978-90-73834-55-2. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131760

MINERAL AND GEOCHEMICAL ZONING OF THE *MILIN KAMAK* DEPOSIT, WESTERN SREDNOGORIE (BULGARIA): INSIGHTS FROM STATISTICAL ANALYSIS

Daniela Nikolova, Kalin Ruskov, Ivan Marinov, Stanislav Stoykov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: danny.nikolova@abv.bg

ABSTRACT. Statistical processing of geochemical data obtained during the detailed exploration of the *Milin Kamak* deposit was performed using univariate statistical analysis and Pearson correlation matrices. The results confirm a clear geochemical zonality consistent with previously published mineralogical and geochemical studies. Descriptive statistics reveal systematic differences in element distributions across the ore zones: gold attains its highest mean concentrations in Ore Zone 1, lead and zinc peak in the western sector of Zone 1, while arsenic shows elevated values in Zones 3 and 6. Correlation analysis demonstrates that gold exhibits a broad multi-element positive correlation with Ag, As, Bi, Cd, Cu, Pb, S, Sb, and Zn in the western sector of Ore Zone 1, consistent with the sulphosalt-bearing paragenesis, while in the eastern sector the correlation cluster is reduced and gold associates primarily with As and Mn. The Au–As correlation is strongest in the western sector (r = 0.743) and remains statistically significant across all ore zones (r = 0.351–0.569), identifying arsenic as the sole reliable deposit-wide pathfinder for gold. Calcium and magnesium show a consistent negative correlation with gold in all zones, marking intervals lacking ore mineralization.

Key words: zonal distribution, epithermal deposit, statistics, 3D modelling.

МИНЕРАЛНА И ГЕОХИМИЧНА ЗОНАЛНОСТ НА НАХОДИЩЕ „МИЛИН КАМЪК“, ЗАПАДНО СРЕДНОГОРИЕ (БЪЛГАРИЯ): ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА БАЗА СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ

Даниела Николова, Калин Русков, Иван Маринов, Станислав Стойков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Извършена е статистическа обработка на геохимични данни от детайлното проучване на находище „Милин камък" чрез прилагане на едномерен статистически анализ и корелационни матрици на Пирсън. Резултатите потвърждават ясно изразена геохимична зоналност, съответстваща на публикуваните минераложки и геохимични изследвания. Дескриптивната статистика показва систематични различия в разпределението на елементите между рудните зони: златото е с най-високи средни съдържания в рудна зона 1, оловото и цинкът достигат максимум в западния участък на зона 1, а арсенът е повишен в зони 3 и 6. Корелационният анализ показва, че в западния участък на зона 1 златото има широка многоелементна положителна корелация с Ag, As, Bi, Cd, Cu, Pb, S, Sb и Zn, съответстваща на сулфосолната парагенеза, докато в източния участък корелационният клъстер е редуциран и златото асоциира предимно с As и Mn. Корелацията Au–As е най-силна в западния участък (r = 0.743) и остава статистически значима във всички рудни зони (r = 0.351–0.569), което определя арсена като единствен надежден индикатор за злато в находището. Калцият и магнезият показват последователна отрицателна корелация със златото във всички зони, маркирайки интервали, в които липсва рудна минерализация.

Ключови думи: зонално разпределение, епитермално находище, статистика, 3Д моделиране.

Introduction

The *Milin Kamak* deposit is situated in the Western Srednogorie zone, within the municipality of Breznik, southwestern Bulgaria, and belongs to the Late Cretaceous Apuseni–Banat–Timok–Srednogorie (ABTS) magmatic and metallogenic belt (Popov et al., 2002). Intensive exploration activities carried out between 2004 and 2019 classified the deposit as an intermediate sulphidation epithermal gold–silver system with associated Pb, Zn, and Cu mineralisation (Sabeva et al., 2012). Ore formation proceeded through three successive hydrothermal stages — quartz–pyrite, quartz–polymetallic, and carbonate–gold — as established by Sabeva and Mladenova (2012) and Sabeva et al. (2017), who also documented the hydrothermal alteration zonality, fluid inclusion data, and sulphur isotope systematics of the deposit. The mineral composition of Ore Zone 1 was subsequently detailed by Nikolova et al. (2019), who reported previously undescribed phases including seligmanite, gratonite, jordanite, and robinsonite, and confirmed that native gold is high-fineness rather than electrum. Gold was deposited through both the quartz-pyrite stage and the quartz-sulphosalt stage. Recent investigations have further expanded the metallogenic interpretation of the deposit, indicating the presence of potential silver mineralisation in the southern periphery of the deposit (Iovchev, Strahilov, 2026).

The spatial distribution of geochemical associations was previously examined by Marinov et al. (2019) using multivariate factor analysis applied to a dataset of 36,615 samples, resulting in the identification of six factor groups. Of these, three — [Cd, Zn, Pb], ([Cu, Sb] Bi) Ag, and ([As] Au) Mn — show a clear spatial relationship to the ore bodies, including a pronounced west-to-east zonality along Ore Zone 1. Nikolova (2022) subsequently provided the mineralogical interpretation of these factor associations, linking each to a specific ore-forming mineral assemblage.

A systematic quantitative characterisation of geochemical zonality through univariate statistical analysis and inter-element correlation matrices has not been published. The behavior of individual elements across the ore zones — and in particular the spatially varying correlation structure of gold with potential pathfinder elements — has not been described. Such an analysis is essential for establishing reliable geochemical indicators for targeted exploration and for integrating the statistical evidence with the established mineralogical framework.

The present study addresses this gap by applying one-dimensional statistical analysis and Pearson correlation matrices to the full geochemical dataset obtained during the detailed exploration program of 2016–2019. The specific objectives are: (1) to characterise the distribution of key ore-forming elements across the individual ore zones through

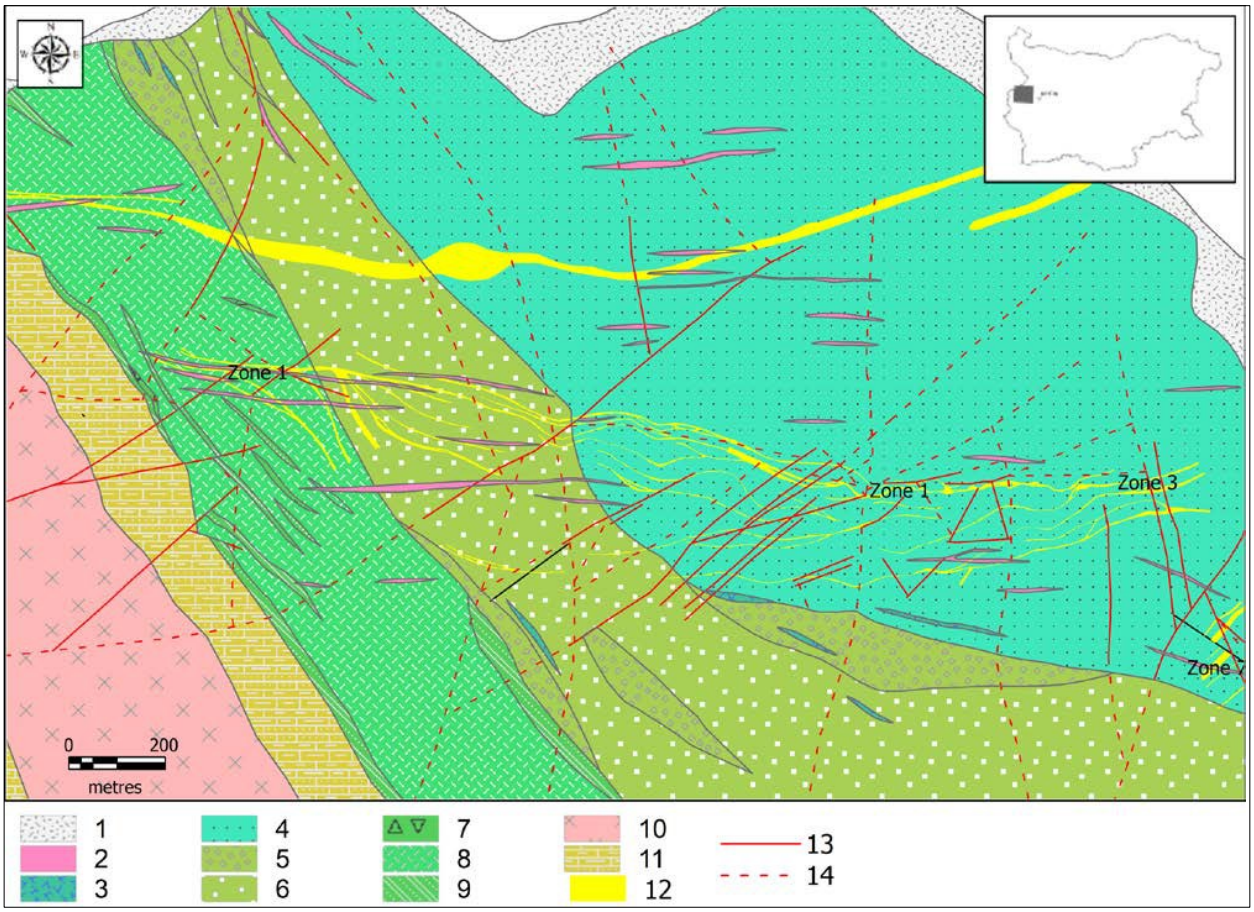


Fig. 1. Geological map of the Milin Kamak deposit and Ore Zones (after Nikolova, 2019). 1. Alluvial sediments; 2. Basaltic andesite dyke; 3. Basalt and basaltic andesite lavas; 4. Agglomerate tuffs; 5. Bomb – block tuffs; 6. Lapilli – psephitic tuffs; 7 Trachybasalt lavas; 8. Lapilli tuffs; 9. Beds of psephytic and pellitic tuffs; 10. Trachyandesites (plagioclase); 11. Sediment alternation; 12. Ore zone; 13. Certain fault; 14. Supposed fault.

descriptive statistics; (2) to assess the correlation structure of gold with associated elements within individual ore zones and between sectors of Ore Zone 1; and (3) to synthesise the statistical, mineralogical, and factor-analytical evidence into a unified description of the geochemical and mineralogical zonality of the *Milin Kamak* deposit.

Geological Settings

Regional Geological Framework

The *Milin Kamak* deposit is located approximately 3 km southeast of the town of Breznik (Fig. 1). It is spatially and genetically associated with the Breznik paleovolcano, a Late Cretaceous central-type volcanic structure. The host rocks comprise trachybasalt and shoshonitic lavas, agglomerate, lapilli, and bomb–block tuffs, and basaltic andesite dykes (Dabovski et al., 2009). The volcanic succession reaches up to 1,400 m in thickness in the deposit area.

The principal ore-controlling structures are east–west trending faults dipping steeply to the south (Fig.1). These are cross-cut by ENE–WSW and NNW–SSE faults of secondary importance (Strahilov et al., 2022, Strahilov, Marinov, 2025). Recent geomechanical analysis by Strahilov (2024) provides additional insight into the relationship between the deposit’s structural framework and rock mass behavior.

The deposit is situated along the southern limb of the Krasava syncline, which has influenced the southward tilting of the ore zones (Marinov et al., 2019).

Hydrothermal alteration is pervasive and zonally developed, comprising propylitic, sericitic, argillic, and advanced argillic types (Sabeva et al., 2017). Potassic alteration in the deeper eastern portion of the deposit has been interpreted as indicating proximity to a concealed porphyry-type source (Novakova et al., 2024).

Eight ore zones have been delineated localised in veins hosted by lapilli tuffs and basalt dykes. The zones are east–west oriented and steeply south-dipping, with the exception of Ore Zone 7, which trends northeast–southwest. Ore Zone 1 is the largest, with a strike length exceeding 1 km. It is subdivided into eastern and western sectors on structural and compositional grounds. The mineral paragenesis comprises three successive stages: quartz–pyrite, quartz–polymetallic, and carbonate–gold (Sabeva et al., 2012).

Materials and Methods

Dataset

The geochemical dataset was obtained during the detailed exploration program conducted between 2016 and 2019 by Trace Resources Ltd. The program comprised over 40,000 sampled intervals.

Core samples were split longitudinally; one half was retained for analysis and the other archived. Samples were dried at 105°C, crushed to 2 mm, split using a Jones riffle splitter, and pulverised to 200 mesh. Analysis was carried out at the ALS laboratory, by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ME-ICP61) following four-acid digestion, covering 33 elements. Gold was determined by fire assay with atomic absorption finish (Au-AA26, up to 100 ppm) and by fire assay with gravimetric finish (Au-GRA22, above 100 ppm).

Twelve elements were excluded from statistical processing as they do not participate in ore-forming processes and occur predominantly below detection limits (Al, Ga, K, La, Na, Ni, P, Sc, Sr, Th, Tl, U). Values below the detection limit were substituted by one-half of the respective lower detection limit (Marinov, 2019). The final dataset comprises 22 elements: Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Ti, V, W, and Zn.

Statistical Methods

The statistical analysis followed the sequential methodology developed by Popov (2016), previously applied to the *Milin Kamak* deposit by Marinov et al. (2019). The full workflow comprises: (1) preliminary data preparation; (2) univariate statistical analysis; (3) correlation and cluster analysis; and (4) factor analysis with 3D modelling. Stages 3 and 4 have been published in Marinov et al. (2019) and Nikolova (2022). The present study focuses on stages 1 and 2, drawing on the published factor-analytical results for comparative interpretation only.

Univariate statistical analysis was applied to characterise element distributions within each ore zone. The following parameters were computed: arithmetic mean, standard deviation, coefficient of variation, skewness, and kurtosis. Analysis was performed separately for the eastern and western sectors of Ore Zone 1 and for Ore Zones 2, 3, 5, and 6.

Correlation analysis was performed using the Pearson product-moment correlation coefficient (r). Correlation matrices were constructed for each spatial subdivision, with gold positioned as the first variable. Correlations with $|r| \geq 0.3$ were considered geochemically significant, consistent with the sample sizes involved.

Results

Distribution of Elements across Ore Zones

Descriptive statistical analysis was performed for six spatial subdivisions: the eastern and western sectors of Ore Zone 1, and Ore Zones 2, 3, 5, and 6. The frequency distributions of all ore-forming elements exhibit strongly positive skewness and right-tailed histograms. This pattern is characteristic of hydrothermal mineralisation superimposed on an unmineralised volcanic host and is consistent with observations from epithermal systems of the ABTS belt (Popov, 2002).

Gold attains its highest mean concentrations in Ore Zone 1, with the eastern sector recording values approximately twice those of the western sector. Mean Au contents decrease markedly toward Zones 2 and 5, reaching their lowest values in Zones 3 and 6. Silver shows an inverse relationship with gold: zones with higher mean Au correspond to lower mean Ag values, indicating that the Au/Ag ratio varies systematically across the deposit.

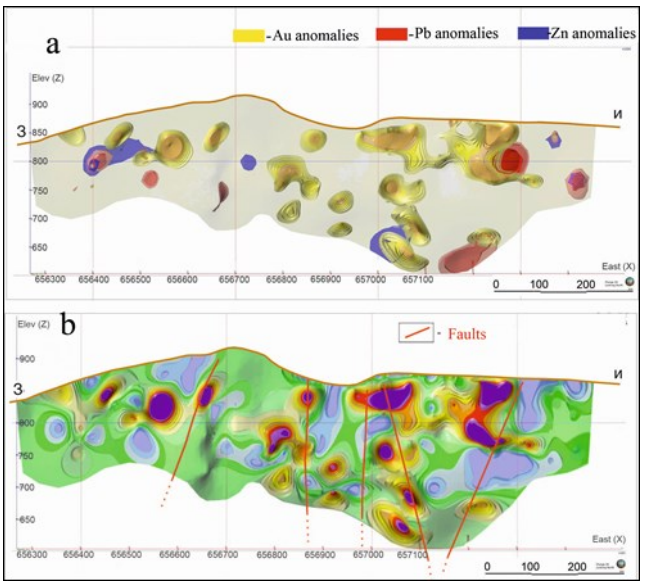


Fig. 2 – a - vertical projection of Zone 1 with zonal distribution of Au, Pb, and Zn; b – Longitudinal vertical projection of Zone 1 with Au geochemical anomalies (Au concentrations increase from cool to warm colors) relative to oblique steep to gentle NNE-SSW and NE-SW faults.

Lead and zinc display a distribution pattern distinct from that of gold. Both elements attain their highest mean concentrations in the western sector of Ore Zone 1 (Fig. 2), where mean Pb values exceed those of the eastern sector by a factor of approximately four. Zones 2 and 5 show intermediate Pb and Zn contents, while Zones 3 and 6 record the lowest values. The strong Pb–Zn co-variation across all zones reflects their common host in the galena–sphalerite assemblage.

Arsenic shows a contrasting distribution relative to Pb and Zn. Mean As concentrations are the highest in Zones 3 and 6, where Pb and Zn are the lowest. This inverse spatial relationship between As and the Pb–Zn pair is one of the clearest statistical expressions of geochemical zonality in the deposit. Copper and antimony follow a distribution broadly analogous to that of gold, with elevated mean values in the central and eastern portions of the deposit.

Calcium and magnesium are decoupled from the sulphide ore-forming elements. Their distribution is inversely related to the majority of ore metals across all zones, as discussed further in the correlation analysis below.

Pearson Correlation Analysis

Pearson correlation matrices were computed for gold against all remaining 21 elements within each spatial subdivision. The Au correlations are summarised in Table 1.

Ore Zone 1 — Western Sector. Gold exhibits the strongest Au–As correlation recorded in the deposit (r = 0.743). Beyond arsenic, gold participates in a broad multi-element positive correlation cluster: S (r = 0.429), Zn (r = 0.394), Cd (r = 0.391), Cu (r = 0.371), Ag (r = 0.370), Pb (r = 0.365), Sb (r = 0.327), Bi (r = 0.303), and Fe (r = 0.298). The simultaneous positive correlation of Au with both the Pb–Zn–Cd suite and the Cu–Sb–Bi suite indicates that gold in this sector is spatially associated with the full range of sulphide and sulphosalt assemblages. The Au–Mn correlation is modest (r = 0.184). Gold shows negative correlations with Mg (r = −0.409) and Ca (r = −0.348), reflecting

the inverse relationship between the sulphide ore assemblage and the late rhodochrosite veining.

Ore Zone 1 — Eastern Sector. The Au–As correlation remains strong (r = 0.513) but is weaker than in the western sector. The multi-element correlation cluster is substantially reduced. Sb (r = 0.325), Cu (r = 0.291), S (r = 0.264), and Fe (r = 0.222) retain moderate positive correlations with Au, while Ag (r = 0.220), Pb (r = 0.171), Zn (r = 0.171), Cd (r = 0.184), and Bi (r = 0.211) are markedly weaker than in the western sector. The Au–Mn correlation strengthens in the eastern sector (r = 0.301), reflecting the greater spatial association of gold-bearing intervals with Mn-carbonate veining. Negative correlations with Mg (r = −0.337) and Ca (r = −0.301) are preserved.

Table 1. *Gold correlation with other chemical elements for ore zones 1, 2, 3, 5, and 6*

	Zone 1 west	***Zone 1 east***	***Zone 2***	***Zone 3***	***Zone 6***	***Zone 5***
Ag	*0.37*	*0.22*	*0.161*	*0.314*	*0.354*	*0.332*
As	*0.743*	*0.513*	*0.351*	*0.536*	*0.497*	*0.569*
Bi	*0.303*	*0.211*	*0.057*	*0.050*	*0.050*	*0.29*
Cd	*0.391*	*0.184*	*0.048*	*0.391*	*0.242*	*0.197*
Cu	*0.371*	*0.291*	*0.060*	*0.152*	*0.429*	*0.217*
Fe	*0.298*	*0.222*	*0.097*	*0.175*	*0.050*	*0.282*
Mn	*0.184*	*0.301*	*0.147*	*0.367*	*0.432*	*0.050*
Pb	*0.365*	*0.171*	*0.112*	*0.151*	*0.202*	*0.231*
S	*0.429*	*0.264*	*0.191*	*0.341*	*0.219*	*0.34*
Sb	*0.327*	*0.325*	*0.125*	*0.262*	*0.468*	*0.22*
Zn	*0.394*	*0.171*	*0.056*	*0.365*	*0.236*	*0.193*
Ca	*-0.348*	*-0.301*	*-0.199*	*-0.196*	*0.050*	*-0.362*
Mg	*-0.409*	*-0.337*	*-0.193*	*-0.232*	*-0.106*	*-0.365*

The contrasting correlation structures of the two sectors indicate that in the western sector gold is spatially linked to the full sulphide paragenesis, while in the eastern sector it associates more specifically with As-bearing phases and Mn-carbonates. This is consistent with the mineralogical observations of Nikolova (2022), who documented the dominance of pyrite–arsenopyrite in the eastern drill holes and the maximum development of sulphosalt and galena–sphalerite minerals in the western and central portions of Ore Zone 1.

Ore Zones 2, 3, 5, and 6. Arsenic maintains a consistently positive correlation with gold across all zones: r = 0.351 (Zone 2), 0.536 (Zone 3), 0.497 (Zone 6), and 0.569 (Zone 5). Silver shows moderate Au correlations in Zones 3 (r = 0.314), 5 (r = 0.332), and 6 (r = 0.354), and a weak correlation in Zone 2 (r = 0.161). Manganese exhibits moderate positive Au correlations in Zones 3 (r = 0.367) and 6 (r = 0.432), but is uncorrelated in Zone 5 and weakly correlated in Zone 2 (r = 0.147). Copper shows a notably strong Au correlation in Zone 6 (r = 0.429). The correlations of Au with Pb, Zn, Cd, Bi, and Fe are generally weak across these zones, with several elements recording near-zero coefficients.

Calcium shows negative Au correlations in Zones 1, 2, 3, and 5, ranging from r = −0.199 to r = −0.362, while in Zone 6 the correlation is absent. Magnesium maintains a negative Au correlation in all zones without exception, ranging from r = −0.106 (Zone 6) to r = −0.409 (Zone 1 west). Magnesium is thus the most consistently inverse geochemical indicator relative to gold in the deposit.

Discussion

Geochemical, Mineralogical, and Factor-Analytical Evidence for Zonality

The statistical results presented above provide quantitative confirmation of the spatial geochemical zonality previously inferred from mineralogical observations (Nikolova et al., 2019; Nikolova, 2022) and three-dimensional factor modelling (Marinov et al., 2019). Three independent lines of evidence — descriptive statistics, correlation analysis, and factor analysis — converge on a coherent and internally consistent picture of element distribution within the deposit, illustrated schematically in Fig. 3.

The western sector of Ore Zone 1 is characterised by elevated mean Pb and Zn concentrations and a broad multi-element Au correlation cluster. This pattern corresponds directly to the spatial domain of Factor 1 [Cd, Zn, Pb] identified by Marinov et al. (2019) and is mineralogically explained by the predominance of the quartz–galena–sphalerite assemblage (Nikolova, 2022). The strong Cd–Zn correlation reported for this association reflects the well-known isomorphic substitution of Cd for Zn in sphalerite under stable physicochemical conditions (Cook et al., 2009).

The central sector of Ore Zone 1 and its continuation into Zone 2 at depth correspond to Factor 4 ([Cu, Sb] Bi) Ag of Marinov et al. (2019). The present correlation analysis confirms this through moderately strong Au–Cu, Au–Sb, Au–Bi, and Au–Ag correlations in the western sector of Zone 1, where the sulphosalt assemblage reaches its maximum development. This association is mineralogically carried by the tennantite–tetrahedrite and seligmanite–bournonite series (Nikolova, 2022). The positive Cu–Ag correlations point to isomorphic substitution in tetrahedrite, while the Ag–Pb–Sb–Bi correlations indicate the presence of Sb- and Bi-bearing galena microinclusions.

The eastern sector of Ore Zone 1, and to a lesser extent Zones 3, 5, and 6, are dominated by the Au–As correlation, consistent with Factor 6 ([As] Au Mn) of Marinov et al. (2019). This association represents the main ore body and coincides with the highest gold concentrations in the deposit. The Au–As relationship reflects two mechanisms: the occurrence of submicroscopic invisible gold in arsenian pyrite through lattice substitution of the type $Au^{3+} + As^{-} \Rightarrow 2Fe^{2+}$ (Arehart et al., 1993), and the association of visible native gold with arsenopyrite and marcasite in the quartz–polymetallic and carbonate–gold stages (Nikolova et al., 2019). The positive Au–Mn correlation in this sector reflects the spatial co-occurrence of gold-bearing intervals with rhodochrosite veining, which marks the final carbonate–gold stage. The consistent negative correlation of Au with Ca and Mg across all zones confirms that the bulk carbonate matrix is not a productive host for gold and functions as a negative geochemical indicator.

The overall zonality pattern — Pb–Zn mineralisation in the western sector, a Cu–Sb–Bi–Ag sulphosalt-dominated central zone, and an As–Au–Mn association in the eastern sector and peripheral zones — is consistent with a lateral temperature gradient within the hydrothermal system. Low-temperature distal mineralisation represented by the galena–sphalerite

assemblage occupies the western periphery, while higher-temperature assemblages including sulphosalts and arsenopyrite characterise the central and eastern sectors. This interpretation is supported by fluid inclusion homogenisation temperatures of 238–345 °C reported by Sabeva et al. (2017) for Ore Zone 1, and by the occurrence of enargite exclusively in the eastern portions and deeper drill holes (Nikolova et al., 2019). The identification of potassic alteration in the deeper eastern sector (Novakova et al., 2024) further supports the interpretation of a telescoped hydrothermal system with a concealed porphyry-type center at depth, in accordance with the genetic model of Moritz et al., 2007.

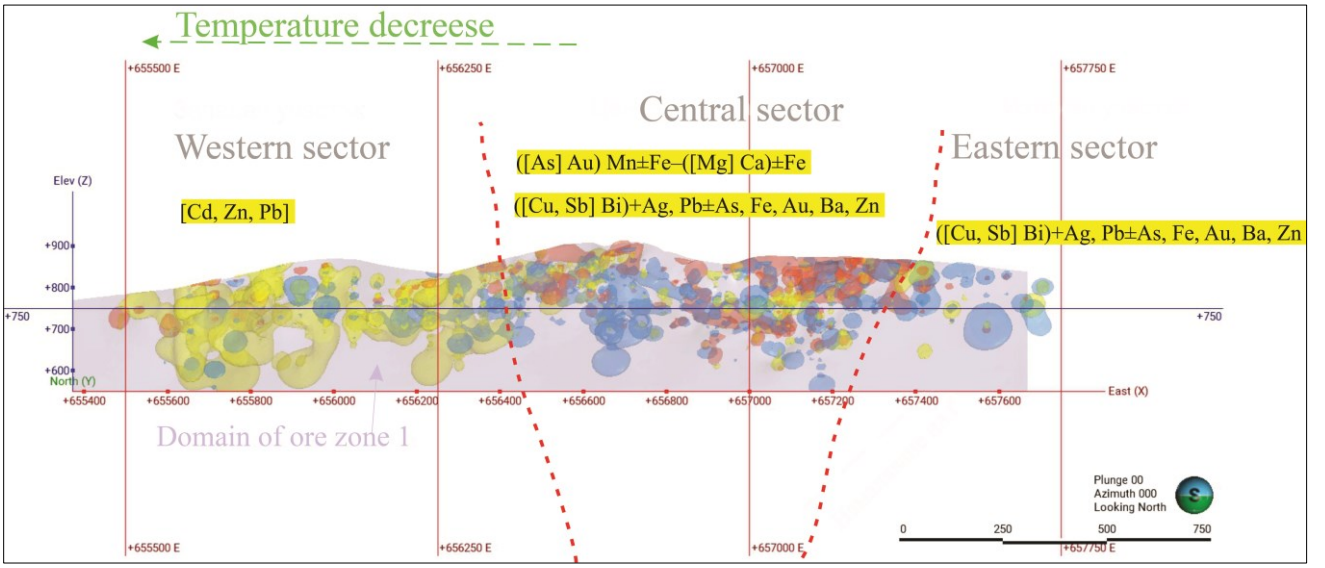


Fig. 3 A generalised section model by individual factors and their location in the Milin Kamak area

Arsenic as a Geochemical Pathfinder for Gold

Arsenic is the only element that maintains a statistically significant positive correlation with gold in every ore zone examined, with r values ranging from 0.351 in Zone 2 to 0.743 in the western sector of Zone 1. All other elements show spatially variable and zone-dependent correlations with Au, rendering them unreliable as universal indicators across the full extent of the deposit.

The reliability of As as an Au pathfinder in epithermal systems is well established. In pyrite, arsenic facilitates gold uptake through lattice substitution and surface adsorption on As-rich growth zones. In arsenopyrite, gold occurs as structurally bound invisible gold or as nanoscale native gold inclusions (Arehart et al., 1993). Both hosts are present at Milin Kamak (Nikolova et al., 2019). The deposit-wide character of the As–Au relationship is further confirmed by the spatial distribution of Factor 6 ([As] Au Mn) across the full length of Zone 1 and into Zone 2 (Marinov et al., 2019).

The attenuation of the Au–As correlation in Zone 2 (r = 0.351) relative to the remaining zones likely reflects a lower abundance of As-bearing mineral phases or greater dilution by barren intervals rather than a fundamental discontinuity in the hydrothermal system.

From an exploration perspective, As anomalies in intervals with subeconomic Au contents — particularly in the distal parts of the ore zones and at depth — should be regarded as significant exploration targets. Conversely, the consistent negative Au–Mg correlation (r = −0.106 to −0.409) provides a complementary negative indicator. The combined use of As as a positive and Mg as a negative geochemical indicator offers a practical tool for prioritising drill hole intervals.

Conclusions

Univariate statistical analysis and Pearson correlation matrices applied to a dataset of over 40,000 drill hole intervals from the *Milin Kamak* deposit yield the following principal conclusions.

Descriptive statistics reveal a well-defined geochemical zonality across the ore zones. Gold attains its highest mean concentrations in Ore Zone 1 and decreases systematically toward the peripheral zones. Lead and zinc peak in the western sector of Zone 1 and decrease eastward, while arsenic shows an independent distribution with elevated values in Zones 3 and 6. The inverse Au–Ag relationship across all zones indicates that the Au/Ag ratio is a meaningful indicator of mineralisation style and spatial position.

The correlation structure of gold differs fundamentally between the two sectors of Ore Zone 1. In the western sector, gold participates in a broad multi-element positive correlation cluster encompassing Ag, As, Bi, Cd, Cu, Pb, S, Sb, and Zn, consistent with the sulphosalt-bearing quartz–polymetallic assemblage. In the eastern sector, the correlation cluster is reduced and gold associates primarily with As and Mn, reflecting the dominance of the pyrite–arsenopyrite paragenesis and Mn-carbonate veining.

Arsenic is the only element that maintains a statistically significant positive correlation with gold across all ore zones (r = 0.351–0.743). It is identified as the sole reliable deposit-wide geochemical pathfinder for gold. The consistent negative Au–Mg correlation across all zones (r = −0.106 to −0.409) indicates that Mg-rich intervals are associated with propylitic wall-rock alteration rather than productive sulphide-bearing mineralisation. Magnesium therefore serves as a reliable negative geochemical indicator, effectively marking Au-barren intervals.

Acknowledgements. The authors thank *Thrace Resources Ltd* for the provided data and *Seequent Limited* for the *Leapfrog Geo* software license used in 3D modelling and geostatistical analysis. The research is funded by project #GPF-259 of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”.

References

Arehart, G. B., Chryssoulis, S. L., Kesler, S. E. (1993). Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits: implications for depositional processes. *Economic Geology, 88*, 171–185; https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.1.171.

Cook, N. J., Ciobanu, C. L., ~~A.~~ Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat, B., Melcher, F. (2009). Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 73*, 4761–4791; https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045.

Dabovski, C., Kamenov, B., Sinyovsky, D., Vasilev, E. Dimitrova, E., Bairaktarov, I. (2009). Upper Cretaceous geology. In: Zagorchev, I., Dabovski, C., Nikolov, T. (Eds.), *Mesozoic Geology of Bulgaria*. Marin Drinov Academic Publishing House, Sofia, 305–611 (in Bulgarian).

Iovchev, D., Strahilov, S. (2026). New data on silver-bearing mineralisation in the southern periphery of the *Milin Kamak* deposit, Western Srednogorie. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 69*, in press (in Bulgarian, with English abstract).

Marinov, I., Popov, K., Temelakiev, N. (2019). Volcanic ring morphostructures in the Western Srednogorie, Bulgaria. *Journal of Mining and Geology Sciences, University of Mining and Geology*, *62*, 5–10.

Marinov, I., Popov, K., Ruskov, K., Nikolova, D. (2019). Factor analysis of the geochemical associations in the *Milin Kamak* ore deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 80*, 3 (Geosciences 2019), 142–144.

Moritz, R., Petrunov, R., Stoykov, S., Todorov, J., Strashimirov, S. (2007). The Breznik gold prospect, Late Cretaceous Srednegorie belt, Bulgaria: evidence for an epithermal system telescoping a porphyry environment. – The 9th Biennial SGA Meeting. Dublin, 193–196.

Nikolova, D., Dobrev, S., Ruskov, K. (2019). Mineralisation in ore zone 1, the *Milin Kamak* deposit, Western Srednogorie, Bulgaria. *Journal of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 62*, 1 — Geology and Geophysics, 11–16.

Nikolova, D. (2022). Mineral associations in the geochemical halos of the *Milin Kamak* ore deposit, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 83*, 3 (Geosciences 2022), 31–34; https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.31.

Novakova, A., Marinov, I., Pristavova, S., Jovchev, D. (2024). New data occurrence of K-feldspathisation in the *Milin kamak* deposit, Breznik, Western Srednogorie. *Rev. Bulg. Geol. Soc., 85*, 2, 187–190.

Popov, P., Berza, T., Grubić, A., Dimitru, I. (2002). Late Cretaceous Apuseni–Banat–Timok–Srednogorie (ABTS) magmatic and metallogenic belt in the Carpathian–Balkan Orogen. *Geologica Balcanica, 32*, 145–163.

Popov, K. (2016). 3D modelling of the geochemical associations in the Asarel porphyry copper deposit (Bulgaria). *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 69*, 9, 1175–1182.

Sabeva, R., Mladenova, V. (2012). Mineral composition of epithermal gold-silver deposit *Milin Kamak*, Western Srednogorie. *Annual of Sofia University "St. Kliment Ohridski", Faculty of Geology and Geography, 104*, 1 — Geology, 65–88 (in Bulgarian with English abstract).

Sabeva, R., Mladenova, V., Mogessie, A. (2017). Ore petrology, hydrothermal alteration, fluid inclusions, and sulphur stable isotopes of the *Milin Kamak* intermediate sulphidation epithermal Au-Ag deposit in Western Srednogorie, Bulgaria. *Ore Geology Reviews, 88*, 400–415; https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.013.

Strahilov, D., Doychev, P., Dimitrov, I. (2022). A shear-related strike-slip fault mechanism responsible for ore shoot formation in the *Milin Kamak* Au-Ag deposit in the Breznik area, southwestern Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 83*, 3 (Geosciences 2022), 55–58.

Strahilov, D. (2024). Structural analysis of oriented drill core data by a stereographic method for underground mining purposes. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 67*, 2, 80-83 (in Bulgarian, with English abstract).

Strahilov, D., Marinov, I. (2025). New data for the fault structures from the underground mine works of the *Milin Kamak* deposit, Western Bulgaria. *Rev. Bulg. Geol. Soc., 86*, 2, 194–199. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.2.194.

2D GEOELECTRICAL TOMOGRAPHY SURVEY AT A PROPOSED WASTEWATER TREATMENT PLANT SITE

Tsvetelin Petrov, Atanas Kisyov, Nikolay Stoyanov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: at.kisyov@mgu.bg

ABSTRACT. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is a modern non-invasive geophysical method widely used for investigating near-surface geological structures, as well as engineering and geological conditions. This paper presents the results of an ERT survey conducted at the site designated for the construction of the Devin Wastewater Treatment Plant, located on the left non-flooded terrace of the Devinska river, southeast of the town of Devin, Bulgaria. The main objective of the study was to characterise the geological section to a depth of 15–25 m using a non-invasive approach and to determine the spatial extent and thickness of the deposited construction waste. The survey was carried out along four geophysical profiles with a total length of 560 m using a four-electrode Wenner–Schlumberger array and a Terrameter SAS 1000 resistivity system. The acquired data were processed and interpreted using the RES2DINV software package, which enabled the determination of the true resistivity distribution within the subsurface. Interpretation of the results revealed three main resistivity zones. **Zone A** was interpreted as a layer of deposited construction waste characterised by resistivity values ranging from 80 to 450 Ωm and an average thickness of approximately 5.5 m. **Zone B** corresponds to highly weathered and water-saturated breccia-conglomerates exhibiting relatively low resistivity values, whereas **Zone C** represents relatively intact and weakly altered parts of the bedrock characterised by higher resistivity values. Several localised low-resistivity anomalies were also identified and interpreted as fine-grained, highly water-saturated materials. Analysis of the geoelectrical sections allowed estimation of the groundwater table, which at the time of the survey was located at depths ranging from 2–3 m to 12.5 m below the ground surface. The obtained results confirm the high effectiveness of the ERT method for engineering and geological investigations and provide reliable information on the subsurface structure of the site, essential for the design and construction of the Devin Wastewater Treatment Plant.

Key words: electrical resistivity tomography, ERT, engineering geology, construction waste, groundwater.

2D ЕЛЕКТРОТОМОГРАФСКО ПРОУЧВАНЕ НА ПРОУЧВАТЕЛНА ПЛОЩАДКА ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ПРЕЧИСТВАТЕЛНА СТАНЦИЯ ЗА ОТПАДНИ ВОДИ

Цветелин Петров, Атанас Кисьов, Николай Стоянов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Електротомографията (ERT) е съвременен неинвазивен геофизичен метод, широко използван за изследване на приповърхностния геоложки строеж и инженерногеоложките условия. В настоящата работа са представени резултатите от електротомографско проучване, проведено на площадката, определена за изграждане на Пречиствателна станция за отпадни води (ПСОВ) „Девин“, разположена в лявата незаливна тераса на р. Девинска, югоизточно от гр. Девин. Основната цел на изследването е по неинвазивен път да се диференцира геоложкият разрез до дълбочина 15–25 m и да се определят пространствените граници и дебелината на депонираните строителни отпадъци. Измерванията са проведени по четири геофизични профила с обща дължина 560 m чрез четириелектродна схема Wenner–Schlumberger, използвайки апаратура Terrameter SAS 1000. Получените данни са обработени и интерпретирани посредством програмния пакет RES2DINV, чрез който е определено разпределението на действителните електрични съпротивления в подповърхностното пространство. Интерпретацията на резултатите разкрива три основни електросъпротивителни среди. **Зона А** е интерпретирана като пласт от депонирани строителни отпадъци с електрично съпротивление от 80 до 450 Ωm и средна дебелина около 5,5 m. **Зона В** съответства на силно изветрели и водонаситени брекчоконгломерати, характеризиращи се с по-ниски стойности на съпротивлението, а **Зона С** отразява относително здрави и слабо променени части от скалния масив с по-високи стойности на електричното съпротивление. Установени са и локални нискоомни аномалии, свързани с финообломъчни и силно водонаситени материали. Анализът на геоелектричните разрези позволява да бъде оценено и нивото на подземните води, което към момента на измерването се намира на дълбочина между 2–3 и 12,5 m под терена. Получените резултати потвърждават високата ефективност на метода ERT при инженерногеоложки проучвания и предоставят надеждна информация за строежа на площадката, необходима за проектирането и изграждането на ПСОВ „Девин“.

Ключови думи: електротомография, ERT, инженерна геология, строителни отпъдци, подземни води.

Въведение

Обект на електротомографското проучване е отредената площадка за изграждане на Пречиствателната станция за отпадни води (ПСОВ) „Девин“. Проучваният участък е разположен в лявата незаливна тераса на р. Девинска, на около 1 km югоизточно от гр. Девин – фиг. 1. Теренът е използван за насипване на строителни отпадъци, които заемат територия с площ около 5.35 декара. Насипаните материали са заравнени с лек наклон на юг до надморска височина между 688.5 и 691.5 m. В западна посока скатовете на речната долина се издигат рязко до коти 710-730 m, а в посока към реката насипаните материали стръмно западат до естествените нива на речната тераса – около коти 675-680 m. Предполагаемата дебелина на насипите не надхвърля 6-8 метра.

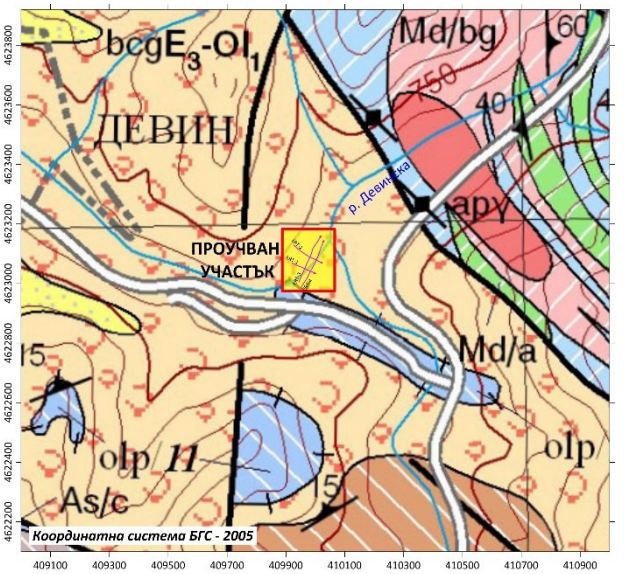
Основна цел на електротомографското проучване е по неинвазивен път в рамките на отредената за изграждане на ПСОВ „Девин“ площадка да се диференцира геоложкия разрез до дълбочина 15-25 m, с акцент картиране на пространствените граници и определяне на дебелината на депонираните строителни отпадъци.

Геоложки строеж на района

В геоложкия строеж на проучвания участък и прилежащите му територии изцяло доминират скалите от състава на Задругата на полимиктовите брекчоконгломерати ($bcgE_3$-Ol_1) – фиг. 2. На тази геоложка единица в строежа участват брекчоконгломерати, конгломерати и по-рядко пясъчници (Саров и др., 2009). Брекчоконгломератите и конгломератите са полимиктови, гранит-олигомиктови и рядко мраморно-олигомиктови. Късовият състав включва освен преобладаващите кластити от гнайси също и мрамори, шисти, гнайси и амфиболити.

Големината на късовете варира в широк диапазон – от дребночакълни до валунно-блокови и блокови. Матриксът е гравиен до песъчливо-гравиен, полимиктов, по-рядко с карбонатна компонента. Пясъчниците се срещат като неиздържани прослойки и лещи с дебелина до 1-2 m. В района на Девин дебелината на задругата достига до над 350-400 m. Възрастта й се определя като късноеоценска-ранноолигоценска. В горната приповърхностна част скалите са много силно изветрели и напукани, на места частично до напълно дезинтегрирани. Дебелината на вторично промененатa зона варира от няколко метра до 10-15 m и повече.

Фиг. 1. Местоположение на проучвания участък (по снимка от Google Earth)



Фиг. 2. Геоложка карта на района (По Геоложка карта на България, М 1:50 000. Картен лист Девин – Саров и др., 2009)

Палеогенският седиментен комплекс е слабоводоносен. Акумулираните в него подземни води са в хидравлична връзка с р. Девинска. Може да се предполага, че в границите на проучвания участък водните нива са на дълбочина 5-10 m под терена, а в бреговата зона и по-плитко от 1 m.

Методика на електротомографските изследвания

Електротомографията (Electrical Resistivity Tomography, ERT) е широко използван геофизичен метод за изследване и характеризиране на приповърхностните геоложки условия при геоложки, инженерногеоложки и екологични проучвания.

За изследване на особеностите на инженергеоложкия разрез се използва разнообразен набор от геофизични методи на проучване, в зависимост от конкретните задачи и от условията на терена (Tzankov and Demireva, 2013; Tomova, 2023; Stoyanov and Dimovski, 2020; Grigorova and Koprev, 2018, Milenkovic, 2025).

Принципи на електротомографията (ЕРТ)

При двумерната електротомография, измерването на съпротивленията се извършва чрез въвеждане на електричен ток в земята с помощта на два захранващи (токови) електрода и регистриране на предизвиканата потенциална разлика в два приемни (потенциални) електрода. Най-често използваните схеми за разположение на електродите са Wenner, дипол-дипол, Wenner-Schlumberger, полюс-полюс и полюс-дипол.

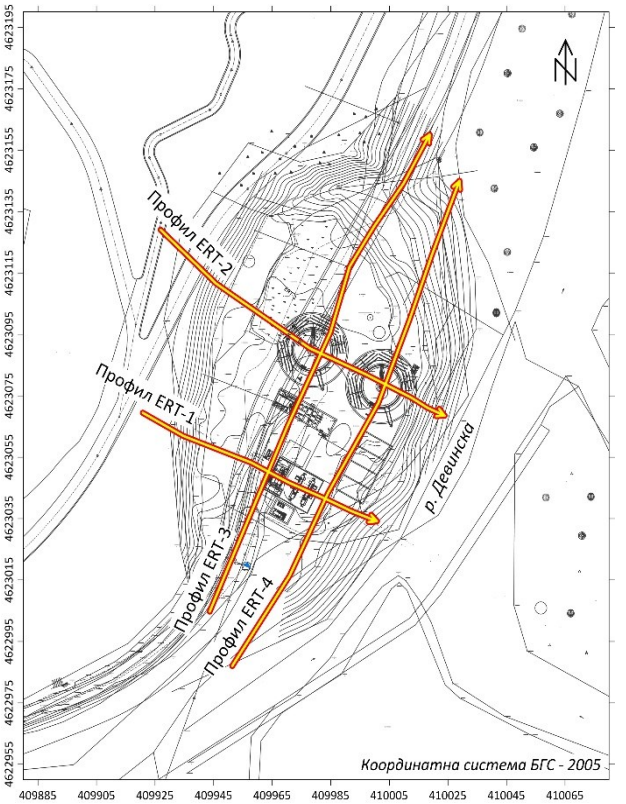
За да се увеличи областта на хоризонтално покритие на системата, особено при ограничен брой електроди, се използва специална процедура на стъпковото преместване (“приплъзване”) на кабела. За целта след извършването на последователността на измервания, кабелът се придвижва по посока на единия край на профила на разстояние, кратно на единичното разстояние между електродите. Всички измервания, които включват електроди не припокриващи оригиналния край на профила се повтарят. Стъпковото преместване на кабела с примерна стъпка 2a се илюстрира на фиг. 3.

Фиг. 3. Принципна схема на стъпково премесване на кабела с примерна стъпка 2a

Теренни измервания

Проведените в рамките на настоящето проучване измервания са изпълнени по четири геофизични профила (фиг. 4) с обща дължина на профилите от 560 метра, а разстоянието между измервателните електроди е 5 м.

Измерванията са проведени по 4-електродна схема Wenner-Schlumberger, къде са използвани две коси от 12 жилен кабел. Регистрацията е извършена с помощта на апаратура Terrameter SAS 1000 производство на шведската фирма ABEM. Данните от теренните измервания са интерпретирани с компютърна програма RES2DINV, с която е детерминирано разпределението на действителните електрични съпротивления в подповърхностното пространство.



Фиг. 4. Разположение на геофизичните профили ERT- 1, ERT- 2, ERT- 3 и ERT- 4 (геодезична снимка на терена към 2025 г.)

Обработка и интерпретацията на данните

Данните от полевите измервания се обработват с помощта на компютърна програма RES2DINV (Loke, 2001). Като входни данни в програмата се въвежда информация за положението на електродите на повърхността и за привидното съпротивление във всяка точка. На тази основа се съставя 2D модел на средата, като програмата автоматично поделя подповърхностното пространство на голям брой блокове. След това по метода на най-малките квадрати определя съпротивлението на всеки блок по такъв начин, че изчисленото привидно съпротивление от модела да съвпада възможно най-добре с измереното електрично поле (de Groot-Hedlin and Constable, 1990; Loke and Barker, 1996).

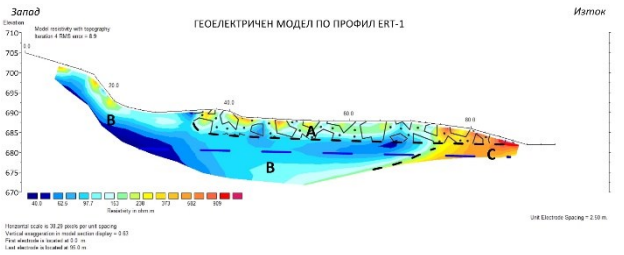
Като краен резултат програма RES2DINV дава реалното разпределение на електричните съпротивления в подповърхностното пространство.

Детерминираният геоелектричен модел се трансформира в геоложки на базата на:

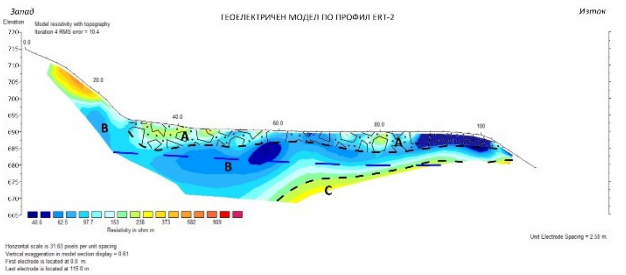
- обща информация за геоложките, инженерногеоложките, хидрогеоложите и техногенните условия в изследвания район;
- литературни данни за специфичните електрични съпротивления на различните типове скали (Keller and Frischknecht, 1966; Daniels and Alberty, 1975).

2.4. Резултати от измерванията

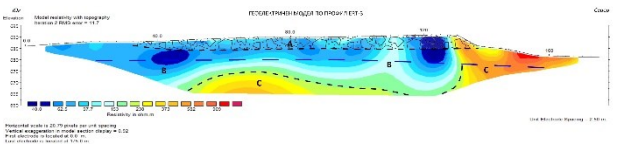
Получените по четирите профила геоелектрични разрези са представени на фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7 и фиг. 8.



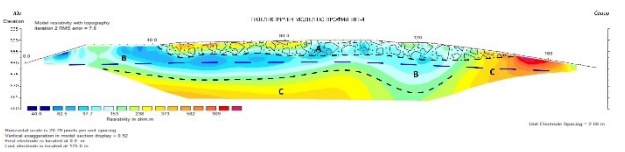
Фиг. 5. Зониране по електрично съпротивление в разреза по профил ERT-1



Фиг. 6. Зониране по електрично съпротивление в разреза по профил ERT-2



Фиг. 7. Зониране по електрично съпротивление в разреза по профил ERT-3



Фиг. 8. Зониране по електрично съпротивление в разреза по профил ERT-4

Заключение

Комплексният анализ на получените от електротомографското проучване резултати (фиг.5, фиг. 6, фиг. 7 и фиг. 8) при отчитане на геоложката, хидрогеоложката и техногенна информация за изследвания район и резултатите от направените теренни огледи дава основание, изследваният разрез по четирите геофизични профила, да се представя от три електросъпротивителни среди (зони), картиращи пространствените граници на депонираните строителни отпадъци, пластове с различен литоложки състав и зони с различна водонаситеност:

1. **Първата електросъпротивителна среда** (**Зона А**) е установена в централните части на разрезите по профили ERT-1, ERT-2, ERT-3 и ERT-4, съответно в интервала от 38-мия до 90-тия метър по профил ERT-1, от 30-тия до 105-тия метър по профил ERT-2, от 32-рия до 138-мия метър по профил ERT-3 и от 41-вия до 150-тия метър по профил ERT-4. Стойностите на електрично съпротивление са в диапазона от 80 Ωm до 450 Ωm, рядко извън тези граници. Най-вероятно **Зона А** очертава пространствения обхват на депонираните

строителни отпадъци в разрезите по четирите профила. Дебелината на отпадъците по профил ERT 1, е най-често между 3.5 и 6.5 m, средно около 4.5 m; по профил ERT 2 – между 3 и 8.4 m, средно около 5 m; по профил ERT 3 – между 2-3 и 6 m, средно около 5.5 m; а по профил ERT 4 – между 2-3 и 8 m, средно около 6 m. Може да се приеме, че средната за площадката дебелина на **Зона А**, респ. на пласта от строителни отпадъци е около 5.5 m.

2. **Втората електросъпротивителна среда (Зона В)** се характеризира с относително ниски стойности на електричното съпротивление – от 30 Ωm до 180 Ωm. Най-вероятно тази зона картира горните части на неогенския скален комплекс, представени главно от силно изветрели и напукани брекчоконгломерати, на места частично дезинтегрирани, в основната си част водонаситени
3. **Третата електросъпротивителна среда (Зона С)** притежава относително високи стойности на електричното съпротивление в изследвания разрез по четирите профила – от 180 Ωm до 1000 Ωm, рядко повече. Най-вероятно тази зона картира слабозасегнати от вторични промени и относително по-здрави части на скалния комплекс, представени основно от брекчоконгломерати и конгломерати.

В първите две електросъпротивителни среди **(Зона А и Зона В)** са установени няколко аномални нискоомни зони, в които са регистрирани най-ниските стойности на електричното съпротивление – от 30 Ωm до 50 Ωm. Най-вероятно тези аномалии маркират участъци, в които доминират много дребно- и финозърнести материали или напълно дезинтегрирани подзони, с висока степен на водонасищане.

Геоелектричните разрези по четирите геофизични профила и регистрираните водни стоежи в р. Девинска предполагат, че в момента на измерването нивото на подземните води е на дълбочина от 2-3 до 12.5 m под терена, респ. около коти 176.5-182.5 m. На фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7 и фиг. 8 предполагаемото разпределение на пиезометричните (водните) нива в скалния масив е представено с прекъсната синя линия.

Литература

Саров, С., К. Найденов, Т. Железарски, И. Георгиева, Д. Иванова, Е. Войнова, А. Попов, Н. Марков, Р. Маринова. (2009). Обяснителна записка към геоложката карта на Република България М 1:50 000. Картен лист К-35-73-Г (Девин). МОСВ, БНГС, София, 63 с.

Daniels, F., Alberty, R. (1975). *Physical Chemistry*. John Wiley & Sons, New York, USA, 687 p.

de Groot-Hedlin, C and Constable, S. (1990) Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, vol. 55, No. 12 (December 1990); pp. 1613-1624

Griffiths, D. H., R. D. Barker. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. – Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226 p.

Grigorova, M., I. Koprev. (2018). Application of electrical resistivity tomography for sand underwater extraction. – In:Proceedings of the 4th International Scientific ConferenceGEOBALCANICA. 15–16 May, North Macedonia, 15–20

Keller, G., Frischknecht, F. (1966). Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, Oxford, 517 p.

Loke, M.H. (2001). A Practical Guide to RES2DINV Version 3.4. Geotomo Software, Penang, Malaysia, 129 p.

Loke, M.H., Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131–152 p.

Milenkovich, B. (2025). Geophysical Monitoring for Sustainable Mining: Case Studies Using Electrical Resistivity Tomography. Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 68/2025, pp 35 - 39, ISSN 2738-8808

Stoyanov, N., Dimovski, S. (2020). Geoelectrical approach for differentiating the hydrogeological section in the study of a tailings pond site. In: Proceedings of the 6th International Scientist Conference. GEOBALCANICA

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: ase study of Southeastern Bulgaria. Eurasia Proc. Sci. Technol. Eng. Math. (EPSTEM) 26, 341–347

Tzankov, Ch., Demireva, E. (2013). GPR through a Water Mirror Defining the Topography of a Bottom and the Depth of the Sediments beneath the Water Layer. 7th Congress of the Balkan Geophysical Society, Oct 2013, cp-362-0010. ISBN: 978-90-73834-55-2. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131760

COMBINING FIELD SPECTROSCOPY AND ELECTRICAL METHODS IN CRITICAL RAW MATERIAL EXPLORATION

Stefka Pristavova[1,2], Kamelia Marinova[1,2], Marlena Yaneva[2], Kalin Ruskov[1,2], Yordanka Donkova[2], Danail Yovchev[1,2], Milen Stavrev[2], Hristiana Georgieva[2], Rositsa Ivanova[2], Alexander Radulov[2]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: stprist@mgu.bg
[2]Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia;

ABSTRACT. An integrated methodology combining electrical resistivity tomography (ERT), induced polarisation (IP), and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectroscopy was applied at two contrasting geological settings in Bulgaria within the CleanExplore project (BG-RRP-2.017-0035): the Radulovtsi Cu-porphyry occurrence, Burel ore field, and the Svidnya potassic-alkaline pluton, Western Balkan Mountains. At Radulovtsi, the ERT section delineates a low-resistivity alteration zone above the mineralised body, while an IP chargeability anomaly exceeding 80 ms coincides spatially with the Cu-mineralisation outcrop. Field XRF data define a copper anomaly reaching 0.80%, with positive regression relationships established for resistivity-Cu (r = 0.49) and for IP-Cu (r = 0.41). At Svidnya, the ERT section distinguishes strongly altered K-alkaline igneous rocks from fresh K-alkaline igneous rocks, while pXRF measurements detect trace CRM-relevant elements (U, Th, Rb, Sr, Ba, Nb) preferentially in less altered domains. The results confirm the effectiveness of the combined non-destructive ERT-IP-pXRF approach for environmentally responsible preliminary CRM exploration.

Key words: critical raw materials (CRM); copper porphyry; alkaline igneous rocks; Bulgaria.

КОМБИНИРАНЕ НА ПОЛЕВА СПЕКТРОСКОПИЯ И ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МЕТОДИ В ПРОУЧВАНЕТО НА КРИТИЧНИ СУРОВИНИ

Стефка Приставова[1,2], Камелия Маринова[1,2], Марлена Янева[2], Калин Русков[1,2], Йорданка Донкова[2], Данаил Йовчев[1,2], Милен Ставрев[2], Христиана Георгиева[2], Росица Иванова[2], Александър Радулов[2]

[1]Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
[2]Геологически институт, Българска академия на науките, 1113 София

РЕЗЮМЕ. Интегрирана методология, комбинираща електросъпротивителна томография (ЕСТ), предизвикана поляризация (ПП) и преносима рентгенофлуоресцентна (pXRF) спектроскопия, беше приложена на два контрастни геоложки обекта в България в рамките на проект CleanExplore (BG-RRP-2.017-0035): рудопроявлението при Радуловци от порфирно-меден тип в рудно поле Бурел, и калиево-алкалния плутон при Свидня в Западна Стара планина. При Радуловци ЕСТ разрезът очертава нискосъпротивителна зона на хидротермална промяна над рудоносното тяло, докато аномалия на предизвиканата поляризация, надвишаваща 80 ms, пространствено съвпада с повърхностното разкритие на Cu-минерализацията. Теренните pXRF данни определят медна аномалия, достигаща 0,80%, с установени положителни регресионни зависимости между съпротивление и Cu (r = 0,49) и между ПП и Cu (r = 0,41). При Свидня ЕСТ разрезът разграничава интензивно променени от слабо изменени калиево-алкални магмени скали, като pXRF измерванията регистрират следови концентрации на елементи от значение за критичните суровини (U, Th, Rb, Sr, Ba, Nb) предимно в по-слабо променените скални разновидности. Резултатите потвърждават ефективността на комбинирания неразрушителен подход ЕСТ-ПП-pXRF за екологосъобразно предварително проучване на критични суровини.

Ключови думи: критични суровини; порфирна медна минерализация; алкални магмени скали; България.

Introduction

The accelerating global transition toward green and digital technologies has significantly intensified the demand for critical and strategic raw materials (CRM), placing considerable pressure on domestic geological exploration capacities within European Union member states. The EU Critical Raw Materials Act (CRMA) mandates that at least 10% of annual raw material consumption be sourced domestically, and requires member states to implement national exploration programmes encompassing geological mapping, geochemical sampling campaigns, and geoscientific surveys, including geophysical investigations. In this legislative context, the development of rapid, cost-effective, and environmentally responsible exploration methodologies capable of delineating prospective mineralisation with minimal surface disturbance represents a priority research objective for the European geoscientific community.

Bulgaria occupies a geologically favourable position within the Balkan metallogenic province, hosting a diverse range of ore deposit types, including copper-porphyry, epithermal gold-silver, skarn, and polymetallic vein systems, as well as potentially CRM-bearing alkaline igneous complexes. Despite this geological endowment, Bulgaria's potential for critical and strategic raw materials including Bi, Co, Cu, Ga, Ge, Li, Mn, Ni, platinum-group elements, and rare earth elements (REE) for magnets (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm, Ce), remains largely unquantified, primarily due to limited targeted geological investigations and the absence of systematic modern exploration campaigns.

Electrical geophysical methods, and specifically electrical resistivity tomography (ERT) combined with induced polarisation (IP), represent the most widely applied near-surface methods for imaging subsurface geological structures and mapping mineralisation. Their sensitivity to sulphide mineral distributions, hydrothermal alteration zones, and lithological contrasts makes them particularly suitable for CRM exploration targeting. However, a well-recognised limitation of geophysical methods applied in isolation is the inherent ambiguity of subsurface models: a low-resistivity anomaly, for instance, may equally reflect sulphide mineralisation, clay-rich alteration, or elevated pore fluid content (Binley and Slater, 2020). Independent geochemical information is therefore essential for reliable geological interpretation of geophysical cross-sections.

Portable X-ray fluorescence (pXRF) spectroscopy has emerged in recent years as a powerful complementary field tool,

enabling real-time, non-destructive elemental analysis of rocks, soils, and sediments at the point of measurement. The method is particularly well-suited to dynamic exploration workflows, where the ability to modify sampling strategies in response to immediate field results significantly reduces costs and increases targeting efficiency (Lemière and Uvarova, 2019). While pXRF is semi-quantitative and less sensitive than laboratory methods for light elements and many REE, its high sampling density compensates for these limitations by providing spatial coverage that is unachievable through conventional laboratory sampling alone.

The CleanExplore project (Investment № BG-RRP-2.017-0035), funded under Bulgaria's Recovery and Resilience Plan, was conceived to develop and test an integrated exploration methodology combining synchronous field measurements of electrical resistivity, induced polarisation, and elemental composition using portable XRF spectroscopy. The central hypothesis is that these two fundamentally different but complementary methods will mutually reinforce each other, thereby increasing the efficiency, speed, and environmental sustainability of field exploration while reducing costs. The methodology complies fully with the "do no significant harm" principle, as all three methods are non-destructive and non-invasive, eliminating the requirement for drilling or excavation at the preliminary exploration stage.

The present paper describes the CleanExplore project methodology in detail and illustrates its application through two case studies representing contrasting geological settings and mineralisation styles: the Radulovtsi Cu-porphyry occurrence within the Burel ore field, Western Srednogorie, and the Svidnya potassic-alkaline pluton in the Western Balkan Mountains. These two sites were selected as illustrative examples because they represent fundamentally different CRM exploration targets – a sulphide-bearing porphyry copper system on the one hand, and an alkaline igneous complex bearing large-ion lithophile and rare earth elements on the other – thereby demonstrating the broad applicability of the combined methodology across contrasting lithological and metallogenic environments. The results presented are preliminary and are intended to demonstrate the operational effectiveness of the integrated approach rather than to provide definitive assessments of the CRM potential of the investigated sites.

Geological Settings

The CleanExplore project encompassed geophysical and geochemical surveys at thirteen sites distributed across Bulgaria (Fig. 1, Table 1), selected to represent a broad range of geological environments and potential CRM targets.

The Radulovtsi Cu-porphyry occurrence, Burel ore field

The Radulovtsi site is located within the Burel ore field, Western Srednogorie, which constitutes a northwest-oriented metallogenic strip extending from the town of Bankya westward into the territory of Serbia. Within this structural corridor, a series of small Late Cretaceous ore-bearing paleovolcanoes – the Dragotinski, Zlatushinski, Klisurski, and Radulovski centres — collectively form the so-called Burel Group (Angelov et al., 2010; Marinova et al., 2010). The Radulovtsi ore occurrence is hosted within a subvolcanic intrusion of intermediate composition, comprising quartz-diorite porphyrites in the central portions of the body and andesites in its peripheral parts. The ore occurrence is classified as a copper-porphyry type, with copper as the principal economic element and gold as a secondary one. This site was selected as a case study because it represents a well-defined sulphide-bearing target, where the IP method's sensitivity to disseminated metallic sulphides and the direct relevance of pXRF copper measurements to the exploration objective provide an optimal setting for evaluating the performance of the combined methodology.

The Svidnya potassic-alkaline pluton, Western Balkan Mountains

The Svidnya site is located in the south-southwestern part of the village of Svidnya, Western Balkan Mountains, where small intrusive bodies of the potassic-alkaline igneous rocks of the Svidnya association crop out. The Svidnya pluton consists of several closely situated small Early Carboniferous bodies emplaced within the Ordovician metasediments of the Grohoten Formation (Angelov et al., 2010; Sachanski and Zareva, 2024). The association is geochemically characterised by significant enrichment in large-ion lithophile elements (LILE) (Ba, Sr, Rb), high-field-strength elements (Zr, Th, U, Nb), and light rare earth elements (LREE) (La, Ce, Nd), with apatite identified as the principal REE-bearing accessory phase (Vladykin et al., 2001). At the contact between the pluton and the Ordovician metasediments, uranium mineralisation and radioactive anomalies have been reported along fault structures (Popov and Popov, 2022). This site was selected as a case study because it represents a fundamentally different CRM target type – an alkaline igneous complex bearing LILE and LREE.

Materials and Methods

Overview of the integrated approach

The methodological innovation of the CleanExplore project consists of the synchronous acquisition of three complementary datasets along common field profiles: electrical resistivity, induced polarisation chargeability, and portable XRF elemental concentrations. This integration is designed to overcome the principal limitation of each method applied independently. Electrical methods provide spatially continuous subsurface imaging but lack direct chemical information and are subject to interpretational ambiguity. Portable XRF provides direct elemental data but only at the surface and at discrete measurement points. Their combination along common profiles enables real-time geochemical ground-truth for geophysical anomaly interpretation, geological interpretation of geophysical cross-sections based on heterogeneous information combining resistivity, IP chargeability, and surface elemental composition, and spatial extrapolation of surface geochemical signatures to depth in accordance with geophysical variability.

The workflow is structured as a dynamic field plan (Robbat et al., 1998) in which initial pXRF reconnaissance scanning guides the positioning and orientation of geophysical measurement profiles, and real-time pXRF results acquired simultaneously with geophysical measurements allow immediate adjustment of sampling density, profile length, and laboratory sample selection priorities. This operational flexibility represents a key advantage over conventional sequential exploration programmes in which geophysical and geochemical datasets are acquired and interpreted independently at different project stages, with laboratory results typically available only weeks to months after field data collection.

The overall methodology is structured in two sequential phases corresponding to the two modules of the CleanExplore project. In the first phase, a conventional approach is applied at ten pre-selected sites, combining geophysical profiling with the collection of samples for laboratory petrological and geochemical analyses. The results of this phase inform the selection of a minimum of two sites for detailed investigation in the second phase, where the novel synchronous measurement approach is applied and geostatistical spatial models of CRM distribution are created.

Module 1 (Months 1–12), field geophysical surveys applying the electrical resistivity and induced polarisation methods were carried out, and samples were collected for laboratory petrological-geochemical analyses at ten pre-selected sites: Sliven (Glushnik), Tvarditsa (Sborishte), Shipka, Teteven (Lesidren), Dimitrovgrad (Parvomay), Sofia (Radulovtsi and Klisura), Belogradchik, Sandanski (Rupite, Kozhuh and Novo Delchevo), Simitli (Cherniche), and Svoge (Svidnya) (Fig. 1; Table 1). At each site, structural relationships were clarified, and factors favourable for critical and strategic raw material mineralisation were assessed, based on field observations of rock type relationships and geophysical cross-sections. The following laboratory analyses were performed: X-ray diffraction analysis at an external laboratory, petrographic microscopic analyses, and elemental and isotopic analysis by LA-ICP-MS at in-house laboratories. The results of the laboratory petrological-geochemical analyses and the field observations and measurements were analysed in the context of the genesis, controlling factors for mineralisation, and prospectivity of each site. A minimum of two sites were subsequently selected for detailed investigation in Module 2.

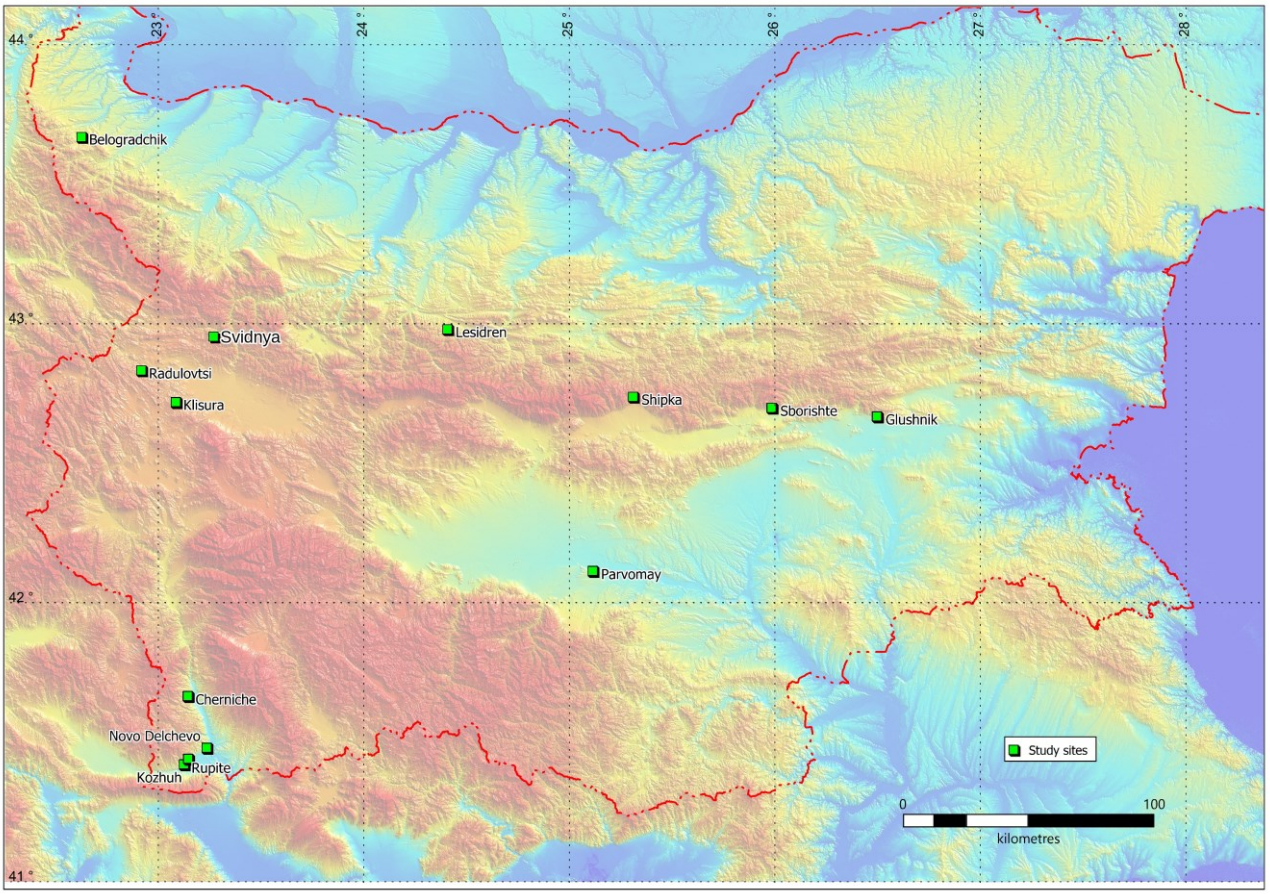


Figure 1. Geophysical surveys at sites of different geological environments across the country employed measurements of electrical resistivity and induced polarisation along profiles

Module 2 (Months 11–19), field activities and laboratory analyses were analogous to those of Module 1, complemented by field measurements with the pXRF spectrometer carried out along the geophysical measurement profile lines and areally. The data from the field geophysical and geochemical profiles were correlated. These data, together with the data from the laboratory analytical activities, were processed and interpreted, and on their basis geostatistical models of the predicted spatial distribution of critical and strategic raw materials were created, both in plan and in cross-section.

Electrical Resistivity Tomography and Induced Polarisation

Field geophysical measurements were carried out using an ABEM Terrameter SAS 1000 multi-electrode system with an ES 10-64C electrode selector, enabling simultaneous acquisition of apparent electrical resistivity and time-domain induced polarisation chargeability data.

At Radulovtsi, a profile of 160 m in length was established with 2 m electrode spacing, employing a Wenner-Schlumberger array configuration selected for its optimal compromise between lateral resolution and depth of investigation. At Svidnya, a profile of 80 m in length was established with 1 m minimum electrode

spacing, employing a dipole-dipole array configuration. Laser levelling was performed at both sites to incorporate accurate surface topography into the inversion models (Marinova et al., 2026).

Table 1. *The CleanExplore project investigation sites with target critical raw materials and deposit genetic types.*

Sites	***Critical raw material***	***Genetic type***
Klisura	Cu, Au, Mo, Ag	Hydrothermal
Radulovtsi	Cu, Au	Hydrothermal
Svidnya	Sr, Zr, Nb, Ce, Y	Magmatic
Glushnik	Mn, Fe	Volcano-sedimentary
Parvomay	Si, Cs	Volcanic
Cherniche	U	Infiltration
Rupite	U	Hydrothermal
Kozhuh	U	Hydrothermal
Novo Delchevo	U	Hydrothermal
Sborishte	U, Pb, Zn, Cu	Hydrothermal
Shipka	Fe	Hydrothermal
Lesidren	Fe	Sedimentary
Belogradchik	Cu, Au	Volcanic

Field X-Ray Fluorescence Spectroscopy

Elemental concentrations were determined in the field using a *Bruker S1 Titan 800* portable X-ray fluorescence spectrometer equipped with a rhodium X-ray tube and a silicon drift detector with a graphene window, enabling detection of a broad range of elements from Mg to U. At Radulovtsi, measurements were performed synchronously with the geophysical survey at each electrode position, yielding 42 measurement points at 2 m intervals along the profile to a total distance of 84 m, corresponding to the section where geochemical data were available for joint interpretation. At Svidnya, measurements were performed at six accessible points with good rock exposure along the 80 m geophysical profile. At each point, the instrument was applied directly to freshly exposed rock or soil surfaces using the factory-calibrated Geochem analytical mode. It is important to note that pXRF results are semi-quantitative, with inherently limited sensitivity for light elements, alkali metals, and most REE, and results are therefore interpreted as qualitative to semi-quantitative indicators rather than definitive elemental concentrations.

Laboratory Petrographic and Geochemical Analysis

Representative rock samples collected along both geophysical profiles were prepared as polished thin sections and examined under transmitted and reflected light using *Leica DM750P* and *Leica DMLP* polarising microscopes equipped with digital cameras, as well as a *Nikon LV100ND* microscope at Svidnya. Elemental and isotopic analyses were performed by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) using a *PerkinElmer ELAN DRC-e* mass spectrometer coupled with a *New Wave UP193FX* laser ablation system at the Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences. X-ray diffraction analyses were performed at an external accredited laboratory on selected samples. Pearson correlation coefficients were calculated for element pairs at both study sites to identify statistically significant geochemical associations and evaluate the coupling between electrical parameters and elemental concentrations along the profiles.

Results

The following section presents selected results from the two illustrative case studies. These results are intended to demonstrate the operational effectiveness and mutual complementarity of the integrated ERT–IP–pXRF methodology rather than to provide definitive assessments of the CRM potential of the investigated sites. Complete datasets from all CleanExplore project sites will be presented in subsequent publications.

Example 1: Sulphide-bearing porphyry system — Radulovtsi Cu-porphyry occurrence

Petrographic context. Petrographic examination of samples from the Radulovtsi subvolcanic body confirms a copper-porphyry mineralisation style with fine disseminated pyrite as the principal ore mineral within quartz-diorite porphyrite. Advanced supergene oxidation is evidenced by malachite veins and iron hydrooxide-stained quartz veins, indicating that a significant proportion of the original sulphide assemblage has been partially replaced by secondary copper carbonate and iron oxide minerals under near-surface oxidising conditions. This petrographic context is directly relevant to the interpretation of both the geophysical and geochemical datasets.

Geophysical and geochemical results. The ERT section reveals resistivity values ranging from approximately 80 to in excess of 220 Ωm. A low-resistivity zone (80–130 Ωm) in the upper portion of the section is interpreted as weathered and clay-altered rock corresponding to the supergene oxidation zone, while elevated resistivity values (180–220 Ωm) at greater depths reflect fresher, less altered host rock. The IP chargeability section reveals a prominent high-chargeability anomaly in the central portion of the profile, with values reaching in excess of 80 ms and extending to approximately 30–35 m depth, spatially coincident with the inferred outcrop of the Cu-mineralisation. Field XRF measurements reveal background copper concentrations of 0.01–0.08% in the western half of the profile, with a sharp increase to a maximum of 0.80% from measurement point 72 onwards, defining a well-developed secondary geochemical halo. Statistical analysis yields a Pearson correlation coefficient of $r = 0.49$ ($R^2 = 0.24$) between resistivity and copper content, and $r = 0.41$ ($R^2 = 0.18$) between IP chargeability and copper content along corresponding profile positions. The geochemical correlation matrix reveals a Cu–Fe_2O_3element association ($r = 0.42$) consistent with a chalcopyrite-pyrite sulphide paragenesis and confirms that copper enrichment is decoupled from the primary lithological framework of the host intrusion (Marinova et al., 2026).

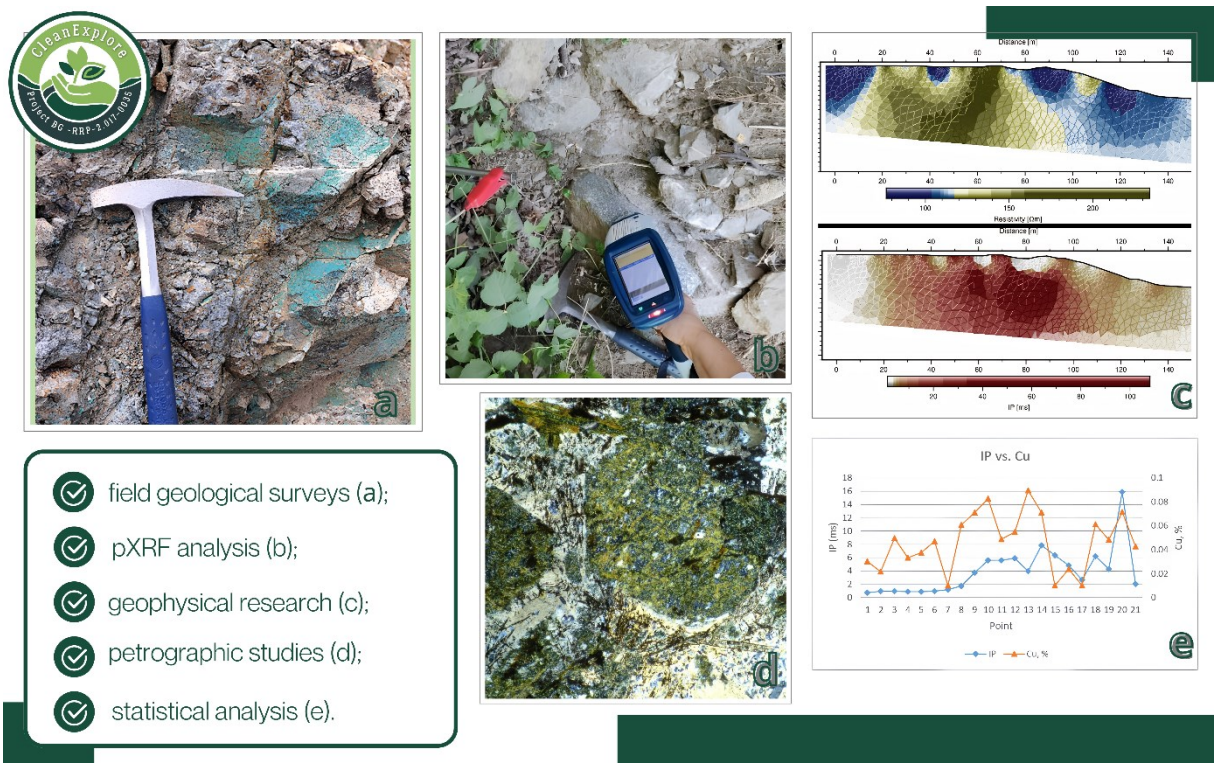


Figure 2. Comprehensive research methodology

Example 2: Svidnya potassic-alkaline pluton, Western Stara Planina

Petrographic context. The geophysical profile at Svidnya intersects melasyenites (shonkinites) and dykes of alkaline syenites displaying varying degrees of hydrothermal and supergene alteration. The primary mineralogy comprises K-feldspar, biotite, augite, amphibole, and abundant accessory apatite identified as the principal REE carrier. The secondary alteration assemblage consists of chlorite-group minerals, fine white mica, clay minerals, carbonates, and iron hydroxides, whose development directly controls both the electrical properties of the rock mass and the surface geochemical signature measurable by pXRF.

Geophysical and geochemical results. The ERT section distinguishes two main subsurface domains:

1. a low-resistivity zone below 600 Ωm from the beginning of the profile to approximately 35 m, corresponding to the most strongly altered portion of the section confirmed by field observation;
2. a higher-resistivity zone of 620–1200 Ωm from 35 m to the end of the profile, reflecting predominantly fresh to weakly altered K-alkaline igneous rock.

The IP model exhibits a heterogeneous pattern reflecting variations in rock composition and alteration intensity. Field pXRF measurements detect trace concentrations of U, Th, Rb, Sr, Ba, and Nb preferentially in less altered rock exposures in the higher-resistivity eastern domain, with pronounced geochemical heterogeneity within the intrusion. Pearson correlation analysis reveals positive correlations among Rb, Th, U, and Ce, consistent with control by felsic mineral phases and late-stage magmatic differentiation. The spatial correspondence between the geophysically delineated fresh rock domain and the pXRF-detected CRM-relevant element enrichments illustrates the direct utility of combining alteration mapping by ERT with surface geochemical screening by pXRF (Marinova et al., 2026).

Conclusions

The integrated application of electrical resistivity tomography, induced polarisation, and portable X-ray fluorescence spectroscopy within the CleanExplore project demonstrates the practical effectiveness of this combined non-invasive approach for preliminary critical raw material exploration across contrasting geological settings.

At Radulovtsi, the ERT and IP sections successfully delineated the alteration zone and sulphide mineralisation, respectively, while field pXRF measurements defined a well-developed copper geochemical halo and established statistically significant correlations between electrical parameters and copper content. At Svidnya, ERT imaging resolved the alteration pattern within the K-alkaline pluton, and pXRF measurements confirmed preferential enrichment of CRM-relevant elements in less altered rock domains, illustrating the direct complementarity of the two method groups.

The synchronous acquisition workflow proved operationally efficient and fully compliant with the "do no significant harm" principle, supporting its application within the environmentally responsible exploration programmes required under the EU Critical Raw Materials Act. Complete datasets from all thirteen CleanExplore project sites will be presented in subsequent publications.

Acknowledgements. This research was financially supported by the European Union–NextGenerationEU, CleanExplore project № BG-RRP-2.017-0035. All responsibility for the content of this paper is borne

by the authors, and the views expressed herein shall in no way be taken to reflect the official opinion of the European Union and the Bulgarian Academy of Sciences.

References

Angelov, V., Antonov, M., Gerdjikov, S., Sirakov, D., Tanatsiev, S., Sachanski, V. & Valev, V. (2010). Geological map of Bulgaria on scale 1:50000. Svoge map sheet. Geocomlex, Sofia.

Binley, A. & Slater, L. (2020). *Resistivity and Induced Polarization: Theory and Applications to the Near-Surface Earth*. Cambridge University Press.

Lemière, B. & Uvarova, Y. (2019). New developments in field portable geochemical techniques and on-site technologies and their place in mineral exploration. *Geochemistry Exploration Environment Analysis, 20*, 2.

Marinova, K., Yaneva, M., Pristavova, S., Ruskov, K., Donkova, Y., Radulov, A. & Nikolov, N. (2026). Environmentally responsible geological investigation using a multidisciplinary geophysical and geochemical approach. *Engineering Geology and Hydrogeology, 40*, 99–107, https://doi. org/10.52321/igh.40.1.99.

Marinova, P., Grozdev, V., Ivanova, D., Sinnyovsky, D., Petrov, I., Milovanov, P. & Popov, A. (2010). Geological Map of the Republic of Bulgaria. Scale 1:50000. Map Sheet K-34-46-G (Breznik). Ministry of Environment and Water, Bulgarian Geological Survey, Sofia, Uniscorp Ltd.

Popov, K. & Popov, P. (2022). *Metallogeny of Bulgaria*. Sofia, BMG Komers EOOD Publishing House, First Edition, 426 pp.

Robbat, Jr. S., Smarason, Y. & Gankin, Y. (1998). Dynamic work plans and field analytics: the keys to cost-effective hazardous waste site investigations. Field Anal. *Chem. Technol., 2*, 253–265.

Sachanski, V. & Zareva, E. (2024). The Silurian and the Devonian in the Svoge Unit, Western Bulgaria – a brief overview. *Geologica Balcanica, 53*(3), 23–35, https://doi.org/10.52321/GeolBalc.53.3.23.

Vladykin, N. V., Grozdanov, L. A. & Bonev, I. K. (2001). Chemical composition and geochemical characteristics of the Svidnya magmatic potassic-alkaline association, Western Stara Planina Mountain. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology, 38*, 3–22.

BARITE MINERALISATION IN THE AREA OF THE *OBICHNIK* ORE DEPOSIT, THE EASTERN RHODOPES, BULGARIA (PRELIMINARY DATA)

Stanislav Stoykov, Lyubomir Mihaylov, Rositsa Apostolova, Stoyan Klimentov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: sstoykov@mgu.bg; l.mihailov@mgu.bg

ABSTRACT. The study presents the results of a mineralogical and geochemical analysis of barite containing samples from the area of the *Obichnik* Au-Ag deposit (Kardzhali region). The *Obichnik* epithermal deposit is in the Southeastern Rhodopes. It is part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field, which includes hydrothermal Pb-Zn, Au-Ag, and Au-Pb-Zn deposits and mineral occurrences associated with the Oligocene Zvezdel volcano. The ore mineralisation is hosted by felsic, intermediate to mafic volcanics, volcano-sedimentary, and intrusive rocks. The aim of the present study is to determine the mineral composition in samples containing barite from the deposit associated with ore mineralisation, and barite raw material vein type mineralisation in the periphery parts of the deposit. Optical microscopy and XRD methods were used.

Key words: barite, ore deposits, critical raw materials, the Rhodope massive.

БАРИТНА МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В РАЙОНА НА РУДНОТО НАХОДИЩЕ „ОБИЧНИК“, ИЗТОЧНИ РОДОПИ, БЪЛГАРИЯ (ПРЕДВАРИТЕЛНИ ДАННИ)

Станислав Стойков, Любомир Михайлов, Росица Апостолова, Стоян Климентов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Изследването представя резултати от минераложки и геохимични анализи на образци от барит-съдържаща минерализация в района на златно-сребърното находище „Обичник“ (Кърджалийско). Епитермалното находище, попада в югоизточните Родопи и е част от Звездел-Пчелоядското рудно поле, включващо Pb-Zn, Au-Ag и Au-Pb-Zn находища и рудопроявления. Те са свързани с магмената дейност на Олигоценския Звезделски вулкан. Рудните минерализации в района са поместени в кисели, средни до базични по състав вулкански, вулкано-седиментни и интрузивни скали. Целта на настоящото изследване е да се определи минералния състав на баритната минерализация, както в пределите на епитермалното находище Обичник – асоцииращa с орудяването, така и баритната жилната минерализация в периферните му части. За целта са проведени микроскопски изследвания, при ползване на отразена и проходяща светлина, както и XRD.

Ключови думи: барит, рудни находища, суровини от критично значение, Родопски масив.

Introduction

The *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit is located about 220 km southeastern of Sofia and about 25 km of the regional town of Kardzhali. It is situated in the East Rhodope unit of the Morava-Rhodope zone. The unit is built up by high-grade metamorphic basement, Late Cretaceous intrusive bodies, Paleogene shallow marine sediments, associated with dominantly acid, and intermediate volcanic and volcano-sedimentary rocks (Fig. 1B) (Dabovski et al., 2002).

The *Obichnik* ore deposit is situated in the northern part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field, which includes hydrothermal lead-zinc, gold-lead zinc, and gold-silver deposits and mineral occurrences associated with the Oligocene Zvezdel volcano-plutonic complex (Georgiev, 2012; Popov and Popov, 2022). The deposit is situated to the north of the village of Obichnik and to the east of the village of Drumche. The Obichnik gold-silver mineralisation is associated mainly with pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, tennantite-tetrahedrite, and enargite, with gold variably distributed within these sulphides and quartz, sericite, kaolinite, illite/smectite, and adularia (Petrova and Stanchev, 1994).

The ore bodies come in two types - isometric (unclearly tubular) and sub-horizontal stratiform according to their deposition format and conditions. The ore-forming process in the Obichnik area is in two-stages: gold-bearing quartz-sulphide and carbonate (Dragiev and Dragieva, 2010).

Barite (barite) is naturally occurring $BaSO_4$. Its solid solution series with celestine (celestite) $SrSO_4$ – $(Ba,Sr)SO_4$ occur in diverse geological environment and over a long period of geological time from the Archaen to present. Barium can be substituted isomorphously by strontium and calcium. Barite is inert and non-toxic. It has high density (4.5), low hardness 2.5-3.5 (on the Mohs scale), and low oil absorption. Barium occurs in the Earth’s crust mainly as divalent cation Ba^{2+}. Because of its large size, barium is not easily accommodated in common rock-forming minerals except in minor content in feldspars and micas in some cases, where it substitutes K^+.

The main part of barite deposits in Bulgaria are located in the Srednogorie zone - related mainly to Late Cretaceous magmatism and Moravo-Rhodipe zone – related mainly to Oligocene magmatism (tectonic zones are after Dabovski et al., 2002, Figure 1B). The biggest part of extracted barite in Bulgaria in the second half of the 20th century came from the Stara Zagora (open pit) and the Kashana (underground) deposits and later from the Kremikovtsi (open pit) mines. The largest part of mined barite in Bulgaria was exported. More than 75 barite deposits were in operation in Bulgaria during the previous century (Andreevich et al., 1989).

The aim of this investigation is to determine the mineral composition of the barite raw material from the area of the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit and to present our ideas about its genesis.

The present study reports new geological and mineralogical data on the mineral composition of barite raw material.

Barite production and application

Barite has been part of the list of critical raw materials according to the European Commission (European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials, 2020) since 2016. About 60% of barite consumption is for weighting agent in oil and gas drilling fluids (drilling-grade barite), about 30% is for fillers in rubber, plastic, paint, and paper production, and about 10% goes to the chemical industry. The leading world suppliers of barite are China (about 40% of the world production), followed by India, Morocco, United States, Iran, and Kazakhstan. In the EU, the only mining activities are in Germany (primary) and Bulgaria (reworking tailings) (European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials, 2020). The drilling grade barite is produced from commercial barium sulphate raw material. It can contain various minerals in addition to barite, and commercial products can vary in colour from white to red or brown. Barite application in oil and gas drilling fluids is to increase the density of these solutions in order to control wellbore pressure, stabilising the borehole, and preventing blowouts. Some of the properties of commercial drilling grade barite are: specific gravity of 4.2 or higher and, content of $BaSO_4$ of 90 % or higher.

Geological setting and mineralisation

The *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit is situated in the Morava-Rhodope zone of the Balkan orogenic system and its East Rhodope tectonic unit according to the tectonic scheme of Dabovski et al. (2002, Figure 1B). The unit is built up by high-grade metamorphic basement, Late Cretaceous intrusive bodies, Paleogene shallow marine sediments, associated with dominantly acid and intermediate volcanic and volcano-sedimentary rocks (Dabovski et al., 2002). During the Late Cretaceous–Eocene, the region experienced subduction-collision events. The late Eocene-Oligocene magmatism is represented by volcano-plutonic rocks. Late Cretaceous–Palaeocene magmatism is represented exclusively by intrusions composed of amphibole-biotite, biotite- and two-mica granites, and granodiorite. In contrast, Late Eocene–Oligocene magmatism is represented by volcano-plutonic suites and intrusions with largely variable K and Si content (Marchev 2007). Epithermal deposits in the area are associated with magmatic rocks (Georgiev, 2012; Popov and Popov, 2022).

The *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit is situated in the northern part of the Zvezdel-Pcheloyad ore field, which includes hydrothermal lead-zinc and gold-lead-zinc mineral deposits and occurrences associated with the Oligocene Zvezdel volcano-plutonic complex (Georgiev, 2012; Popov and Popov, 2022). The Zvezdel volcano is considered a stratovolcano (Nedialkov and Pe-Piper 1998, Yanev at al., 1998) with parasitic and satellite volcanic vents and domes. The volcano structure is composed of lava flows intercalated with epiclastic and rare pyroclastic rocks and cut by domes and dykes (Figure 1A). The Zvezdel volcanic rocks are predominately high-K calc-alkaline, ranging in composition from basalts to andesites and dacites (Raicheva and Marchev, 2014). The host rocks in the Obichnik area are presented by a suite over 300 m thick consisting of epiclastics (mud flow products) in alternation with autobrecciated to massive andesites, pillow-bearing flows-foot breccias, and probably some pumice (Kunov et al., 1994). The epiclastic rock contains mainly various crystalloclasts and lithoclasts of hydrothermal altered and nonaltered andesites and are of up to 10 cm in size. They are cut by several volcanic bodies and dykes of pyroxene andesites to basaltic andesites. The autobreccias consist of andesitic fragments of up to 15 cm, and some cement (Fig. 2A). The *Obichnik* deposit is in the outward part of an eroded Paleo-Zvezdel volcano of probably Priabonian age (Kunov et al., 1994). The rock fractures are filled by quartz and adularia (±clay minerals, carbonates, sericite, or barite). The quartz is represented by 2 generations: 1. coarse-grained crystallised at about 260-300 ºC, and fine-grained – 230-250 ºC - according to the homogenisation of the gas-fluid inclusions (Kunov et al., 1994).

According to the hydrothermal alteration products the Obichnik epithermal deposit is referred to adularia-sericite or low-sulphatisation Au-Ag type by Kunov et al. (1994).

Over 60 rock-forming, ore, and secondary minerals occur in the deposit (Kunov and Mandova, 1997). The gold mineralisation is associated mainly with pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, tetrahedrite-tennantite, and enargite, with gold being unevenly distributed within these sulphides, quartz, sericite, kaolinite, illite/smectite, and adularia (Petrova, Stanchev, 1994).

The *Obichnik* deposit can be considered as epithermal adularia-sericite type Au-Ag mineralisation with quartz-sulphide gold-bearing and carbonate phases in the hypogene stage (Kunov and Mandova, 1997).

Materials and analytical techniques

The ore samples were collected from exploration drill holes in the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit. More than 30 polished sections have been prepared for examination in reflected light. They were investigated under reflected light with a *Leica DM2500P* microscope. The microphotographs illustrating mineral composition, relationships, and textures were taken with a *Leica DFC295* integrated digital camera, CMOS type sensor, and lens magnification from ×4 to ×50. The same also served to more precisely identify interesting mineral grains subject to microprobe analysis. The electron microprobe analyses were done with a JEOL JSM-6010 PLUS LA X-ray spectral micro analyser, with an EDS spectrometer at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, Bulgaria. The mode of operation is determined by the following analytical conditions: 20 kV accelerating voltage, 30 Pa pressure, and high vacuum. No standards were used.

The samples from hydrothermal barite vein type mineralisation were collected from exploration trenches located in the periphery of the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit. The prepared thin sections were analysed using a *Meiji* polarising microscope and an *Olympus 5060* digital camera in the Optical Laboratory for Minerals and Rocks at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”.

The measurements of one powdered sample of barite were performed on a *Bruker D2-Phaser X-Ray* powder diffractometer. The conditions which were applied during the measurements were the following: Cu radiation with wavelength λ = 1,54184, current - 10 mA, voltage - 30 kV, increment 0.02° in the interval of 2Θ 5-90° for 30 min of gathering diffraction data. The measurements were performed at the Laboratory of Powder Diffraction at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”.

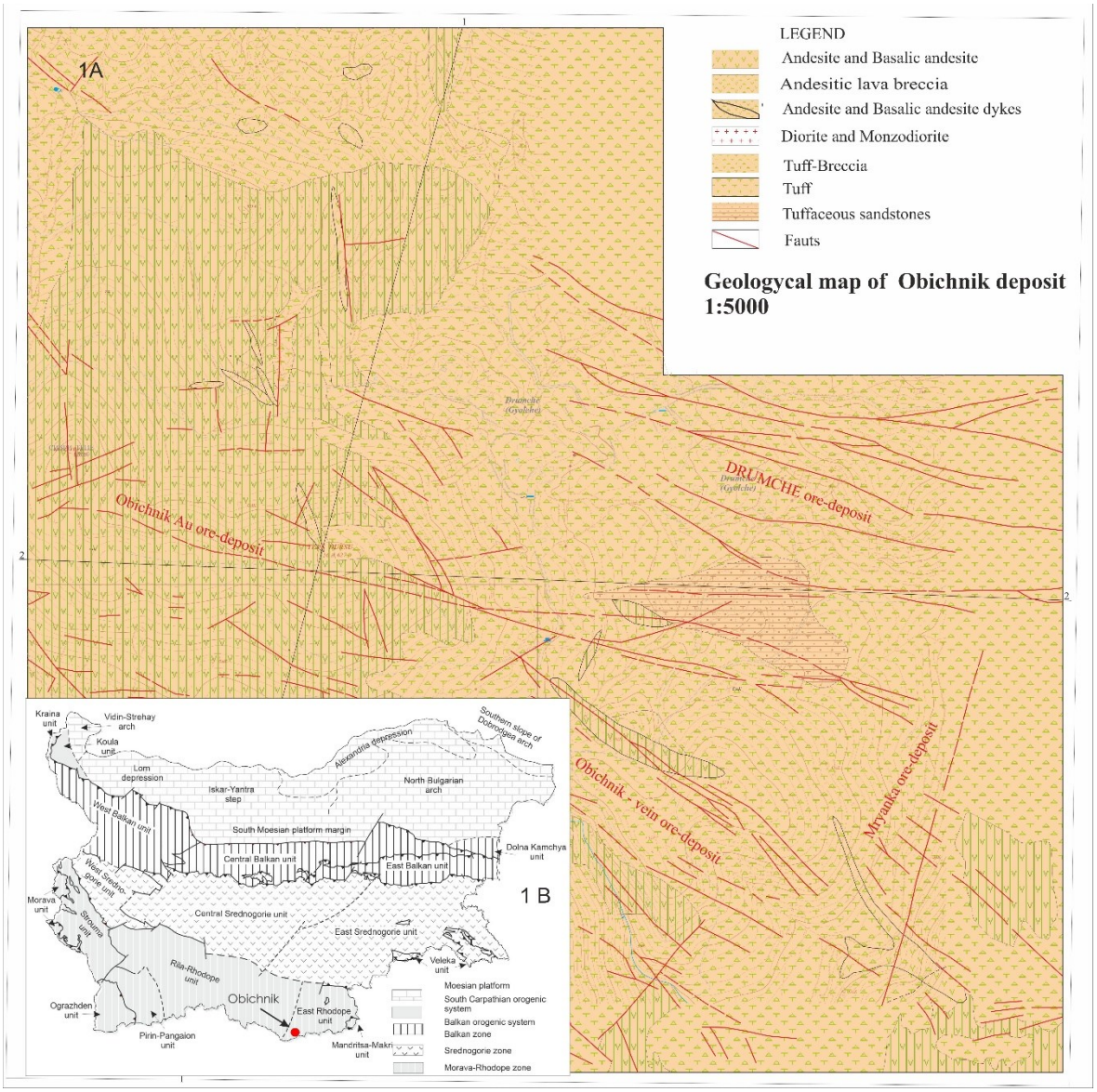


Fig. 1. A. Geological map of the area of the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit, 5 000 scale, after Dragiev and Dragieva (2010). B. Tectonic scheme of Bulgaria, after Dabovski et al., 2002.

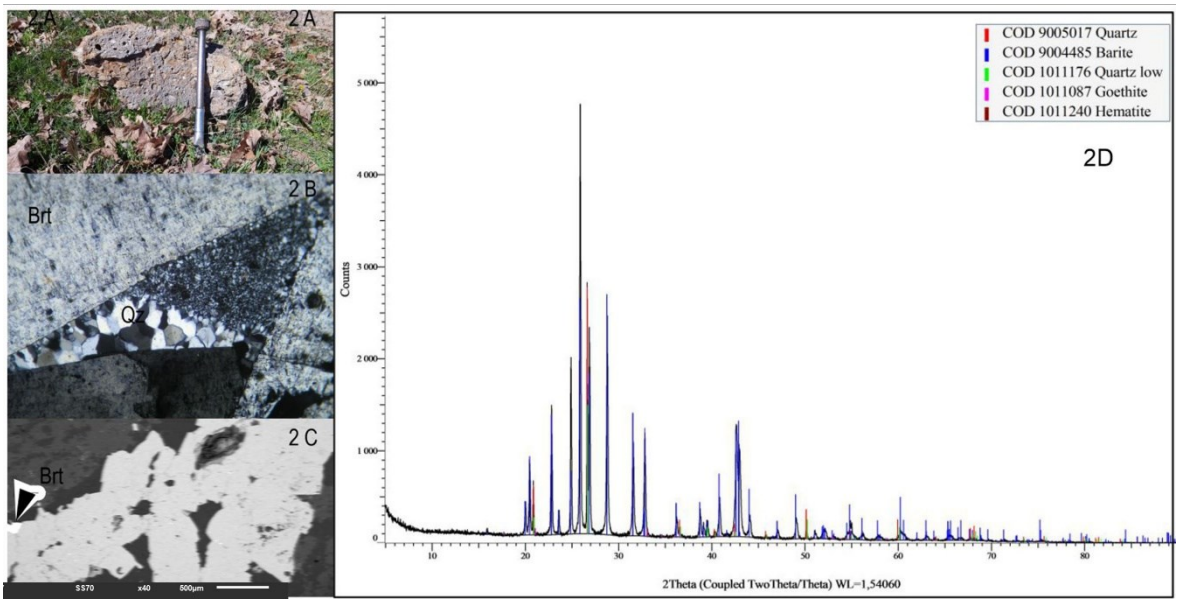


Fig. 2. A. Hydrothermal altered volcanic products from the area of the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit. B. Microphotograph of barite (Brt) and quartz (Qz) in thin section from hydrothermal barite veins (horizontal photo size 3980 μm). C. BSE image of Barite (Brt) in sulphide mineralisation. D. XRD diffractogram of quartz-baryte hydrothermal vein.

Results and discussion

The main ore minerals in the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit are: pyrite, marcasite, galena, sphalerite, and chalcopyrite. The gold mineralisation is represented by grains from several µm to about 100 µm (Apostolova et al., 2024), associated with minerals of quartz-sulphide stage, and included or in fractures in coarse-grained pyrite. It is classified as high-grade native gold (between 870 and 915 ‰). Barite is presented as fine grain crystals (about 100 µm – Fig. 2C) in sulphide ore mineralisation associated with pyrite, marcasite, galena, sphalerite, and chalcopyrite, and as coarse crystals (2 to 5 cm in size) associated with quartz, carbonates, and Fe-oxide minerals in the hydrothermal veins located in the periphery of the deposit.

Barite from the vein-type mineralisation from the periphery of the deposit commonly occurs as well-formed crystals and aggregates showing polysynthetic twinning. In thin sections, barite is colourless and non-pleochroic under plane-polarised light (PPL). It exhibits moderate relief and low to moderate first-order interference colours under crossed polars (XPL). The mineral shows perfect cleavage and exhibits straight extinction that is often parallel to the cleavage traces. Under the microscope, barite occurs in association with quartz and chalcedony (?), together with impregnations of iron hydroxides (Figure 2B).

The XRD-analysis from the vein-type mineralisation from the periphery of the deposit shows that the main detected minerals are quartz (two generations high- and low-temperature ones) and barite; ore minerals are also presented by goethite and Fe-oxides (Figure 2D).

Concluding remarks

Barite as small xenomorph crystals (about 100 µm) is present in the ore mineralisation in the *Obichnik* Au-Ag epithermal deposit. It associates with: pyrite, marcasite, galena, sphalerite, chalcopyrite, quartz, and Fe oxides.

Barite is also presented as well-formed crystals (up to several cm in size) and aggregates showing polysynthetic twinning in association with quartz and chalcedony (?), together with impregnations of iron hydroxides in massive hydrothermal veins in the periphery of the deposit. It could be considered as a potential source of barite raw material after additional exploration activities. To characterise the geological position of barite mineralisation in the area, we plan additional field work and sampling, along with laboratory performing of geochemical and mineralogical investigations.

Acknowledgements. The authors would like to thank Dr. Kamelia Marinova for her assistance with the optic investigation on thin sections from the area of the *Obichnik* deposit.

The present study is partly supported by: National Science Program "Critical and strategic raw materials for a green transition and sustainable development", approved by Resolution of the Council of Ministers № 508/18.07.2024 and funded by the Ministry of Education and Science (MES) of Bulgaria, Task: I.1.5. Clarification of geological regions with high potential for new discoveries of critical and strategic raw materials.

References

Andreevich M., Bozhinov, K., Velinov, I., Grigorov, A., Zhelyazkova-Panayotova, M., Ivanov, I., Kanazirski, M., Katskov, N., Popov, S., Angelov, T., & Trashliev, S. (1989). *Non-metalic mineral deposits in Bulgaria. Vol. 2. Endogenic industrial minerals and rocks*. Technika, Sofia. 260 p. (in Bulgarian with English abstract).

Apostolova, R., Mladenova, V. & Stoykov, S. (2024). Gold occurrence at the Obichnik ore deposit, Eastern Rhodopes, Bulgaria. *Rev. Bulg. Geol. Soc., 85*(3). 101-104. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2024.85.3.101

Dabovski, C., Boyanov, I., Khrischev, K., Nikolov, T., Sapounov, I., Yanev, Y. & Zagorchev, I. (2002). Structure and Alpine evolution of Bulgaria. *Geologica Balcanica*, *32*, 9-15.

Dragiev, H. & Dragieva, B. (2010). “The Zvezdel-Pcheloyad ore region”. The Momchilgrad and Asara prospect area – Geological report of gold-silver ore with calculation reserves and resources as of 01.12.2010 on the Obichnik, Rudarka and Plovka area. Gorubso Kardjali.

European Commission, Study on the EU’s list of Critical Raw Materials. (2020). Factsheets on Critical Raw Materials. (http://www.europa.eu).

Georgiev, V. (2012). *Metallogeny of the Eastern Rhodope*. “Prof. Marin Drinov” Academic Publishing House (in Bulgarian with extended English summary).

Kunov, A., Velinov, I., Yanev, Y., Nakov, R. & Stephanov, N. (1994). Adularia-sericite type of wall-rock alternation of the Epithermal Au-Ag mineral occurrence of Obichnik (Eastern Rhodopes, Bulgaria). *Comptes rendus de l’Academie bulgare des Sciences, 47*(8). 61-64.

Kunov, A. & Mandova, E. (1997). Supergene minerals from Au Ag deposit Obichnik (Eastern Rhodopes). – *Rev. Bulg. Geol. Soc., 58*(1), 19–24.

Marchev, P. (2007). Magmatic influence on the zonation of the Paleogene epithermal mineralization in the Central-Eastern Rhodopes, Bulgaria and Greece. – In: *Proceedings 9th Biennial SGA Meeting*, 857–860.

Nedialkov, R., & Pe-Piper. (1998). Petrology of the volcanism in the southeastern part of Momchilgrad-Arda volcanic region, Southeastren Bulgaria. *Acta Vulcanologica, 10*, 243-253.

Popov, P. & K. Popov. (2022). *Metallogeny of Bulgaria.* Publ. BMGK Commerce EOOD, Sofia, (in Bulgarian with extended English summary). 426 p.

Petrova, K. & Stanchev, C., (1994). Mineralogy of the adularia-sericite type epithermal mineral occurrence Obichnik (East Rhodopes, Bulgaria) – *C.R. Acad. Bulg. Sci., 47*, 61-64.

Raicheva, R. & Marchev, P. (2014). Mineral diversity, melt inclusions, and gabbroitic xenolites of the Upper series of the Zvezdel volcano (Eastern Rhodopes): Evidence for mush chamber recharge and magma differentiation. *Bul. Shk. Gjeol. Proceedings pf XX CBGA Congress*,*1*, 441-444.

USGS, Department of the Interior. (2022). Final list of critical minerals. Fed. Reg.-list.

Yanev, Y., Innocenti, F., Maretti, P., & Serri, G. (1998). Upper Eocene-Oligocene Collision-related Volcanism in the Eastern Rhodopes (Bulgaria) – Western Thrace (Greece): Petrologic Affinity and Geodynamic significance. *Acta Vulcanologica*, *10* (2), 279-291.

COMPARATIVE ANALYSIS AND VARIATION OF THE GSI INDEX FROM SITE INVESTIGATION TO CONSTRUCTION: EXPERIENCE FROM THE *ZHELEZNITSA* TUNNEL

Aleksandar Hristov, Antonio Lakov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: aleksandarigp@gmail.com; tony_lakov@abv.bg

ABSTRACT. The Geological Strength Index (GSI) is a fundamental parameter in modern tunnel geotechnics, serving as a direct link between the visual geological characteristics of a rock mass and its mechanic properties through the Hoek-Brown failure criterion. In engineering practice, however, a major methodological challenge is that during the site investigation phase, the index is evaluated indirectly from one-dimensional borehole cores and from surface geological mapping, whereas during construction, it is determined from actual mapping of the tunnel face surface.

This paper analyses the variation of the GSI parameter during the construction of the *Zheleznitsa* Tunnel – the longest road tunnel in Bulgaria. Based on data processed during construction works in both the Left and Right tunnel tubes, the actual face-mapped GSI was compared with the values obtained during the geological investigation. A detailed analysis of the percentage distribution of rock mass types was conducted, based on factual data regarding the lengths of individual geotechnical blocks. Geometric, physical, and technological factors contributing to the observed discrepancies are discussed, highlighting the crucial importance of the amount of exploratory drilling for the reliable prediction of rock mass behaviour.

Key words: *Zheleznitsa* Tunnel, Geological Strength Index (GSI), determination of design parameters, comparison with face-mapped values.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ И ИЗМЕНЕНИЕ НА ИНДЕКСА GSI ОТ ЕТАПА НА ПРОУЧВАНЕТО ДО СТРОИТЕЛСТВОТО: ОПИТЪТ ОТ ТУНЕЛ „ЖЕЛЕЗНИЦА“

Александър Христов, Антонио Лаков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Геоложкият индекс на якост (GSI) е фундаментален параметър в съвременната тунелна геотехника, служещ като директна връзка между визуалните геоложки характеристики на масива и неговите числени якостно-деформационни свойства по критерия на Hoek-Brown. В инженерната практика обаче съществува сериозен методологически проблем: по време на проучването индексът се оценява индиректно по едноизмерна сондажна ядка и от геоложка картировка на повърхността, докато по време на строителството той се определя чрез реално площно картиране на стената на забоя.

Настоящата статия анализира изменението на показателя GSI при изграждането на тунел „Железница“ – най-дългия пътен тунел в България. Въз основа на обработката на данните по време на СМР в Лявата и Дясната тунелни тръби е извършено сравнение за разпределението на реалния GSI сравнен с този от геоложкото проучване. Направен е детайлен анализ на процентното съотношение на типовете скален масив, базиран на фактическите данни за дължините на отделните геотехнически блокове. Разгледани са геометричните, физическите и технологичните причини за установените несъответствия, като се отчита на решаващото значение на количеството проучвателни сондажи за достоверното прогнозиране на поведението на масива.

Ключови думи: тунел. „Железница“, показател GSI, определяне на проектни стойности, сравнение с картирани стойности.

Въведение

Въведеният от E. Hoek през 1994 г. Geological Strength Index (GSI) е основен метод оценка на структурната нарушеност на масив, основаващ се на визуална оценка на степента на напуканост и състоянието на пукнатините. Той е основен показател в якостния критерий на Хук-Браун (Hoek, 1994) за определяне на якостно-деформационните свойства на скалния масив, разглеждан като „квазиеднородна“ среда при геотехническото проектиране на крепежните тунелни конструкции. Като такъв, той се явява и основен показател по време на строителството за непрекъснато количествено класифициране на скалния масив с цел оценка на съответствието между проектните параметри за поведението на масива и на крепежите, както и адаптивно управление на геотехническия риск.

Основният методологически дефицит при прилагането на GSI се състои в подходите и възможностите за неговото определяне в отделните етапи на проучване и строителство:

- във фазата на предварителните и детайлните проучвания геологът е принуден да оценява индекса **индиректно**, интерпретирайки резултатите от полевите сондажни работи и структурно-геоложка картировка;
- във фазата на строителството оценката се извършва **директно** in-situ върху разкритата стена на забоя на тунелната изработка.

Често пъти при наличие на сложни и променливи геоложки условия, както и при недостатъчни по съдържание и обем инженерногеоложки проучвания проектните оценки се различават съществено и най-често в неблагоприятна посока от реалните условия в масива и водят до мащабни т.н. „геоложки изненади“, свързани с необходимостта от оперативно препроектиране на крепежите по време на строителството и общо оскъпяване на проекта.

Методология за оценка на показателя GSI при етапа на проучване на тунел „Железница“

Тунел „Железница“ е с дължина 2 280 км, включващи тунел с две тръби с дължина 2 км. Инженерногеоложките условия на скалния масив, установени при проучването (Лаков и Стойнев, 2016) се характеризират с преобладаващо средноздрава до здрава скала от гнайси и амфиболити, преобладаващо умерена тектонска нарушеност с редуване на катаклазни и тектонизирани зони. В етапа на проучване оценката на показателя GSI е извършена чрез интерпретация на данните от сондажната ядка и от сеизмичния каротаж в сондажите.

По време на двете проучвателни кампании (2014 – 2015 г. и 2018 – 2019 г.) са прокарани общо 16 сондажа с общ метраж 949 л. м.

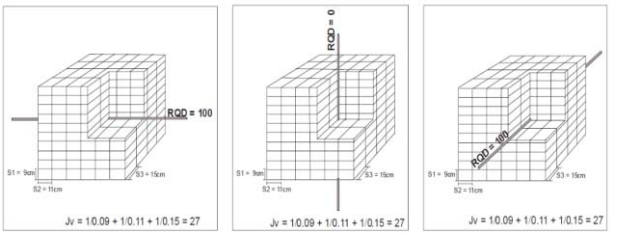
Показателят GSI е определян по модифицирана скала за GSI (Sönmez и Ulusay, 2002), където визуалното и експертно определяне на степента на блоковост на масива се определя чрез показателя SR (Structural Rating):

$$SR = -17{,}5 \ln(J_V) + 79{,}8$$

Определянето на показателя J_V (брой пукнатини в 1 м^3 от скалния масив) изисква познаване на системите пукнатини в масива и тяхната средна гъстота. Тъй като диференцирането на групите пукнатини по извадената ядка не е възможно, е използвана следната формула за връзка с показателя RQD (Palmstrom, 2009):

$$RQD = 110 - 2{,}5\, J_V$$

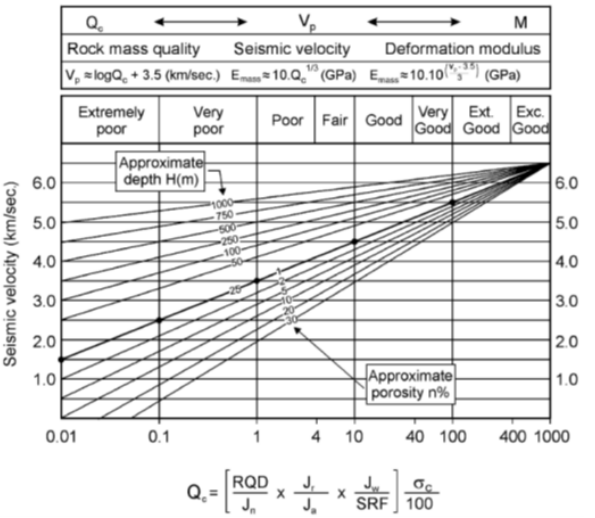
Тук основен проблем е представителността на показателя RQD за пространствената напуканост на масива, като при една и съща структурна нарушеност в зависимост от ориентацията на оста на сондажа спрямо пукнатинните групи в масива (фиг.1) могат да се получат значителни разлики в неговата стойност. Очевидно, ако сондажът е с направление, близко до наклона на затъване на пукнатинната група или тектонска зона, това може да „маскира“ структурната нарушеност и стойността на показателя RQD да нарастне до недостоверно високи стойности.



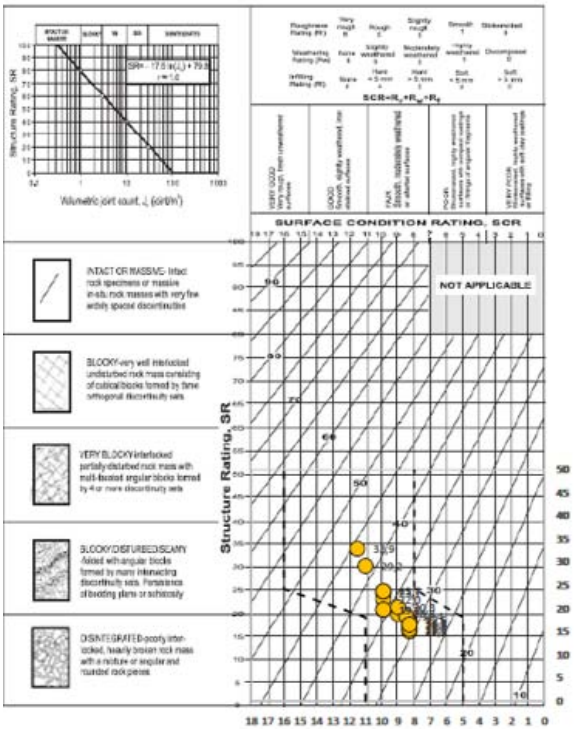
Фиг.1. Влияние на посоката на сондиране при определяне на показателя RQD в условията на идентична напуканост (Palmstrom, 2005)

На базата на данните от сеизмичния каротаж в сондажите се определя зависимостта между показателя Q и скоростта на надлъжните сеизмични вълни Barton (2002), и отчитаща порестостта на скалата (n) и едноосовата якост на натиск на скалната матрица (σ_c) (фиг. 2). За определяне на показателя GSI са използвани основната корелационна зависимост между показателите Q и RMR_{89} (Bieniawski,1976) RMR = 9lnQ + 44 и горната формула GSI = RMR - 5.

Този подход има предимството, че обхваща по-голям обем от масива около сондажа. Макар че получената по този метод средна стойност за масива за зоната на тунела е близка до определената по Sönmez и Ulusay (2002), диапазонът на изменение стойностите на показателя GSI е в обхвата от 12 до 64, чиито граници са значително по-широки от установените (от 25,6 до 44,6) и показват значително по-голямо разнообразие в структурната нарушеност на масива, т.е. практически е еднаква с определената в Идейния проект средна стойност 37,8. Вариациите са значителни и неравномерно разпределени, както по оста на тунела, така и в дълбочина по отделните сондажи.



Фиг. 2. Зависимост между показателя Q и скоростта на надлъжните сеизмични вълни по Barton (2002)



Фиг. 3. Модифицирана скала по Sonmez и Ulusay (2002) с определени стойности на GSI по сондажи

Типове скален масив

На базата на установените стойности на показателите на скалата и структурната нарушеност на масива, за условията на тунела са приети следните 4 типа скален масив:

Тип А. Скален масив с ниска якост и висока степен на структурна нарушеност. Този тип се приема, че характеризира слабите и силно напукани тектонизирани зони при покритие до 50 м, както и участъци от тунела попадащи на малки дълбочини до 20-30 м от терена.

Тип В. Средно здрав и средно структурно нарушен скален масив. Този тип се приема, че характеризира преобладаващо средно здравите и умерено напукани

катаклазни зони в масива при покритие до 85 м, както и участъци от тунела попадащи на дълбочини около 40-60 м от терена, попадащи извън тектонските и катаклазни зони.

Тип С. Относително здрав и по-слабо структурно нарушен скален масив. Той характеризира частите от масива с относително по-висока якост и по-слаба степен на напуканост, които не са съществено засегнати от тектонски процеси, както и участъците от тунела попадащи на значителни дълбочини (над 80-100 м) от терена.

Тип А (t). Материали от тектонските зони, изградени от милонитизирани до практически глинизирани скали при покритие до 50 м. При покритие над 50 м отчитането на конкретните геотехнически показатели и определянето на вида на крепежната конструкция да се изпълнява по време на строителството от авторския надзор съвместно от геолог и проектант.

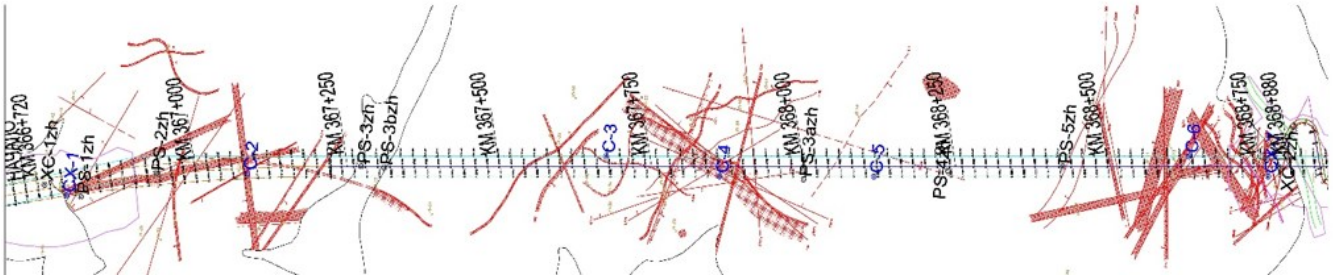
Диференциацията е извършена основно на базата на изменението на якостта на натиск σ_c и показателите GSI и RQD като останалите са преизчислени по установените по-горе зависимости или корелирани в съответствие с общите закономерности на изменението им в масива. Техните основни геотехнически показатели са представени в следващата Таблица 1.

Анализ на разпределението на GSI с типовете скален масив по време на проучването и строителство

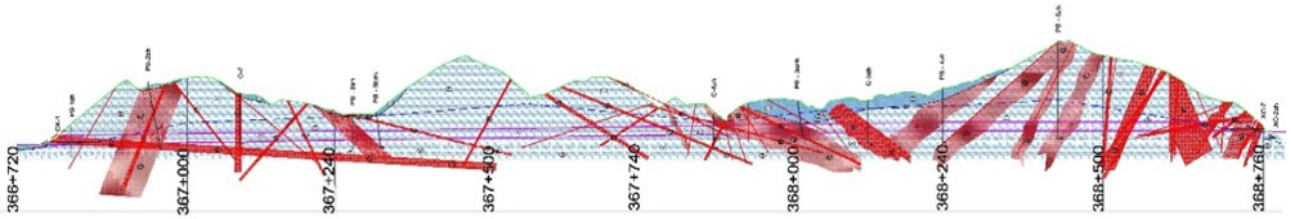
На базата на събраните данни от екзекутивното документиране на забоите от двете тунелни тръби са съставени разпределения за реално проявения индекс GSI по време на строителството, съвместно с данните от геоложките проучвания, както и разпределението на типовете скален масив по осите на двете тунелни тръби, представени на фигурите 6 и 7.

Таблица 1. *Основни геотехнически показатели на типовете скален масив*

Свойства на масива	Тип А	Тип В	Тип С	Тип А (t)
σ_c, MPa (обхват)	1,0-5,0	5,0-25,0	25,0-50,0	<1,0
GSI (обхват)	10-30	30-45	45-60	10-20
GSI (средна стойност)	25	37	55	15
RQD (средна стойност), %	10	25	35	0



Фиг. 4. Ситуация на тунел „Железница



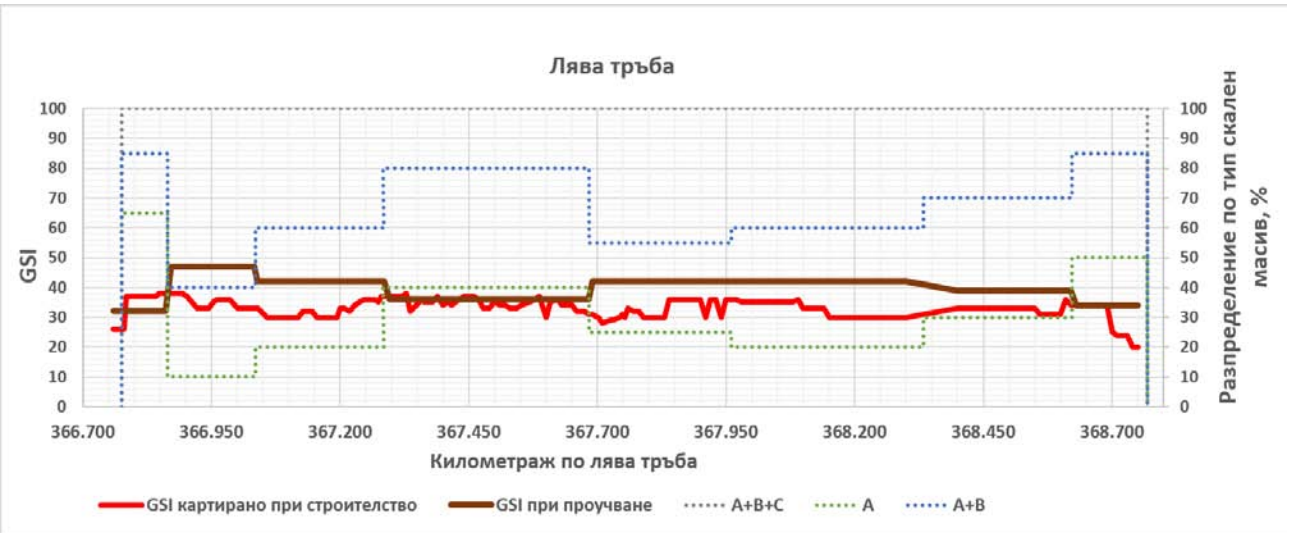
Фиг. 5. Надлъжен инженерногеоложки разрез по оста на тунел „Железница“

Анализът на данните по **дясна тунелна тръба** (фиг.6), която демонстрира изразена динамика с екстремни отклонения в централната част на тунела, показва:

Участък от км 366+759 до км 366+950. Участъкът е проучен с два сондажа на 366+810 км 366+930. Проектът предвижда високо равномерно наличие на масиви Тип А (50%) и Тип С (45%), поради което интегралната стойност на GSI е сравнително висока стойност (GSI = 41). Непосредствено след порталния участък документираните при строителството стойности (червената линия) регистрират значителен спад като варират в ниския диапазон от 28–37, показвайки, че масивът е далеч по-напукан и по-слаб от предвиденото.

Участък км 366+950 до км 367+050. В участъка няма прокарани сондажи като разпределението на типовете скален масив е извършено на база данните то картировката. Проектният модел предполага рязко подобрение на свойствата, като участието на слабия Тип А пада до 10% и 60% наличие на масив Тип С, а интегралната стойност нараства до GSI = 47. Установените на забоя стойности , обаче, устойчиво се редуцират под границата на средно здравия масив и се задържат около GSI = 28-30.

Фиг. 6. Разпределение за картираните стойности на показателя GSI по време на строителството съвместно с проектното разпределение на типовете скален масив в % по дясна тръба.



Фиг. 7. Разпределение за картираните стойности на показателя GSI по време на строителството съвместно с проектното разпределение на типовете скален масив в % по лява тръба

Участък от км 367+300 до км 367+600. В този централен участък има два проучвателни сондажа Проектът предвижда наличие на масиви Тип А и Тип В от 40% всеки, при интегрална стойност на GSI = 36. Документираните стойности при строителството следват устойчиво този тренд, варирайки в тесния обхват на GSI = 34-37. Тук имаме почти пълно припокриване на прогнозния модел с установеното при строителството.

Участък от км 367+700 до км 368+000. В този участък има два проучвателни сондажа, но това е геотехнически най-проблемният участък от дясната тръба. Докато проектът предвижда стабилна среда с преобладаващо участие на Тип В (35%) и С (45%) с проектна стойност на GSI = 42, в три от зоните отчетените при строителството стойности на GSI падат рязко до критичните стойности между 0 и 10. Те съответстват на пресичането на издържани тектонски зони, представени от тектонска глина и милонити (Тип А(t)), които не са „уцелени“ със сондажните изработки и са останали напълно „невидими“ при проучването. Трябва да се отбележи, че по данни от картировката на терена, такава зона е установена за съседния участък след км 386+000, но в дълбочина тя е с изместена ориентация и/или интензивност.

Около км 368+180 се регистрира единствената по рода си „позитивна“ геоложка изненада по цялото трасе. В зона, където проектът предвижда средни свойства с GSI = 42, в забоя се разкрива изключително масивен, слабо напукан гнайсов блок, при който стойността на показателя GSI достига абсолютен максимум от 68 (масив Тип С). Тази аномалия обаче е локална и бързо затихва.

Участък от км 368+450 до км 368+880. В този участък има направени четири проучвателни сондажа. Проектът предвижда нарастване наличието на масив Тип А до 50% и спад на интегралната стойност на GSI до 34. Установените при строителството стойности се движат близо до тази прогноза - GSI = 30 - 36, но показват повишена напуканост при южния портален участък.

При лявата тунелна тръба (с обхват от км 366+759 до км 368+720.0) разпределението показва сходен геометричен характер (фиг. 7). Регистрираните при строителството стойности на GSI се групират устойчиво в обхвата GSI = 30 - 35, което в участъка от км 367+220 до км 367+700 практически съвпада с проектите прогнози. В останалите участъци те показват системно изместване надолу, спрямо проектните стойности, съответстващи общо долната граница на масив Тип В.

Анализ на причините за изменението на показателя GSI

Разминаването и изменението на GSI не е събитие от случаен характер, а се дължи на три, като цяло обективни фактора:

- косвено определяне на показателя GSI посредством поредица от емпирични корелационни зависимости, при които може да се получи едностранно натрупване на неопределености;
- структурно разуплътняване на масива в зоната на забоя, изразяващо се в отваряне затворените и формиране на нови пукнатини вследствие на разтоварването на естествените геостатични и тектонски напреженията в масива, както и вследствие на взривните изкопни работи, водещи до неговото отслабване;
- силно усложнени условия на планинския терен, изразяващи се в труднодостъпни залесени участъци с липса на разкрития за повърхностна картировка на тектонски зони и затруднен достъп за сондиране.

Основен подход за преодоляване на неблагоприятния ефект върху представителността и достоверността на инженерногеоложките проучвания е извършване на достатъчни по вид и обем проучвателни работи. В световната практика е възприето, че при отношение на дължините на сондажите спрямо дължината на тунела до 15, рискът от преразход над 10% спрямо проектната/строителната стойност на строителството е неприемливо висок. За условията на Тунел „Железница“ това отношение е 0,42 като съгласно обобщаващия доклад на Асоциация „Прозрачност без граници“ (2024), договорната стойност за строителството на тунелната част е надвишена с 15,7%.

Заключение и препоръки

1. Тунел „Железница“ се характеризира със сложна и неравномерно развита структурна нарушеност на масива, която наред с методологичните недостатъци на приложимите методи на проучване и трудните условия за достъп са основни причини за установените различия между проектните стойности на показателя GSI и определените при картиране на забоя по време на строителството. Като цяло, в преобладаващата част на тунела проектните стойности са по-високи от картираните. Това е довело до необходимостта от модифициране на проектните крепежни конструкции по време на строителството, което е довело и до надвишаване на неговата стойност.

2. Спазването на утвърдения международен подход за минимални видове и обеми проучвателни работи ще доведе до съществено подобряване качеството на проектите и икономическата ефективност на изпълнението им.

3. При ограничени договорни, финансови и организационни възможности за извършване на такива проучвания е препоръчително оценките за показателите на масива да бъдат занижени до приемливи консервативни стойности.

Установеният при настоящия анализ обхват на изменение на стойностите на показателя GSI = 30÷35 е подходящ да се използва като референтна база при проектиране на подземни съоръжения в сходни структурно нарушени масиви и разломни зони.

Литература

Асоциация „Прозрачност без граници“. (2024). Мониторингов доклад за изпълнението наобект: Автомагистрала „Струма“ - Лот 3.1.2, Тунел „Железница“. София.

Лаков, А., Стойнев, С. (2016). Геотехнически условия на тунел „Железница“ от АМ „Струма“. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, 59(1), 209–214.

Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal, 2(2),* 4–16.

Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(2),* 185–216.

Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. In Z. T. Bieniawski (Ed.), *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering Vol. 1*, pp. 97–106). A. A. Balkema.

Carter, T. G. (2014). GSI – Geotechnical baseline reports and risk allocation for underground works. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(3),* 921–945.

Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal, 2(2),* 4–16.

Hoek, E., & Marinos, P. (2000). GSI: A story of an evolving rock mass classification from 1994 to 2000. *Tunnels and Tunnelling International, 32(7),* 41–45.

Marinos, P., & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60(2),* 85–92.

Morelli, G. L. (2015). Determination of the Geological Strength Index (GSI) from drill core logs. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7(1),* 110–116.

Palmstrøm, A. (2005). Measurements of fracturing. Part 2: The volumetric joint count (Jv). *Tunnels and Underground Space Technology, 20(4),* 320–330.

Palmstrøm, A. (2009). Combining the RQD and the Jv indices to obtain more reliable measurements of rock mass fracturing. *Tunnels and Underground Space Technology, 24(4),* 497–501.

Sönmez, H., & Ulusay, R. (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(6),* 743–760.

Sönmez, H., & Ulusay, R. (2002). A discussion on the Geological Strength Index (GSI) and a new quantitative attempt for the estimate of rock mass properties. International *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(5),* 493–503.

APPLICATION OF NATURAL GAMMA BACKGROUND AND K, U, AND Th INDICATORS FOR INDIRECT ASSESSMENT OF RADON ACCUMULATION RISK IN GROUND-FLOOR AND BASEMENT ROOMS

Christian Tzankov[1], Bogomil Stefanov[2]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ch.tzankov@mgu.bg
[2]Hexagon-Build Ltd, 1839 Sofia; E-mail: b.stefanov@hexagon-build.com

ABSTRACT. This study examines the applicability of portable gamma spectrometry for the indirect assessment of the risk of radon release and accumulation in ground-floor rooms and basement spaces used for domestic purposes. The approach is based on the combined analysis of the natural gamma background, the contents of K, eU, and eTh, and radon-sensitive spectral intervals associated with ^{214}Pb and ^{214}Bi. A monitoring scheme was applied that included outdoor and indoor reference measurements, prolonged observations in a basement environment, room-by-room measurements, and controlled tests under ventilation and pressure-change conditions. The preliminary results indicate generally stable levels of natural background radiation and no evidence of anomalous artificial sources, while at the same time revealing a weak but persistent diurnal cyclicity in dose rate and a characteristic behaviour of the ^{214}Bi photopeak at 1764 keV, consistent with radon-related processes. The moderate relationship of this indicator with equivalent uranium and dose rate, along with its weak negative dependence on atmospheric pressure, suggests the influence of soil-gas transport under conditions of air exchange in enclosed near-surface spaces. The results show that portable gamma spectrometry does not replace direct radon measurements in Bq/m^3, but it can serve as a useful screening, comparative, and interpretative tool for identifying rooms and spaces with elevated potential for radon ingress and accumulation.

Key words: radiometry, radon, gamma spectrometry, natural radioactivity.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЕСТЕСТВЕНИЯ ГАМА-ФОН И ПОКАЗАТЕЛИТЕ ЗА K, U И Th ЗА НЕПРЯКА ОЦЕНКА НА РИСКА ОТ НАТРУПВАНЕ НА РАДОН В ПРИЗЕМНИ И СУТЕРЕННИ ПОМЕЩЕНИЯ

Християн Цанков[1], Богомил Стефанов[2]
[1]Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
[2]Хексагон-Билд ЕООД, 1839 София

РЕЗЮМЕ. В настоящото изследване се разглежда приложимостта на преносимата гама-спектрометрия за непряка оценка на риска от отделяне и натрупване на радон в приземни и сутеренни помещения за битови нужди. Подходът се основава на съвместен анализ на естествения гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh и радон-чувствителни спектрални интервали, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi. Приложена е схема на мониторинг, включваща външни и вътрешни референтни измервания, продължителни наблюдения в сутерен, измервания по помещения и контролирани тестове при вентилация и промяна на налягането. Предварителните резултати показват като цяло стабилни нива на естествения радиационен фон и липса на данни за аномални изкуствени източници, но същевременно разкриват слаба, но устойчива денонощна цикличност на дозовата мощност и поведение на фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV, съответстващо на процеси, свързани с радона. Умерената връзка на този индикатор с еквивалентния уран и дозовата мощност, както и слабата отрицателна зависимост от атмосферното налягане, насочват към влияние на почвено-газов пренос в условията на въздухообмен в затворени приземни обеми. Резултатите показват, че преносимата гама-спектрометрия не замества директните измервания на радон в Bq/m^3, но може да бъде полезен скринингов, сравнителен и интерпретационен инструмент за откриване на помещения с повишен потенциал за радоново проникване и натрупване.

Ключови думи: радиометрия, радон, гама-спектрометрия, естествена радиоактивност.

Въведение

Радонът (^{222}Rn) е естествен радиоактивен благороден газ, образуван в разпадната серия на ^{238}U. Поради газообразното си състояние и сравнително високата си подвижност той може да мигрира от почви, скали и строителни материали към приземни и сутеренни помещения, където при ограничен въздухообмен е възможно неговото натрупване. Този процес има важно значение за радиационната среда в сградите, тъй като продължителното излагане на повишени концентрации на радон се разглежда като съществен здравен риск, особено в затворени помещения с лоша вентилация (WHO, 2009; El-Taher, 2018). Поради това оценката на условията за радоново проникване и натрупване е важна задача както при радиационния контрол, така и при геоекологични и инженерни изследвания на сградната среда.

Директната оценка на радоновата активност във въздуха обикновено се извършва със специализирани пасивни или активни радонови детектори, които дават концентрация в Bq/m^3. Такива измервания са основният подход при нормативна или здравна оценка на радоновия риск. Същевременно радоновите концентрации могат да имат съществени кратковременни и сезонни вариации, свързани с атмосферно налягане, температура, влажност, вентилация, експлоатационен режим на сградата и възможни пътища за почвено-газов пренос. Това налага използването на допълнителни подходи, които да подпомагат интерпретацията на пространствените и времевите изменения на радиационната среда.

Гама-спектрометрията е утвърден радиометричен метод в геофизиката, използван за определяне на естествения гама-фон, съдържанията на K, U и Th, геоложко картиране, търсене на минерални ресурси и екологичен мониторинг (Пищалов и др., 1978; IAEA, 2003; Dentith and Mudge, 2014). При полеви измервания с преносими гама-спектрометри обикновено се оценяват съдържанието на ^{40}K, еквивалентен уран (eU), еквивалентен торий (eTh) и дозовата мощност. Тези параметри дават информация за естествената радиоактивност на средата и за възможни локални различия, свързани с геоложки, строителни или антропогенни фактори. В последните години преносимата

гама-спектрометрия намира приложение и като неразрушителен метод за оценка на радиоелементния състав на строителни материали и каменни блокове в сгради и културно-исторически обекти (Hernández Santomé et al., 2025).

Важно ограничение е, че ^{222}Rn сам по себе си е алфа-излъчвател и не може да бъде измерен директно чрез гама-спектрометър. Неговите краткоживеещи дъщерни продукти обаче, особено ^{214}Pb и ^{214}Bi, излъчват характерни гама-кванти, които могат да бъдат регистрирани в енергийния спектър. Сред най-често използваните радон-свързани линии са тези на ^{214}Pb около 295 и 352 keV и на ^{214}Bi около 609, 1120 и 1764 keV (El-Taher, 2018). Поради това измененията в определени спектрални прозорци, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi, могат да бъдат използвани като индиректни индикатори за процеси, свързани с радонова ексхалация, натрупване и пренос. Този подход не замества директното измерване на радон в Bq/m^3, но може да даде допълнителна информация за относителни пространствени и времеви промени в радиационната среда.

Настоящото изследване разглежда приложимостта на преносима гама-спектрометрия за непряка оценка на условията за радоново проникване и натрупване в приземни и сутеренни помещения на сграда в централната част на гр. София. Подходът се основава на съвместен анализ на естествения гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh, дозовата мощност и избрани радон-чувствителни спектрални интервали, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi. Измервателната схема включва външни и вътрешни референтни измервания, продължителен мониторинг в сутеренно помещение, измервания по отделни помещения и контролирани тестове при промяна на вентилационните и баричните условия. Целта е да се оцени доколко този тип радиометрични наблюдения могат да бъдат използвани като скринингов, сравнителен и интерпретационен инструмент за открояване на помещения с повишен потенциал за радоново проникване и натрупване.

Обект и методика на изследване

Обект на изследване

Изследването е проведено в жилищна сграда, разположена в централната част на гр. София. Обектът включва приземни, сутеренни и надземни помещения, използвани за битови нужди. Основният интерес е насочен към сутеренната част на сградата, тъй като подобни помещения обикновено са с по-висок потенциал за радоново проникване и натрупване поради непосредствената им връзка с почвата, наличие на технически отвори, комуникационни трасета, фуги и ограничен въздухообмен.

За продължителен мониторинг е избрано сутеренно сервизно помещение (фиг. 1), в което преминават водопроводни, отоплителни и комуникационни линии. Подобни конструктивни и инсталационни особености могат да създават предпочитани пътища за миграция на почвен газ към вътрешността на сградата. Допълнително са изследвани помещения на различни етажи, включително дневни, кухненски, спални, санитарни и помощни помещения, с цел сравнение на естествения гама-фон и радиометричните показатели в различни условия на обитаване, вентилация и конструктивна среда.

Фиг. 1. Използвана апаратура и измервателна обстановка в сутеренното помещение

Използвана апаратура

Гама-спектрометричните измервания са изпълнени с преносим гама-спектрометър Gamma Surveyor Vario (фиг. 1), оборудван със сцинтилационна сонда VB21 с кристал от бисмут-германатен оксид (BGO). Апаратът позволява регистриране на пълен гама-спектър, както и изчисляване на основни радиометрични параметри: съдържание на калий K (%), еквивалентен уран eU (ppm), еквивалентен торий eTh (ppm) и дозова мощност DR (nSv/h). Записът на пълния спектър позволява последващ анализ на избрани енергийни интервали, включително такива, свързани с гама-излъчващи дъщерни продукти на радона.

Като допълнителен ориентир за радоновата обстановка в сутерена е използван и малък електронен радонов монитор тип Airthings, отчитащ концентрация на радон във въздуха в Bq/m^3. Данните от този уред не са използвани като основен количествен резултат в настоящото изследване, а служат само като независима потвърждаваща информация за наличието на измерими радонови концентрации в сутеренното помещение. Основният акцент в статията остава върху гама-спектрометричните показатели и тяхната интерпретация като индиректни радон-свързани индикатори.

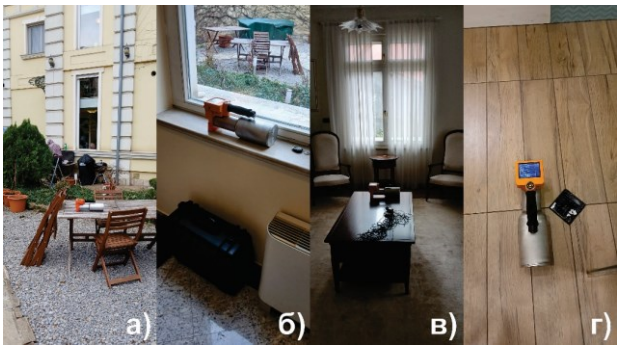
Измервателна схема

Измерванията са организирани поетапно, така че да се оцени както общият естествен гама-фон в сградата, така и възможните пространствени и времеви изменения, свързани с радоново проникване и натрупване.

Първоначално са изпълнени референтни измервания извън сградата, в дворно пространство, с цел определяне на външен фонов радиометричен ориентир (фиг. 2а). След това е избрана вътрешна референтна точка в близост до

входната част на сградата, която представя условията на нормален вътрешен гама-фон при обичайна вентилация и без пряка връзка със сутеренната зона (фиг. 2б).

Основният етап на изследването включва продължителен мониторинг в сутеренното сервизно помещение (фиг. 1). Гама-спектрометърът е инсталиран неподвижно в помещението и е оставен да работи непрекъснато в периода от 28.11.2025 г. до 12.12.2025 г. Целта на този етап е да се проследят времевите изменения на дозовата мощност, K, eU, eTh и пълния гама-спектър при относително постоянна геометрия на измерване. По този начин се намалява влиянието на позиционни ефекти и се създава възможност за анализ на денонощни и кратковременни вариации.



Фиг. 2. Фотоколаж с основните типове точки: а) външна референтна, б) вътрешна референтна, в) стандартна стая, г) стандартно санитарно помещение

След приключване на продължителния мониторинг са проведени точкови измервания в отделни помещения на сградата. Те включват помещения на първи, втори и трети етаж (фиг. 2в), както и санитарни помещения (фиг. 2г), при които е възможно наличие на по-интензивен въздухообмен, вертикални комуникации и локални пътища за пренос на въздух от по-ниските части на сградата. Измерванията по помещения са използвани за сравнение на пространственото разпределение на естествения гама-фон и основните радиометрични показатели.

Допълнително са проведени контролирани тестове в сутеренното помещение при промяна на вентилационните и баричните условия. Целта на тези тестове е да се оцени дали промяната на въздушния обмен и налягането в помещението води до измерими изменения в дозовата мощност и в радон-чувствителните части на гама-спектъра. Тези опити са използвани не като самостоятелна оценка на концентрацията на радон, а като проверка на чувствителността на гама-спектрометричните показатели към условията на въздухообмен и възможен почвено-газов пренос.

Обработка и анализ на данните

След приключване на измерванията данните от гама-спектрометъра са прехвърлени и систематизирани в работна база данни. За всяка измервателна точка са отчетени средните стойности на K, eU, eTh и DR, а за продължителния сутеренен мониторинг са анализирани времевите редове на основните радиометрични показатели. Паралелно с това са разгледани и пълните гама-спектри с цел отделяне на енергийни прозорци, свързани с дъщерни продукти на радона.

Особено внимание е отделено на спектралните интервали, свързани с ^{214}Pb и ^{214}Bi, които са краткоживеещи дъщерни продукти от разпадната серия на ^{238}U и могат да служат като индиректни индикатори за радон-свързани процеси. В анализа е използван прозорец около фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV, като неговото поведение е съпоставено с eU, дозовата мощност и метеорологични параметри, включително атмосферно налягане. За външен контрол на регионалната радиационна обстановка са използвани и данни от постоянни радиометрични станции в района на София, достъпни чрез платформата EURDEP/REMap.

Получените резултати са интерпретирани сравнително: между външна и вътрешна референтна точка, между сутерен и надземни помещения, както и между различни периоди от продължителния мониторинг. По този начин методиката е насочена не към директно определяне на концентрацията на радон във въздуха, а към оценка на относителни пространствени и времеви изменения на радиометричните показатели, които могат да бъдат свързани с повишен потенциал за радоново проникване и натрупване.

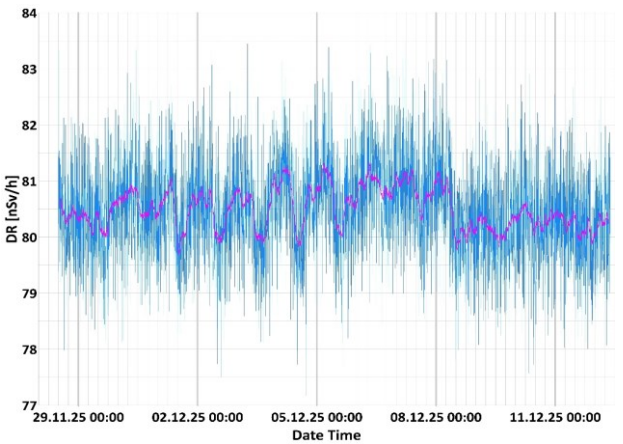
Резултати

Получените резултати показват, че изследваната сграда се характеризира със сравнително стабилни нива на естествения гама-фон. Не са установени резки локални повишения на дозовата мощност или спектрални особености, които да насочват към наличие на аномални изкуствени радиоактивни източници. Основните вариации в регистрираните стойности се свързват с естествените радионуклиди K, U и Th, с различията между отделните помещения и с условията на въздухообмен в сградата.

Референтните измервания извън и вътре в сградата показват по-ниски стойности на дозовата мощност спрямо сутеренното помещение. Външната референтна точка в дворното пространство е характеризирана със стойности на дозовата мощност около 44–54 nSv/h, а вътрешната референтна точка при входната част — около 42 nSv/h. За сравнение, при продължителния мониторинг в сутеренното сервизно помещение средната стойност на дозовата мощност е около 80,5 nSv/h. В същата точка са получени и по-високи средни стойности на радиометричните показатели — K около 3,58%, eU около 6,16 ppm и eTh около 13,34 ppm. Тези различия показват, че сутеренът се отличава от останалите референтни условия както по общия гама-фон, така и по естествената радиоелементна характеристика на средата.

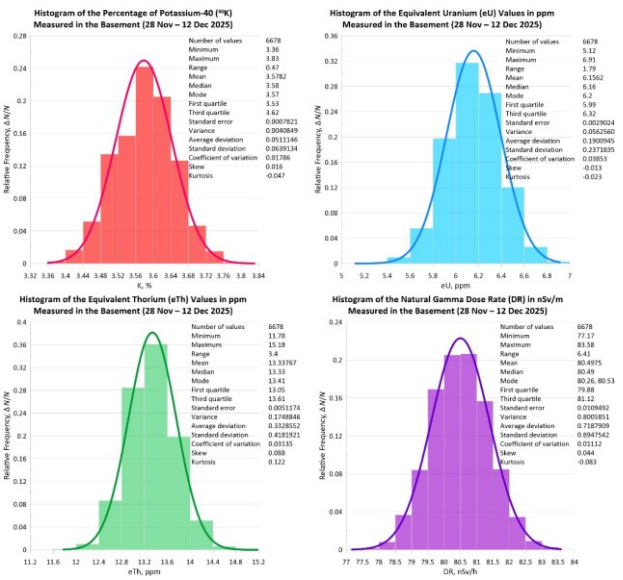
Продължителният мониторинг в сутеренното помещение обхваща периода от 28.11.2025 г. до 12.12.2025 г. и включва 6678 последователни измервания. Времевият ред на дозовата мощност (фиг. 3) показва обща стабилност на фона, без резки аномални отклонения. Въпреки това се откроява слаба, но устойчива денонощна цикличност, най-добре изразена в периода между 30.11 и 09.12.2025 г. В повечето дни се наблюдава относителен минимум около 13:00–15:00 ч., последван от покачване към първи максимум около 18:00–20:00 ч. След това стойностите обикновено слабо намаляват и достигат втори, по-изразен максимум след около 04:00–05:00 ч. Тази цикличност вероятно отразява комбинирано влияние на режима на

използване на сградата, вентилацията, температурно-баричните условия и възможния почвено-газов пренос.



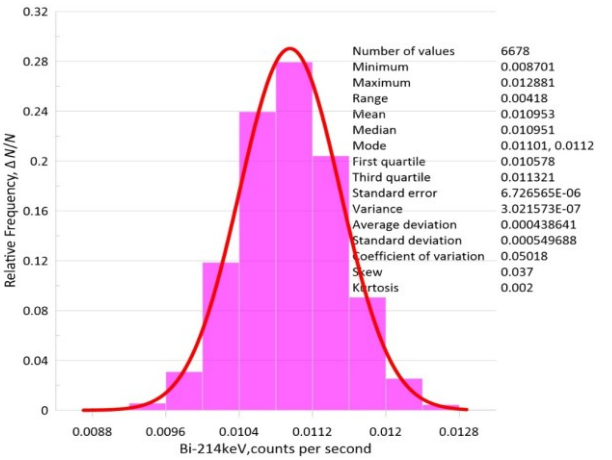
Фиг. 3. Времеви ред на дозовата мощност за 14-дневния мониторинг в сутерена на сградата

Статистическото разпределение на основните радиометрични показатели K, eU, eTh и DR показва приблизително нормален характер и липса на ясно изразени екстремни стойности. Това потвърждава, че регистрираният гама-фон е доминиран от естествени източници и че наблюдаваните изменения са по-скоро относителни и динамични, отколкото резултат от отделен силен локален източник. Този резултат е важен, тъй като позволява последващият анализ на радон-чувствителните спектрални интервали да се разглежда на фона на сравнително стабилна естествена радиометрична среда.



Фиг. 4. Хистограми на стойностите на K, eU, eTh и DR за измерванията в сутеренното помещение

За оценка на възможни радон-свързани процеси е анализиран спектрален прозорец около фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV (фиг. 5). Този пик е свързан с краткоживеещ дъщерен продукт от разпадната серия на ^{238}U и може да реагира на промени в наличността и преразпределението на радон и неговите продукти на разпад. Получените резултати показват, че интензитетът в прозореца около 1764 keV има умерена положителна връзка с еквивалентния уран и с дозовата мощност. Корелационните коефициенти са съответно около 0,575 за връзката с eU и около 0,602 за връзката с DR (табл. 1). За разлика от това, връзката с K и eTh е много слаба, което подкрепя интерпретацията, че поведението на този спектрален интервал е по-тясно свързано с урановата серия, отколкото с общи вариации на всички естествени радионуклиди.



Фиг. 5. Хистограма на ^{214}Bi индикатора, извлечен от спектралния прозорец 1740–1790 keV за измерванията в сутеренното помещение

Таблица 1. *Коефициенти на корелация между основните радиометрични параметри и 1764 keV прозореца (^{214}Bi)*

	K	eU	eTh	DR
^{214}Bi	-0.039	0.575	-0.040	0.602

Таблица 2. *Коефициенти на корелация между отчетите в 1764 keV прозореца (^{214}Bi) и различни метеорологични параметри при различни времеви закъснения*

Времево закъснение	Температура °C	Атм. налягане hPa	Скорост на вятъра km/h	Влажност %
0 min	-0.026912	-0.249355	0.064908	0.158087
30 min	-0.024077	-0.254007	0.076349	0.148018
60 min	-0.012101	-0.257310	0.051863	0.129386
90 min	0.003185	-0.261883	0.062800	0.112118
120 min	0.013426	-0.265497	0.060758	0.133059
150 min	0.009436	-0.271435	0.057199	0.143183

Съпоставката между ^{214}Bi индикатора и метеорологичните параметри показва слаба отрицателна зависимост от атмосферното налягане. Получените корелационни коефициенти са от порядъка на -0,25 до -0,27 при различно времево закъснение между 0 и 150 min. Макар зависимостта да не е силна, устойчивият отрицателен знак е съвместим с възможно влияние на почвено-газов пренос: при по-ниско атмосферно налягане може да се улеснява придвижването на почвен газ към сутеренни пространства, докато при по-високо налягане този процес се ограничава. Връзките с температура, влажност и скорост на вятъра са по-слабо изразени и не показват самостоятелно доминиращ контрол върху радон-чувствителния гама-спектрален индикатор.

Контролните тестове при промяна на вентилационните и баричните условия в сутеренното помещение показват слаба, краткотрайна реакция на радиометричните показатели. Наблюдаваното леко повишение на фона може да се интерпретира като временно освобождаване или преразпределение на радон-съдържащ почвен газ от локални порови пространства, пукнатини или кухини в основата и около сутеренната част на сградата. След преминаване на този кратък преходен ефект стойностите се връщат към обичайния си диапазон. Това показва наличие на динамичен почвено-газов обмен, но в рамките на проведените наблюдения не дава основание да се говори за устойчиво или екстремно натрупване на радон.

Допълнителният радонов монитор, разположен в сутерена, отчита стойности от порядъка на 113 Bq/m^3 за краткосрочната средна стойност и около 149 Bq/m^3 за дългосрочната средна стойност към момента на отчитане. Тези данни не са използвани за количествено калибриране на гама-спектрометричните резултати, но представляват независим ориентир, че в сутеренното помещение е налице измерим радонов фон. Това подкрепя интерпретацията, че част от наблюдаваните изменения в ^{214}Bi индикатора могат да бъдат свързани с радон-свързани процеси.

Интерпретация и дискусия

Получените резултати показват, че преносимата гама-спектрометрия може да бъде използвана като допълнителен инструмент за оценка на радиометричната обстановка в приземни и сутеренни помещения. Предимството на подхода е, че едновременно се получава информация за общия естествен гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh, дозовата мощност и пълния гама-спектър. Това позволява да се разграничат обичайни вариации на естествената радиоактивност от по-специфични изменения в спектрални интервали, свързани с урановата разпадна серия и с дъщерните продукти на радона.

В конкретния случай не са установени данни за аномални изкуствени радиоактивни източници. Радиометричните показатели имат сравнително стабилно поведение, а по-високите стойности в сутеренното помещение спрямо външната и вътрешната референтна точка могат да се обяснят с комбинация от естествена радиоактивност на строителната и геоложката среда, по-пряка връзка с основите на сградата и условия за ограничен въздухообмен. Наличието на комуникационни трасета, фуги и технически отвори допълнително може да създава локални пътища за миграция на почвен газ.

Най-съществен за интерпретацията е анализът на спектралния прозорец около 1764 keV, свързан с ^{214}Bi. Тъй като ^{214}Bi е краткоживеещ дъщерен продукт от разпадната серия на ^{238}U и е свързан с разпада на ^{222}Rn, измененията в този прозорец могат да се разглеждат като индиректен радон-чувствителен индикатор. Умерената положителна връзка на този индикатор с eU и дозовата мощност показва, че той не е случаен шумов ефект, а има връзка с радиометричната характеристика на урановата серия. Същевременно слабата връзка с K и eTh подсказва, че поведението му не се обяснява само с обща промяна на всички естествени радиоелементи.

Слабата отрицателна зависимост между ^{214}Bi индикатора и атмосферното налягане е съвместима с модел на почвено-газов пренос към сутеренната част на сградата. При по-ниско атмосферно налягане движението на почвен газ към затворени приземни и сутеренни обеми може да се улесни, докато при по-високо налягане този процес се ограничава. Наблюдаваната денонощна цикличност на дозовата мощност вероятно отразява съчетано влияние на този процес с режима на вентилация, температурно-баричните условия и използването на сградата. Поради това тя не трябва да се разглежда като самостоятелно доказателство за повишена концентрация на радон, а като индикатор за динамична радиометрична среда.

Контролните тестове с промяна на вентилацията и налягането допълват тази интерпретация. Слабото краткотрайно повишение на фона може да се свърже с временно разтоварване или преразпределение на натрупан радон-съдържащ почвен газ от локални порови пространства, пукнатини или кухини около сутерена. Последващото затихване на ефекта показва, че газообменът е динамичен и краткотраен. Това подкрепя идеята за наличие на потенциални пътища за почвено-газов пренос, но не показва устойчиво екстремно натрупване в рамките на проведеното изследване.

Важно ограничение е, че гама-спектрометрията не измерва директно концентрацията на радон във въздуха. Радонът е алфа-излъчвател, а регистрираният гама-сигнал е свързан предимно с неговите краткоживеещи дъщерни продукти. Поради това от получените данни не може надеждно да се изведе директна концентрация на радон в Bq/m^3 без специална калибрация, контролирана геометрия и паралелни директни радонови измервания. Допълнителният радонов монитор в сутерена потвърждава наличието на измерими концентрации на радон, но тези данни са използвани само като независим ориентир, а не за калибриране на гама-спектрометричните показатели.

В този смисъл преносимата гама-спектрометрия не замества класическите методи за измерване на радон, но може да ги допълва ефективно. Методът е особено полезен при предварителни обследвания на сгради, при избор на представителни помещения за дългосрочен радонов мониторинг и при открояване на зони с по-висок потенциал за радоново проникване и натрупване.

Заключение

Проведеното изследване показва, че преносимата гама-спектрометрия може да се използва като полезен неразрушителен метод за предварителна оценка на радиометричната обстановка в приземни и сутеренни помещения. Чрез съвместен анализ на естествения гама-фон, съдържанията на K, eU и eTh, дозовата мощност и избрани радон-чувствителни спектрални интервали могат да се откроят пространствени и времеви изменения, свързани с условия за радоново проникване и натрупване.

В изследваната сграда не са установени данни за аномални изкуствени радиоактивни източници. По-високи радиометрични показатели са отчетени в сутеренното помещение спрямо външната и вътрешната референтна точка. Продължителният мониторинг показва сравнително стабилен естествен фон, върху който се проявяват слаба денонощна цикличност и характерно поведение на

спектралния индикатор, свързан с фотопика на ^{214}Bi при 1764 keV.

Умерената положителна връзка на ^{214}Bi индикатора с eU и дозовата мощност, както и слабата отрицателна зависимост от атмосферното налягане, са съвместими с влияние на урановата разпадна серия и почвено-газов пренос върху радиометричната обстановка в сутеренната част на сградата. Тестовете при промяна на вентилационните и баричните условия показват слаба краткотрайна реакция, която може да се интерпретира като временно освобождаване или преразпределение на радон-съдържащ почвен газ от локални пространства около сутерена. В рамките на проведените наблюдения не са получени данни за устойчиво или екстремно натрупване на радон.

Основното ограничение на подхода е, че гама-спектрометрията не измерва директно ^{222}Rn, а регистрира гама-излъчващи негови дъщерни продукти, главно ^{214}Pb и ^{214}Bi. Поради това методът не може да замести директните измервания на радон в Bq/m^3 и не следва да се използва самостоятелно за нормативна оценка на радоновия риск.

Получените резултати показват, че преносимата гама-спектрометрия може да служи като скринингов, сравнителен и интерпретационен инструмент. Тя може да подпомогне избора на помещения за последващ дългосрочен радонов мониторинг и да допълни директните радонови измервания с информация за естествената радиоактивност, радиоелементния състав и динамиката на гама-фона.

Литература

Пищалов, С., Иванова, В., & Лозенски, И. (1978). *Радиометрия и ядрена геофизика*. Техника.

Council of the European Union. (2014). *Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation*. Official Journal of the European Union, L 13, 1–73.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

El-Taher, A. (2018). *An overview of instrumentation for measuring radon in environmental studies*. Journal of Radiation and Nuclear Applications, 3(3), 135–141. https://doi.org/10.18576/jrna/030302

Erdi-Krausz, G., Matolin, M., Minty, B., Nicolet, J. P., Reford, W. S., & Schetselaar, E. M. (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363. International Atomic Energy Agency.

European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *European Radiological Data Exchange Platform (EURDEP)*. Retrieved December 2025, from https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange

European Commission, Joint Research Centre. (2025). *EURDEP gamma dose-rate time-series data for station BG0026 Sofia, 27 November–13 December 2025 [Data set]*. European Radiological Data Exchange Platform / REMap. Retrieved December 2025, from https://remap.jrc.ec.europa.eu/

Hernández Santomé, A. C., Sanjurjo-Sánchez, J., & Alves, C. (2025). *Use of hand-held gamma-ray spectrometry to assess decay of granite ashlars in historical buildings of NW Spain (Barbanza, Galicia)*. Journal of Cultural Heritage, 71, 20–29. https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.019

Tzankov, C., & Stefanov, B. (2025). *Gamma-spectrometric survey for indirect assessment of radon-related variations in a building at 57 Oborishte Str., Sofia* [Unpublished technical report]. Personal archive of the authors.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes*. Volume I: Sources. United Nations.

World Health Organization. (2009). *WHO handbook on indoor radon: A public health perspective*. World Health Organization.

СЕКЦИЯ

ДОБИВ НА ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ

SECTION

EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES

STANDARDISATION AND QUALITY CONTROL OF HYDROGEN IN DEDICATED GAS NETWORKS: EUROPEAN AND INTERNATIONAL PRACTICES

Lyudmila Bojkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: l.bojkova@mgu.bg

ABSTRACT. This report presents an analysis of the development of the hydrogen economy, which is considered a key element of the energy transition toward a low-carbon energy system. The widespread integration of hydrogen into energy infrastructure requires the development and implementation of reliable technical standards to ensure safety, interoperability, and effective control of gas quality. The report provides an overview of existing standardisation activities in Europe and at the international level, with a focus on hydrogen networks and the quality of gaseous hydrogen. The main topics addressed include leak detection and emission monitoring, hydrogen odourisation (including the use of sulphur-free odorants), safety and explosion prevention, hydrogen purification systems, as well as gas quality parameters. Based on the analysis, conclusions are drawn regarding existing gaps and priority directions for the future development of standardisation in the field of hydrogen technologies.

Key words: hydrogen, infrastructure, standardisation, safety, detection.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛ НА КАЧЕСТВОТО НА ВОДОРОДА В СПЕЦИАЛИЗИРАНИ ГАЗОВИ МРЕЖИ: ЕВРОПЕЙСКИ И МЕЖДУНАРОДНИ ПРАКТИКИ

Людмила Божкова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящия доклад е извършен анализ на развитието на водородната икономика, която се разглежда като ключов елемент от енергийния преход към нисковъглеродна енергийна система. За широкото внедряване на водорода в енергийната инфраструктура е необходимо разработването и прилагането на надеждни технически стандарти, които да гарантират безопасност, оперативна съвместимост и ефективен контрол на качеството на газа. Докладът представя обзор на съществуващите дейности по стандартизация в Европа и на международно ниво, с фокус върху водородните мрежи и качеството на газообразния водород. Разгледани са основни теми като откриване на течове и мониторинг на емисиите, одоризация на водорода (включително използването на безсерни одоранти), безопасност и предотвратяване на експлозии, системи за пречистване на водород, както и параметри за качество на газа. На базата на анализа са формулирани изводи относно съществуващите пропуски и приоритетните направления за бъдещо развитие на стандартизацията в областта на водородните технологии.

Ключови думи: водород, инфраструктура, стандартизация, безопасност, идентифициране.

Въведение

Техническите стандарти са основа за проектиране, изграждане, експлоатация и поддръжка на технически системи. Те определят изисквания към продукти, материали и процеси, както и отговорности на операторите на инфраструктурата, с цел гарантиране на функционалност, оперативна съвместимост и безопасност. При внедряването на водорода в европейската енергийна система, стандартите са критични поради специфичните свойства на H_2, включително висока дифузионна способност, широк диапазон на запалимост и ниска енергия на запалване.

В настоящия обзор терминът „мрежа“ означава система от тръбопроводи за транспортиране на водород до крайни потребители или до други системи, включително подземни хранилища. Анализът се фокусира върху стандартизационни дейности в CEN, CENELEC, ISO, IEC и националните стандартизационни организации.

Текст

Стандартизационна рамка и видове документи

Документите по стандартизация се разработват от експертни групи, включващи оператори, производители, крайни потребители, държавни органи, индустриални асоциации и научно-технически организации. На европейско и международно ниво ключови роли имат CEN/CENELEC и ISO/IEC.

Основните типове стандартизационни документи включват: Европейски стандарт (EN) като нормативен документ за внедряване на национално ниво; Техническа спецификация (TS) при недостатъчна зрелост на технологиите; Технически доклад (TR) като информативен документ; и CEN Workshop Agreement (CWA) като механизъм за съгласуване с индустрията.

Международното сътрудничество се подпомага чрез Vienna Agreement (CEN–ISO) и Frankfurt Agreement (CENELEC–IEC), които позволяват паралелна разработка и гласуване на стандарти и последващо приемане на международни стандарти като европейски.

Основни теми за стандартизация при водородни мрежи

В практиката, ключовите направления, които определят безопасността и оперативната съвместимост на водородните мрежи, включват:

- откриване на течове на водород и мониторинг на емисиите;
- одоризация на водород (вкл. безсерни одоранти) и детекция със и без одоризация;
- безопасност и технически решения за предотвратяване на запалване и експлозии;
- системи за пречистване на водород и контрол на примеси;

- параметри за качество на водорода за използване в мрежи и крайни приложения.

Откриване на течове и мониторинг на емисиите

Откриването на течове и мониторингът на емисиите са съществени както за безопасността, така и за екологичната отчетност (таблица 1). В зависимост от мащаба се прилагат „bottom-up“ подходи (локални измервания и инспекции) и „top-down“ подходи (обобщаващи методи за големи мрежи и хранилища). В системите за управление на безопасността тези дейности следва да бъдат интегрирани в оперативните процеси и плановете за поддръжка.

Таблица 1. *Идентифицирани стандарти, свързани с откриването и мониторинга на течове по отношение на емисиите*

Документ	Заглавие	Релевантност
ISO 14064-1:2019	Парникови газове – Спецификация с насоки на организационно ниво	**релевантен**
ISO/TS 19870:2023	Методология за определяне на ПГЗ емисии, свързани с производството, кондиционирането и транспорта на водород	**релевантен**
prEN ISO 19870-1	Методология за определяне на ПГЗ емисии – Производ-ство до производ-ствена врата	**релевантен**
ISO 19880-1:2020	Газообразен водород – Зарядни станции	**релевантен**
ISO/AWI TS 19880-10	Газообразен водород – Мобилни зарядни станции	**релевантен**
ISO 24367:2023	Безразрушителен контрол – Изпитване с акустична емисия – Метални съоръжения под налягане	**релевантен**
EN 13160-1 до -7	Системи за детектиране на течове – Части 1–7	**информативен**

Откриване на течове със и без одоризация; безсерни одоранти

Одоризацията е класически подход за повишаване на безопасността при газови мрежи. При водорода традиционните серни одоранти (използвани при природен газ) могат да бъдат неподходящи за редица приложения, особено при горивни клетки и чувствителни каталитични процеси. Това мотивира разработването на безсерни одоранти и критерии за избор, включително химична стабилност, съвместимост с материали, влияние върху пречистването и възможност за надеждно възприемане от хората.

Таблица 2. *Идентифицирани стандарти, свързани с детектирането и мониторинга на течове*

Документ	Заглавие	Релевантност
ISO/IEC 17025:2017	Общи изисквания за компетентност на изпитвателните лаборатории	**релевантен**
EN 13018:2001	Безразрушителен контрол – Визуален контрол – Общи принципи	**релевантен**
EN 13160-1 до -7	Системи за детектиране на течове – Части 1–7	**информативен**
EN 13184:2001	Безразрушителен контрол – Метод на промяна на налягането	**релевантен**
EN 13192:2001	Безразрушителен контрол – Калибриране на референтни течове за газове	**релевантен**
EN 13625:2001	Безразрушителен контрол – Ръководство за избор на инструментариум	**релевантен**
EN 14291	Пенообразуващи разтвори за детектиране на течове в газови инсталации	**релевантен**
EN 15446:2008	Фугитивни и дифузни емисии – Измерване	**релевантен**
EN 17649:2022	Газова инфраструктура – SMS и PIMS – Функционални изисквания	**релевантен**
EN ISO 18081:2024	Безразрушителен контрол – Изпитване с акустична емисия – Детектиране на течове	**релевантен**

Безопасност и предотвратяване на експлозии

Поради ниската енергия на запалване и широките граници на запалимост на водорода, управлението на риска трябва да се базира на комбинация от инженерни мерки (детекция, автоматични отсечки, вентилация), процедурни изисквания (инспекции, поддръжка) и стандартизирани методи за класификация на взривоопасни зони и избор на оборудване (таблици 3 и 4).

Таблица 3. *Стандарти, свързани с протоколи за безопасност*

Документ	Заглавие	Релевантност
EN 17649	Газова инфраструктура – SMS и PIMS – Функционални изисквания	**релевантен**
prCEN/TS XXXX (JT006004)	Безопасност на водородния газ в затворени пространства	**релевантен**
ISO/TR 15916:2015	Основни съображения за безопасността на водородните системи	**релевантен**
EN ISO 22734-1:2025	Водородни генератори чрез електролиза на вода – Безопасност	**информативен**
ISO 16110-1:2007	Водородни генератори чрез технологии за преработка на горивото – Безопасност	**информативен**
ISO 19880-1:2020	Газообразен водород – Зарядни станции – Общи изисквания	**информативен**
ISO Guide 51:2014	Аспекти на безопасността – Насоки за включването им в стандарти	**информативен**

Таблица 4. *Стандарти за технически решения за предотвратяване и управление на експлозии*

Документ	Заглавие	Релевантност
EN 1127-1:2019	Взривоопасни атмосфери – Предотвратяване и защита – Основни концепции	**релевантен**
EN 13237:2024	Потенциално взривоопасни атмосфери – Термини и определения	**информативен**
EN 15198:2007	Методология за оценка на риска от незапалимо оборудване	**релевантен**
EN IEC 60079-0	Взривоопасни атмосфери – Оборудване – Общи изисквания	**релевантен**
EN IEC 60079-10-1	Взривоопасни атмосфери – Класификация на зони	**релевантен**
EN IEC 60079-14	Взривоопасни атмосфери – Проектиране, избор и монтаж на електрически инсталации	**релевантен**
EN IEC 60079-17:2024	Взривоопасни атмосфери – Проверка и поддръжка	**релевантен**

Системи за пречистване на водород

Произведеният водород може да съдържа примеси като H_2O, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4 и следи от серни компоненти. Контролът на тези примеси е критичен за надеждността на инфраструктурата и крайните приложения, поради което са необходими стандартизирани изисквания за чистота и методи за анализ (таблица 5 и 6).

Таблица 5. *Идентифицирани стандарти за параметри на качеството на водорода*

Документ	Заглавие	Релевантност
CEN/TS 17977:2023	Газова инфраструктура – Качество на газа – Водород в преназначени газови системи	**релевантен**
EN 437	Изпитвателни газове – Изпитвателни налягания – Категории уреди	**информативен**
ISO 14687:2025	Качество на водородното гориво – Продуктова спецификация	**релевантен**
EN 16726	Газова инфраструктура – Качество на газа – Група Н	**информативен**
EN 16723	Природен газ и биометан за транспорт и биометан за инжектиране в газови мрежи	**информативен**

Таблица 6. *Идентифицирани стандарти за контрол и мониторинг на качеството на Водорода*

Документ	Заглавие	Релевантност
EN 17124:2022	Водородно гориво – Спецификация и качествено осигуряване за точки за зареждане	**релевантен**

ISO 19229:2019	Газов анализ – Анализ на чистотата и обработка на данни	**релевантен**
ISO 19880-8	Газообразен водород – Зарядни станции – Контрол на качеството на горивото	**информативен**
ISO 21087:2019	Газов анализ – Аналитични методи за водородно гориво за ПЕМ горивни клетки	**информативен**
EN ISO 6974 (серия)	Природен газ – Определяне на водород, инертни газове и въглеводороди	**релевантен**

Параметри за качество на водорода в мрежи

Параметрите за качество на водорода в мрежи следва да отчитат съвместимостта с инфраструктурата и нуждите на крайни приложения. Стандартите дефинират допустими граници за примеси, процедури за пробовземане, методи за измерване и изисквания към мониторинга.

В момента повечето съществуващи стандарти за качество на водорода приемат гледната точка на приложенията. Не съществува специфичен европейски или международен стандарт, определящ качеството на газообразния водород в специализирани водородни мрежи.

На международно ниво ISO 14687:2025 е водещият документ. Определените класове са:

-Тип 1, Клас A (чистота: 98%) – за битови/търговски уреди за горене

-Тип 1, Клас B (чистота: 99,90%) – за промишлено гориво

-Тип 1, Клас C (чистота: 99,995%) – за авиационни и космически PEM горивни клетки

-Тип 1, Клас D (чистота: 99,97%) – за PEM горивни клетки за пътни превозни средства

-Тип 1, Клас E – за PEM горивни клетки за стационарни уреди

-Тип 1, Клас F – за приложения с водородни двигатели с вътрешно горене

Идентифициране на нуждите от стандартизация:

Анализът потвърждава необходимостта от нов стандарт за качеството на газообразния водород в специализирани водородни мрежи, приложим за входа на водорода от производство или терминали в мрежата, както и за изхода от мрежата към свързаните приложения.

С оглед на европейската водородна карта, се препоръчва разработването на един стандарт за качество на водорода в газообразни водородни мрежи, независимо от вида на мрежата. CEN TS 17797 за „преназначени“ мрежи трябва да бъде свързан с нов стандарт.

Необходимостта от нови и/или адаптирани стандарти за контрол и мониторинг на качеството на водорода изисква допълнителен задълбочен анализ.

Заключение

Наличните стандарти предоставят добра основа, но значителна част от тях произхождат от контекста на природния газ. При водорода са необходими специфични изисквания за мониторинг на течове и емисии, критерии и тестови методи за безсерни одоранти, както и унифицирани подходи за контрол на качеството. Приоритетно е разработването на стандартизирани методи за измерването на изтичането на водород и интегрирането им в системи за управление на безопасността.

Литература

Бояджиев, М. (2023). Възможни концентрации на водород в газоразпределителните мрежи, доклад в научна конференция, Виена, SGEM 2023, ISBN 978619760365-1 DOI 10.5593/sgem2023/4.2/s17.59.

Бояджиев М. М., Георгиев, Л. *Управление на газовата инфраструктура*, МГУ София,190 р., ISBN 9128-7892.

ISO 14064-1:2019. Парникови газове — Част 1: Спецификация и насоки за количествено определяне и докладване на емисиите на парникови газове.

ISO/TS 19870:2023. Hydrogen technologies — Methodology for determining greenhouse gas emissions associated with hydrogen production and transport.

ISO 19880-1:2020. Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements.

ISO 24367:2023. Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Leak detection.

EN 13306. Поддръжка — Терминология (Maintenance — Terminology).

Регламент (ЕС) № 1025/2012 относно европейската стандартизация.

HyQUAL NET. Standardisation Landscape Report (Deliverable D3.1): Hydrogen quality in dedicated gas networks.

ENGINEERING AND DESIGN CHALLENGES IN THE PIPELINE TRANSPORTATION OF CARBON DIOXIDE: INFLUENCE OF IMPURITIES AND PHASE PROPERTIES

Lyudmila Bojkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: l.bojkova@mgu.bg

ABSTRACT. This report presents an analysis of the transportation of carbon dioxide (CO_2) through pipelines, which imposes specific engineering requirements arising from the phase behaviour of the fluid and the influence of impurities in the CO_2 stream. These factors have a significant impact on the critical thermodynamic properties of the fluid, as well as on the hydraulic design of pipelines, corrosion processes, and the structural integrity of the system. Maintaining CO_2 in a dense or supercritical phase requires precise control of operating parameters, including pressure, temperature, and fluid composition, as well as the implementation of specialised engineering solutions in the design and operation of pipeline infrastructure. The effective and safe design of such systems is based on reliable preliminary studies, analysis of phase properties, and the adaptation of engineering solutions to the specific characteristics of the transported CO_2.

Key words: carbon dioxide (CO_2), pipelines, state, impurities, design.

ИНЖЕНЕРНИТЕ И ПРОЕКТАНТСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ ТРАНСПОРТИРАНЕТО НА ВЪГЛЕРОДЕН ДИОКСИД ПО ТРЪБОПРОВОДИ: ВЛИЯНИЕ НА ПРИМЕСИТЕ И ФАЗОВИТЕ СВОЙСТВА

Людмила Божкова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящия доклад е извършен анализ на транспортирането на въглероден диоксид (CO_2) по тръбопроводи, което поставя специфични инженерни изисквания, произтичащи от особеностите на фазовото поведение на флуида и влиянието на примесите в CO_2 потока. Тези фактори оказват съществено въздействие върху критичните термодинамични свойства на флуида, както и върху хидравличното оразмеряване на тръбопроводите, корозионните процеси и структурната надеждност на системата. Поддържането на CO_2 в плътна или свръхкритична фаза изисква прецизен контрол на работните параметри, включително налягане, температура и състав на флуида, както и прилагането на специализирани инженерни решения при проектирането и експлоатацията на тръбопроводната инфраструктура. Ефективното и безопасно проектиране на такива системи се основава на надеждни предварителни изследвания, анализ на фазовите свойства и адаптиране на инженерните решения към специфичните характеристики на транспортирания CO_2.

Ключови думи: въглероден диоксид (CO_2), тръбопроводи, състояние, примеси, проектиране.

Въведение

Европа е установила водеща роля към глобална икономика с нулеви нетни емисии на парникови газове до 2050 г. За да стане това реално, европейската индустрия се стреми да постигне тази цел чрез широкомащабно приемане на нисковъглеродни технологии.

Значително инженерно предизвикателство на XXI век е намаляването на емисиите, съставени предимно от въглероден диоксид (CO_2) – продукт от горенето на изкопаеми горива (петрол, природен газ, въглища) и други промишлени и енергийни приложения. CO_2 е един от шестте парникови газа (ПГ), които допринасят за глобалното затопляне.

Един от ключовите начини за постигане на целта е чрез улавянето, транспортирането и съхранението на CO2 (Carbon Capture and Storage - CCS). Тръбопроводите имат изключително важна роля за доставянето на уловения CO_2 до далечни хранилища.

Текст

Специфични изисквания при транспорт на CO_2

Транспортът на CO_2 по тръбопроводи става все по-важна тема, тъй като проектите за улавяне и съхранение преминават от пилотни към демонстрационни фази. Въпреки че се очаква транспортирането на CO_2 да се възползва от натрупания опит при транспортирането на природен газ, трябва да бъдат преодолени и някои нови предизвикателства.

Основно предизвикателство пред инженерно-проектантската практика е свеждането до минимум на ограниченията, породени от състава на CO_2 върху тръбопроводите.

В идеалния случай тръбопроводът трябва да поддържа експлоатация при широк диапазон на параметрите на CO_2 потока, съобразен с изискванията за здраве, безопасност и околна среда.

Влияние на примесите върху проектирането и съхранението

Хидравличните и механичните конструкции на тръбопроводите са много чувствителни към нивото на примесите, съдържащи се в потока на CO_2 продукта.

През последните четири десетилетия съхранението на CO_2 се фокусира върху инжектирането на чист CO_2 в изчерпани газови и нефтени хранилища. Наличието на отпадъчни газове като CO, O_2, H_2, SOx и NOx може да бъде неподходящо за резервоара и е предмет на задълбочено проучване.

По-специално, примесите могат да:

- доведат до инжектиране на газ с ниска плътност или двуфазова смес от газ и течност в подземните пластове;
- значително да променят „екосистемата“ на резервоара;
- ограничат скоростта, с която CO_2 може да бъде инжектиран поради образуването на множество фази.

Влияние на примесите върху критичните свойства на CO_2 потока

Примесите в CO_2 потока изискват по-високо работно налягане спрямо чист CO_2 с цел поддържане на еднофазен свръхкритичен режим (таблица 1.

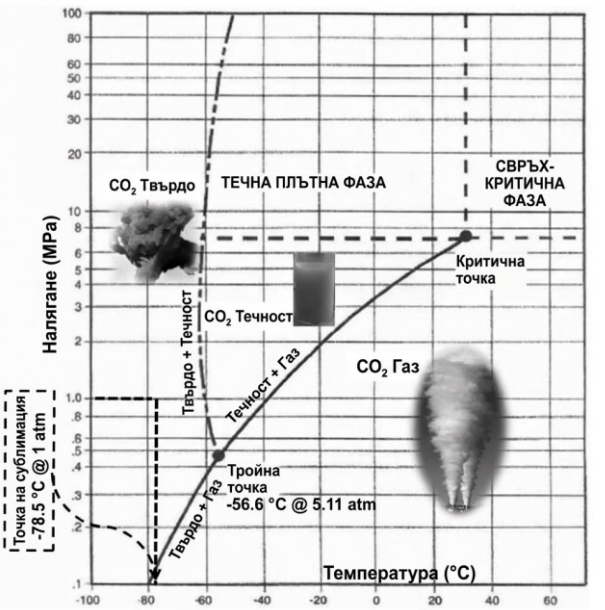
Таблица 1. *Влияние на примесите върху термодинамичните свойства и критичните параметри на CO2 потока*

Компо-нент	Въздей-ствие	Коментар
CH_4	Умерено	Метанът леко повишава свиваемостта на сместа. Въпреки това, определено количество метан в потока на CO_2 може да помогне за изгарянето на сместа при необходимост от изпускане.
C_{2+}	Минимално	Етанът и по-тежките въглеводороди обикновено не са проблем. Те леко намаляват критичната температура и налягане, но нямат съществено влияние върху свиваемостта.
H_2S	Много минимално	Поради изразената токсичност на сероводорода (H_2S), концентрацията му в CO_2 потока трябва да бъде строго ограничена. От термодинамична гледна точка обаче неговото въздействие върху критичните параметри и свиваемостта на сместа е минимално.
N_2	Умерено	Наличието на азот в CO_2 потока оказва измеримо въздействие върху критичните свойства на сместа, като обикновено води до повишаване на критичното налягане и понижаване на критичната температура.
H_2	Драстично	Водородът увеличава свиваемостта на CO_2 сместа и води до значително понижаване на критичната температура, както и до съществено повишаване на критичното налягане, което може да повлияе на капацитета на тръбопровода.

Физически параметри и транспортни режими на CO_2

За да разберем проблемите, свързани с транспортирането на CO_2, е необходимо да сме наясно с неговите физически параметри. Чистият въглероден двуокис е безцветен, без миризма и негоримо вещество, което може да се транспортира в твърдо, течно и газообразно състояние или в свръхкритично състояние (фиг.1).

Най-ефективното състояние за транспортиране по тръбопроводи е като течност или свръхкритична течност. В този „свръхкритичен“ режим флуидът има плътността на течност, но вискозитета на газ. За ефективен транспорт CO_2 трябва да бъде компресиран до налягане над критичното (Ркритично > 7.38 MPa).



Фиг. 1. Фази на CO_2

Основни свойства на чист CO_2 (таблица 2)

Условия:

• Газообразно състояние: 0°C и 101.325 kPa (стандартни условия)

• Течно състояние: приблизително 20°C и ~6 MPa

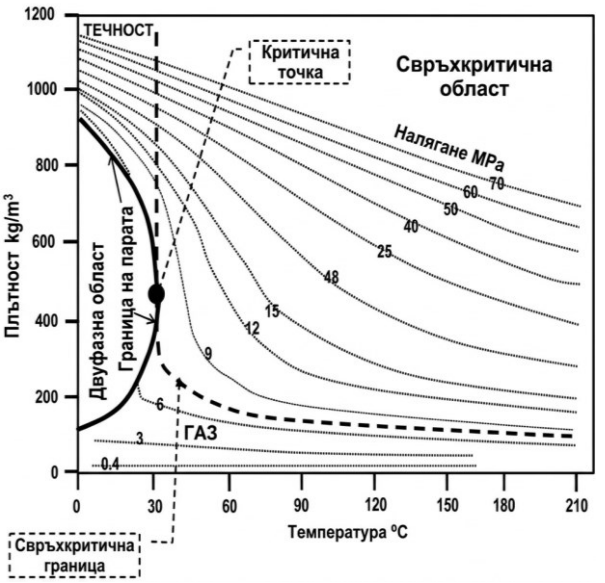
Таблица 2. *Основни термодинамични свойства и параметри на състоянието на CO_2*

Свойство	Обозна-чение	Газ (0°C, 1 atm)	Течност (~20°C, ~6 MPa)
Моларна маса	M	44.01 g/mol	44.01 g/mol
Плътност	ρ	1.98 kg/m³	770–900 kg/m³
Газова константа	R	188.9 J/(kg·K)	–
Коефициент на свиваемост	Z	≈ 1.0	< 1
Специфична топлина Cp	Cp	≈ 844 J/(kg·K)	≈ 2000 J/(kg·K) (прибл.)
Адиабатен показател	k	≈ 1.29	–
Динамичен вискозитет	μ	1.37×10^{-5} Pa·s	≈ 0.07 mPa·s
Обем спрямо газ	–	1	≈ 1/400 до 1/500
Критична температура	Tc	31.1°C	31.1°C
Критично налягане	Pc	7.38 MPa	7.38 MPa

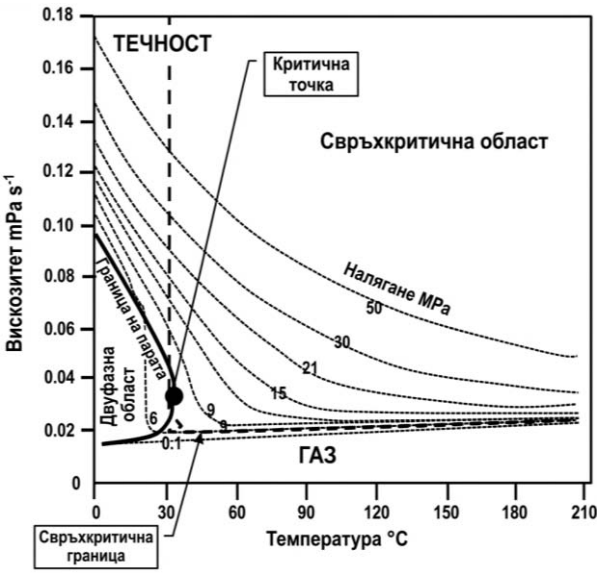
Въглеродният диоксид не съществува в течно състояние при налягане под 5.11 атмосфери. При

атмосферно налягане, твърдият CO_2 (сух лед) сублимира директно в газ над −78° C.

Фигурите по-долу (фиг. 2 и фиг. 3) показват плътността и вискозитета на CO_2 при променящи се налягания и температури.



Фиг. 2. Плътност на чист CO_2



Фиг. 3. Вискозитет на чист CO_2

Цели при проектирането на тръбопроводи за CO_2

Основната цел на проекта, свързан с успешното транспортиране на CO_2, е да изясни следните ключови показатели:

- Оптималният коридор за преминаване на тръбопровода, базиран на:
  - техническа възможност и удобство за изграждане;
  - опазване на околната среда;
  - разходи за изграждане;
  - геоложка характеристика на трасето.
- Обща концепция за конфигурация на тръбопроводната система:
  - диаметър и материал на тръбата;
  - основни технически параметри и якостно оразмеряване.
- Технологични схеми на основните съоръжения и инфраструктура.
- Данни за ситуационното разположение и регистър на препятствията.
- Хидравлични изчисления на предложените варианти.

Резултатите от тези предварителни проучвания са решаващи за вземането на правилни инвестиционни решения и формулирането на последващите фази за реализация.

Заключение

Транспортирането на CO_2 по тръбопроводи е ключов елемент в постигането на европейските цели за декарбонизация. Успехът зависи от задълбочено инженерно планиране, което отчита както уникалните физически свойства на CO_2 (особено във свръхкритичната фаза), така и критичното влияние на примесите върху безопасността, целостта и хидравликата на системата.

Литература

Георгиев, Л., Бояджиев, М. (12/2020). Принципи и подходи за хидравлично оразмеряване на събирателни тръбопроводи при многофазно движение на флуиди. *Минно дело и геология*, ISSN 2603-4549, стр. 44-47.

Георгиев, Л., Николова, Н. (2012). Съвременни методи и подходи за мониторинг на обектите за съхраняване на въглероден диоксид в земните недра.

Fayard, D., Bénézech, T. (2016). CO_2 pipeline design standards and operational practices. *Oil & Gas Science and Technology,* 71, 33.

Gopal, A. и Singh, P. (2018). The effect of pressure and temperature on the density and viscosity of CO_2 in pipeline transportation. *Journal of CO_2 Utilization,* 26, pp. 248–259.

Kjær, J. S. (2019). Phase equilibrium and stability of CO_2 mixtures: A review. *Fluid Phase Equilibria*, 477, pp. 1-13.

Rohde, S. и Eimer, T. (2020). CO_2 pipeline design: Challenges and solutions for operation and integrity management. *Energy Procedia*, 114, pp. 7181-7188.

Skovholt, K. (2018). Pipeline Transport of CO_2: A comparison with natural gas pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, pp. 110-120.

Tavakkoli, A., Hilliard, T. (2017). Effects of Impurities on the Phase Envelope and Critical Point of CO_2 Mixtures for Transportation and Storage. *Energy Procedia*, 114, pp. 2969–2975

White, D. (2021). The importance of CO_2 phase behaviour in pipeline design. *SPE Projects, Facilities & Construction*, 16(04), pp. 883-894.

Zhou, Z., Ghassemi, A. (2019). Modeling of CO_2 pipeline decompression and fracture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 80, pp. 19-30.

RESEARCH AND ANALYSIS OF EMERGENCY NATURAL GAS LEAK MODELS

Martin Boyadjiev, Stefan Vuchev, Lachezar Georgiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; martinb@mgu.bg; s.vuchev@mgu.bg; lachezar.georgiev@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents an in-depth analysis of technical loss of natural gas arising as a result of emergency situations in gas distribution networks. The focus is on the methodology for calculating the mass and volume flow rate in the event of a pipeline breach. The physical foundations of the leak are considered in different thermodynamic regimes: critical (sonic) and subcritical (subsonic). The article integrates regulatory requirements for the calculation of technological costs and practical examples for loss calculation. The results emphasise the importance of rapid localisation and the environmental consequences of methane emissions.

Key words: leaks, methane, loss, gas pipeline.

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА МОДЕЛИ ЗА АВАРИЙНО ИЗТИЧАНЕ НА ПРИРОДЕН ГАЗ

Мартин Бояджиев, Стефан Вучев, Лъчезар Георгиев
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ Настоящата работа представя задълбочен анализ на техническите загуби на природен газ, възникващи в резултат на аварийни ситуации в газоразпределителните мрежи. Основният фокус е върху методологията за изчисляване на масовия и обемния дебит при пробив на целостта на тръбопровода. Разгледани са физическите основи на изтичането при различни термодинамични режими – критичен (звуков) и подкритичен (дозвуков). В статията са интегрирани нормативни изисквания за разчет на технологичните разходи и практически примери за изчисляване на загубите. Резултатите подчертават значението на бързата локализация и екологичните последствия от метановите емисии.

Ключови думи: утечки, метан, загуби, газопровод.

Въведение

Газоразпределителните мрежи са гръбнакът на енергийната инфраструктура в урбанизираните територии. Осигуряването на тяхната безаварийна работа е комплексна задача, която включва проектиране, поддръжка и мониторинг. Въпреки съвременните технологии, авариите, причинени от външна намеса, корозия или дефекти в материалите, остават неизбежен фактор.

Аварийното изтичане на природен газ води не само до директни финансови загуби за оператора, но и до сериозни рискове за безопасността на населението и околната среда. Метанът, основната съставка на природния газ, е мощен парников газ с висок потенциал за глобално затопляне (GWP). Ето защо, прецизното остойностяване на техническите загуби е от съществено значение за енергийния баланс и екологичната отчетност на предприятията.

Класификация на загубите в газораз-пределителните мрежи

Съгласно утвърдената методология за разчет на технологичните разходи и техническите загуби на ПГ в разпределителните мрежи, загубите се класифицират по следния начин:

- **Технологични разходи:** Количества газ, необходими за поддържане на експлоатационната годност на мрежата. Те включват:
  - продухване на газопроводи при пуск и ремонт;
  - газ за работа на пневматично оборудване;
  - продухване на филтърни елементи в ГРП и ГИС.
- **Технически загуби:** Количества, които се изпускат в атмосферата поради нарушена херметичност. Те се делят на:
  - *загуби от неплътности:* постоянни, ниско-дебитни изтичания от фланци, уплътнения и резбови съединения.
  - *аварийни загуби:* внезапни и интензивни изтичания при разрушаване на стената на тръбопровода.

Общият обем на техническите загуби за определен период се определя като разлика между количеството постъпил газ в мрежата и количеството отчетен газ при потребителите, след корекция с технологичните разходи и температурните разлики

Теоретични основи на аварийното изтичане

Процесът на изтичане на газ през отвор в тръбопровод под налягане се подчинява на законите на газовата динамика. Определящ фактор е отношението между абсолютното налягане вътре в тръбопровода (P_1) и атмосферното налягане (P_2).

Режими на движение

За определяне на режима на изтичане се използва критичното отношение на наляганията (β_{cr}), което за природния газ (k = 1.31) се изчислява по формула (1) :

$$\beta_{cr} = [2/(K+1)]^{k/(k-1)} \approx 0{,}544 \qquad (1)$$

В зависимост от текущото налягане P_1, различаваме два режима таблица 1.

При газоразпределителни мрежи средно налягане (над 0.2 MPa абсолютно), изтичането почти винаги е в критичен режим в началния етап на аварията.

Таблица 1: *зависимост от текущото налягане P_1*

Режим на изтичане	Условие	Характеристики
Критичен (звуков)	$P_2 / P_1 \leq \beta_{cr}$	Скоростта на изтичане в сечението на отвора достига скоростта на звука. Дебитът зависи само от P_1.
Подкритичен (дозвуков)	$P_2 / P_1 > \beta_{cr}$	Скоростта е по-ниска от звуковата. Дебитът зависи от разликата в наляганията P_1 - P_2.

Методика за изчисляване на изтеклото количество

Общото количество газ ($V_{ав}$), загубено при авария, се формира от две части $V_{ав} = V_1 + V_2$, където:

- V_1**:** Обемът газ, изтекъл от момента на пробива до момента на пълното изолиране на участъка чрез спирателна арматура. $V_1 = Q_m \times \tau$, където Q_m е средният дебит, а τ е времето за локализация.

- V_2**:** Обемът газ, останал в изолирания участък на газопровода, който се изпразва през пробива до изравняване с атмосферното налягане.

Изчисление на дебита при критичен режим

Масовият дебит M в kg/s се определя чрез формула (2)

$$M = \mu * f * P_1 * \sqrt{[\left(\frac{K}{(R*T_1)}\right) * \left(\frac{2}{(K+1)}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}]} \quad (2)$$

където:
μ – коефициент на дебита (зависи от формата на отвора, обикновено 0.6 – 0.85);
f– площ на пробива в m^2;
R – газова константа за ПГ (≈ 518.3 J/kg.K);
T_1 – абсолютна температура на газа в K.

Практически пример и решения

Разглеждаме авариен пробив на стоманен газопровод със следните параметри (таблица 2):

– налягане в мрежата: $P_{раб}$ = 0.4 MPa (излишно); P_1 = 0.5013 MPa (абсолютно).

– диаметър на пробива: d = 25 mm.

– време за локализация: 30 минути (0.5 h).

Този пример илюстрира огромните загуби дори при малък по размер пробив. Само за половин час се губи обем газ, достатъчен за отоплението на няколко домакинства за цял сезон.

Таблица 1: *Разглеждане на авариен пробив*

Параметър	Формула	Резултат
Площ на пробива f	$\pi \times d^2 / 4$	4.91×10^{-4} m^2
Режим на изтичане	$P_2 / P_1 = 0.1013 / 0.5013$	0.202 (Критичен режим)
Обемен дебит Q	базиран на термодинамичния модел	~ 1250 m^3/h

Анализ на влияещите фактори

За целите на статията бе направен сравнителен анализ на факторите, определящи мащаба на техническите загуби:

1. **Работно налягане:** Дебитът при критичен режим е право пропорционален на налягането. Повишаването на налягането в ГРМ с цел по-голям капацитет автоматично увеличава риска от по-големи загуби при авария.
2. **Време за реакция:** Това е единственият фактор, който операторът може да контролира директно след възникване на събитието. Внедряването на системи за отдалечен мониторинг (SCADA) и автоматични спирателни кранове е ключово.
3. **Геометрия на отвора:** Реалните пробиви рядко са правилни кръгове. Използването на коефициента μ коригира изчисленията за реални условия (напр. пукнатини по дължина на шева).

Екологичен и икономически отпечатък

От екологична гледна точка изтичането на метан е многократно по-вредно от изгарянето му. При изтичане, всеки килограм метан има затоплящ ефект, равен на около 28-36 кг CO_2. Икономическите загуби включват не само стойността на неосъществената продажба на газа, но и разходите за аварийната група, ремонта на съоръженията и възможните екологични глоби.

Екологичен отпечатък и климатично въздействие

В контекста на съвременните климатични политики, аварийните изтичания на природен газ вече не се разглеждат само като икономическа загуба, но и като сериозен екологичен инцидент.

Глобално затопляне и потенциал на метана. Метанът (CH_4), който е основен компонент на природния газ (над 90%), има специфични термодинамични и химични свойства, които го правят изключително агресивен парников газ. Неговият потенциал за глобално затопляне (GWP — Global Warming Potential) е:

- *28-36 пъти по-висок от този на CO_2* за период от 100 години.

- *над 80 пъти по-висок* в краткосрочен план (20 години).

Това означава, че дори малки по обем аварийни изтичания имат непропорционално голям принос към въглеродния отпечатък на газоразпределителните дружества.

Новият Метанов регламент на ЕС. Съгласно приетия през 2024 г. Регламент на ЕС за намаляване на метановите емисии, операторите на ГРМ вече са задължени да прилагат строги протоколи за **LDAR (Leak Detection and Repair)**. Аварийните изтичания трябва не само да бъдат изчислявани, но и докладвани по стриктни нива (Source-level reporting), което прави методиката, описана в тази статия, още по-значима за практиката.

Съвременни методи и технологии за откриване на изтичания

Бързината на локализиране на аварията е основният фактор, който определя общия обем на техническите загуби. Съвременните технологии предлагат решения, които значително съкращават времето.

Дистанционни лазерни методи (LIDAR)

Тези системи използват лазерна спектроскопия за откриване на метан от разстояние.

- **Принцип:** Лазерният лъч се настройва на специфичната дължина на вълната, абсорбирана от метана.
- **Предимство:** Позволяват проверка на труднодостъпни места и надземни пресичания без нужда от директен достъп на екипа до зоната на изтичане.

Акустична емисия и сензори

При високо и средно налягане, изтичането на газ през пробив генерира характерен ултразвуков шум поради турбулентността на потока.

- **Технология:** Преносими или стационарни акустични детектори улавят тези честоти и могат точно да локализират мястото на пробива, дори ако газопроводът е вкопан под земята.

Използване на дронове (UAV) и мобилни лаборатории

Модерните оператори в България започват да внедряват мобилни системи, монтирани на автомобили или дронове:

- **Picarro/CRDS системи:** Изключително чувствителни анализатори, които могат да открият повишена концентрация на метан в частици на милиард (ppb) при движение със скорост от 50 км/ч.
- **Сателитен мониторинг:** Макар и все още скъп за ГРМ, той се превръща в стандарт за откриване на "супер-емитери" (масивни аварийни изтичания) по преносната мрежа.

Дискусия и икономическа обосновка

Инвестицията в тези технологии се оправдава чрез намаляване на стойността на изгубения газ и спестяване от екологични такси. Когато комбинираме физическия модел на изтичане (от раздел 3 и 4) с бърза детекция (раздел 8), можем да изчислим **ROI (възвращаемост на инвестицията)** за всяка внедрена система за мониторинг.

Заключение

Точното определяне на техническите загуби от аварийно изтичане е фундаментално за подобряване на енергийната ефективност на ГРМ. Представената методология и физическите модели осигуряват надежден инструмент за инженерите в сектора. Инвестициите в по-бързи системи за детекция и модернизация на остарелите участъци от мрежата са единственият път към намаляване на тези нежелани ефекти.

Литература

Сафонов, В. С. и др. (2005). *Теория и практика анализа рисков в газовой промышленности*. Москва: ВНИИГАЗ, 2005/5.

Методология за разчет на технологични разходи и технически загуби на ПГ в разпределителните мрежи.

Практическо приложение и решения на задачи по газоразпределителни системи - учебни материали на МГУ.

Регламент 1787 (ЕС) относно намаляването на емисиите на метан в енергийния сектор.

СТО Газпром 2-2.3-351-2009. *Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО „Газпром“*. Москва: ВНИИГАЗ, 2009.

AGA Operations Roundtables: Технически доклади за управление на риска и интегритет на тръбопроводите (Pipeline Integrity Management).

International Gas Union. *Global Gas Report*. London: IGU, 2023

IGU. *Mitigating Methane Emissions in the Natural Gas Sector*. Technical Report, 2021.

MARCOGAZ. *Technical Report on Methane Emissions: Assessment of Methane Emissions for the European Gas Midstream Sector*. Brussels: MARCOGAZ, 2019.

MARCOGAZ. *Survey on Methane Emissions: Gas Transmission and Distribution Systems*. Technical Note, 2022.

Methane Emissions Mitigation Strategies: AGA публикува насоки за минимизиране на аварийното изтичане чрез модернизация на инфраструктурата.

STUDY OF THE INFLUENCE ON THE COMBUSTION PROCESS OF HYDROGEN AND METHANE MIXTURES

Stefan Vuchev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: s.vuchev@mgu.bg

ABSTRACT. The report examines the impact on the combustion process of hydrogen-methane gas mixtures with increased hydrogen content. Hydrogen-methane co-firing is a key transition technology within the European Green Deal, aimed at decarbonising the energy sector and industry. By blending hydrogen with natural gas, carbon emissions are reduced while using the existing gas infrastructure. The report examines the combustion process of the gas mixture of methane and hydrogen in the ratio of 10-30% hydrogen content (H_2CNG) to methane, comparing it with the results of combustion of 100% methane. The main stoichiometric coefficients are taken into account, the values and parameters for calculation are determined, and the combustion products are compared at each concentration of the methane-hydrogen mixture, relative to 100% methane.

Key words: hydrogen, methane, Wobbe, burning, H_2CNG.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО ВЪРХУ ПРОЦЕСА НА ГОРЕНЕ НА СМЕСИ ОТ ВОДОРОД И МЕТАН (*H_2CNG)*

Стефан Вучев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ В доклада се разглежда влиянието върху процеса на горене на газови смеси от водород и метан с повишено съдържание на водород. Комбинираното изгаряне на водород и метан е ключова преходна технология в рамките на Европейската зелена сделка, насочена към декарбонизация на енергийния сектор и индустрията. Чрез смесването на водород с природен газ се постига намаляване на въглеродните емисии, като се използва съществуващата газова инфраструктура. Докладът разглежда процеса на изгаряне на газовата смес от метан и водород в отношение 10-30% съдържание на водород (H_2CNG) спрямо метана, като се прави съпоставка с резултатите от изгаряне на 100% метан. Отчитат се основните стехиометрични коефициенти, определят се стойностите и параметрите при изчисление, прави се съпоставка на продуктите на горенето при всяка концентрация на метано-водородната смес, спрямо 100% метан.

Ключови думи: водород, метан, горене, Воббе, H_2CNG.

Въведение

Постигането на целите на ЕС, заложени в „Зелената сделка“ за преминаване към въглеродна неутралност през 2050 г. и редуциране на въглеродните емисии към 2030 г., предвиждат внедряване на водорода като екологично чисто гориво и развиване на водородните технологии. Преходът към горива с ниско съдържание на въглерод ще се осъществява поетапно и планово като в първата си фаза се предвижда природният газ да продължи да бъде използван като гориво, но в газова смес с водород в отношение 10-30% съдържание на водород спрямо метана. Изгарянето на газо-водородната смес ще намали съдържанието на въглерод в продуктите на горенето, изхвърлени при процеса, но същевременно с увеличаването на водородните фракции в метана ще се променят химичните и енергийни характеристики на смесите. Изследването разглежда, сравнява и анализира резултатите при изгаряне 100% метан с тези на комбинирана 10-30% водород към метан газова смес и проследява промените на основните характеристики и показатели, влияещи върху процеса на горене. В изследването се разглежда оптимизацията на процеса на изгаряне на метана при обогатяването му с водород, промените в скоростта на протичане на процеса с увеличаване на водородното съдържание, промените в стойностите на индекса на Воббе, редукцията на азотните и въглеродни емисии и промените във височината на пламъка.

Горенето-пиролизата е контролируем окислителен процес, при който се отделя светлина и топлина. Екзотермичните реакции от този тип са процеси, които протичат с различни скорости и достигат различни топлинни стойности при промяна на процентното съдържание на обемните частици на участващите в процеса елементи. С добавянето на водород като трети участник в процеса на окисление на метана, ще се наруши стехиометричния баланс на реакцията, което ще повлияе значително върху характеристиките на протичането на процеса на горене. Това се дължи на физико-химичните свойства на водорода, чиято молекула е значително по-лека от тази на метана, но притежава по-висока висока стойност на топлина на изгаряне около 2,4 пъти спрямо метана. Средната специфичната топлина на метана е 50MJ/kg, докато на водорода е около 130лMJ/kg при стандартни условия. По този начин при запазване на тегловото съотношение на окислената газовата смес, но с промяна в процентното съотношение на водорода към метана се постига по-висока топлина на изгаряне, което осезаемо променя енталапията (топлинния ефект) в термодинамичната система. Окислението на водорода (1), обаче протича със значително по-висока скорост на горене – 346 см/s спрямо ламинарното горене на метана при 40 см/s (2), с което неизбежно се увеличава скоростта на самия процес на изгаряне на метано-водородната смес.

$$2H_2(g) + O_2(g) = 2H_2O(l) \quad (1)$$

$$CH_4(g) + 2O_2(g) = CO_2(g) + 2H_2O(l) \quad (2)$$

Вследствие на по-високата скорост и по-високите температури се постига ускоряване и оптимизация на процеса на горене. Увеличаването на топлинните стойности способства за по-пълно изгаряне на участващите в горенето елементи, както и за намаляване на стойностите на образуваните въглеродни групи в изходните продукти от екзотермичната реакция.

Характеристика на газовата смес, фактори оказващи влияние на процеса на горене

Важно за описанието на процеса на изгаряне на газовата смес на метана и водорода е да се определи необходимото количество въздух за окисляване на газовата смес (O_{st}) за постигане на пълното изгаряне на участниците в процеса. За изгарянето на 1 kg CH_4 са необходими 17,16 kg въздух , докато за изгарянето на 1 kg H_2 са необходими 34,32 kg въздух (Байкалов и Раденков, 2024). За да бъдат обективни данните в изследването, „въздухът“, необходим за изгаряне, се разглежда като реална газова смес, която освен кислород (20,95%) и азот (78,08%), съдържа и други съединения в малки количества. Стойностите на кислорода и азота са приети съответно 21% и 79%. При тези изходни стойности моларното съотношение между двете съединения (O_2 и N_2) се счита за 3,76 в горната зависимост. Така стехиометрията на изгаряне на въглеводороди с окислител кислород се описва по следния начин (3), в която се стига до заключението, че за изгарянето на всеки мол гориво са необходими (n+m/4)(1+3,76) мола въздух и води до 4,76(n+m/4)+m/4 мола продукти на реакцията:

$$C_nH_n\left(n+\frac{m}{4}\right)(O_2+3{,}76N_2)\rightarrow \\ \rightarrow nCO_2+\frac{m}{2}H_2O+\left(n+3{,}76\frac{m}{2}\right)N_2 \quad (3)$$

Вземайки предвид горната изведена стойност на съотношението на въздушната маса, уравнението (2) ще добие следния вид:

$$CH_4+2(O_2+3{,}76N_2)=CO_2+2H_2O+2(3{,}76N_2) \quad (4)$$

За изгаряне на водорода (1), вземайки предвид стойностите на моларното съотношение на въздушната смес, се получава:

$$2H_2+2(O_2+3{,}76N_2)=2H_2O+2N_2 \quad (5)$$

Зависимостта в количествата въздух, необходими за пълното изгаряне на общата блендирана смес, се определя от коефициента на стехиометрично количество въздух (l_{st}), и коефициента на излишък на въздух (α), които са променливи величини и са зависими от разликата в съдържанието на водород в газовата смес.

Концентрацията на метан и водород е в 0-30% процентно съотношение на водорода към метана. В изследването се разглеждат три варианта на концентрация на водород в сместа: 10%, 20%, 30%, както и четвърти вариант с изгаряне на 100% природен газ. Това е необходимо с цел правилното и реално проследяване на стехиометрията на процеса, вземайки предвид различните стойности на стехиометричните показатели и коефициенти за всяка концентрация на газовата смес. За да се избегне недостиг на окислител е необходимо да се определи необходимото количество въздух за окисляване на газовата смес (l_{st}), и съответно коефициентът на излишък на въздух (α), за да се избегне пренасищане и нарушаване на процеса. За определяне на стехиометричното съотношение на нужния за пълното окисление на газо-водородната смес въздух (L_{min}), се използва разликата в стойностите на тегловите отношения на моларната маса на кислорода във въздуха, метана и водорода. При CH_4 тя е 16,043 g/mol, за H_2 2,016 g/mol, молекулата на кислорода е два пъти по-голяма от тази на метана и с около 20% по-голяма от тази на водорода, но в същото време е 16 пъти по-тежка от водородната. При определяне на моларните съотношения приемаме следните стойности:

$$\mathrm{M}(CH_4)\approx 16g/mol$$
$$\mathrm{M}(H_2)\approx 2g/mol$$
$$\mathrm{M}(O_2)\approx 32g/mol$$

По този начин се определя, че за изгарянето на един 1Mol CH_4 са необходими 2mol O_2. В масово съотношение за 16 g CH_4 ще са необходими 64 g O_2. Вземайки предвид процентното отношение от максимално 21% O_2 в състава на общата въздушна смес, $L_{\min(CH4)}$ за метана се определя с израза:

$$L_{\min(CH4)}=\left(\frac{m_a}{m_{f(CH4)}}\right)=\frac{2*(32\frac{79}{21}*28)}{2{,}016}\approx 17{,}1kg \quad (6)$$

В уравнение (7) по същата методика се определя необходимото количество въздух за пълното изгаряне на 1 kg H_2. Важно е да се вземе предвид , че за изгарянето на един mol H_2 е необходимо 0,5 mol O_2. В този случай уравнението ще има следния вид:

$$L_{\min(H2)}=\left(\frac{m_a}{m_{f(H2)}}\right)=\frac{0{,}5*(32\frac{79}{21}*28)}{2{,}016}\approx 34{,}3kg \quad (7)$$

Определяне на стехиометричното количество въздух за изгаряне спрямо обемните концентрации на H_2 и CH_4 в газо-водородната смес.

За определяне на необходимото количество въздух за пълно изгаряне на метана и на водорода поотделно, се прилага формула 8, като стехиометричните уравнения се умножават по моларните фракции в сместа (x). За да се определи нужното стехиометрично количество въздух L_{st}, за всяка една разглеждана концентрация на газовата смес, се взема предвид и моларната маса на въздуха M_{air} 4,76 mol (1mol O_2 + 3.76mol N_2).

$$L_{st}=(2-1{,}5x)*4{,}76 \quad (8)$$

Чрез уравнения (9), (10), (11), са пресметнати стойностите на L_{st}, съответно за всяка различна концентрация на метана и водорода X в последователност 10%, 20% и 30% водород към метан.

$$L_{st}=(2-1{,}5*0{,}1)*4{,}76=8{,}806m3 \quad (9)$$
$$L_{st}=(2-1{,}5*0{,}2)*4{,}76=8{,}092m3 \quad (10)$$
$$L_{st}=(2-1{,}5*0{,}3)*4{,}76=7{,}378m3 \quad (11)$$

Използвайки гореизложената методика и получените теглови данни, се пресмятат данните за необходимите стехиометрични количества въздух L_{st} на въздушната маса за изгарянето на 1 m^3 от комбинираната газо-водородна смес.

Определяне на масовото съотношение Air-Fuel Ratio (AFR) mass) на газовата смес

За правилното описание на процеса на изгаряне на газо-водородната смес е необходимо да бъде отчетен фактът, че водородът е значително-по-лек от метана, поради което обемното съотношение въздух-гориво значително се отличава от масовото съотношение въздух-гориво AFR_{mass}. Масовото количество въздух се определя по формула (12) и описва съотношението L_{st} към M_{air} и M_{fuel}.

$$AFR_{\text{mass}} = \frac{L_{st} * m_{air}}{m_{fuel}} \quad (12)$$

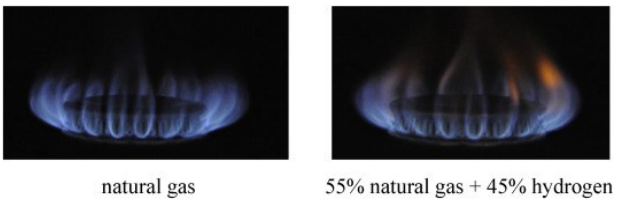
След заместване на резултатите от горните изчисления в формула (12), се получават показаните в таблица 1 резултати.

Таблица 1. *Сравнение на изчислените стойности*

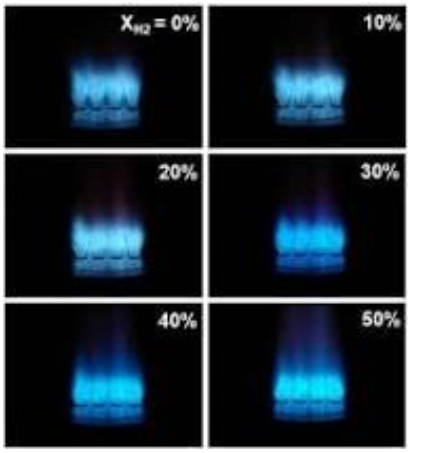
Концентрация CH4 / H2	Моларна част H_2	Въздух L_{st} m^3	AFR_{mass} kg/mol
100 / 0	0	00000	17,01
90 / 10	0.1	8,81	17,43
80 / 20	0.2	8,09	17,71
70 /30	0.3	7,38	18,07

Промени в поведението на пламъка

Изложените резултати в таблица 1 показват, че с увеличаване на водородното съдържание в газовата смес процесът на изгаране на газо-водордната смес се нуждае от повече въздух за горене (AFR_{mass}) в теглово отношение. Това обстоятелство повлиява върху стехиометрията на окислението на H_2CNG газовете, като променя поведението на пламъка, топлинните стойности, калоричността на газовата смес LHV_{mix} и въглеродните емисии в продуктите на изгарянето. Поведението на пламъка при увеличение на водородното съдържание е показано на фигура 1 и фигура 2.

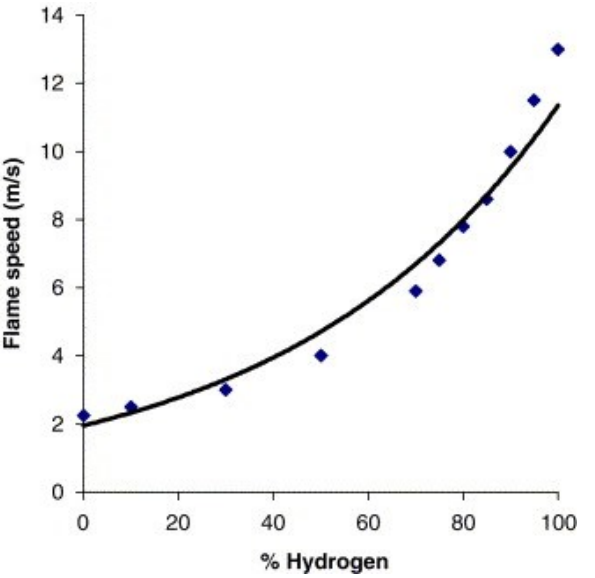


Фиг. 1. Изгаряне на 100% CH4 и H_2CNG смес 45%/55%



Фиг. 2. Изгаряне на 100% CH4 и H_2CNG смес 0-50%

Наблюдаваната промяна в пламъка се характеризира с неговото нарастване във височина, което се дължи на по-високата скорост на протичане на общия процес на горене като следствие от по-високата скорост на изгаряне на водорода. Примерите на фигури 1 и 2 са с по-високи концентрации (до 50%) от разглежданите в доклада (0-30%), което показва, че при увеличаване на концентрацията на водород в газовата смес с над 50%, скоростта на пламъка започва да расте експоненциално, докато при смеси до 30% промяната е управляема и контролируема, което няма да окаже чувствително влияние върху работата на газовите уреди, като в същото време се постига редукция на CO_2 емисиите. Паралелно със скоростта на пламъка се променят и топлинните показатели LHV_{mix} на общата газо-водородна смес. На графика 1 е показана графично промяната на поведението на пламъка с увеличение на концентрацията на водород в газовата смес.



Графика 1. Нарастване на скоростта на ламинарното горене S_l с увеличаване на концентрацията на H_2

Скоростта на ламинарното горене при стехиометрична смес с коефициент на излишък на въздух (*α=1*) се променя паралелно с температурата на горене на разглежданата газовата смес. В таблица 2 са изчислени температурните стойности на пламъка при (*α=1*) и концентрация на водород 0-30% в газовата смес. При изчисленията за по-висока

точност е отчетено обстоятелството, че част от отделената топлина се изразходва за затопляне на продуктите на горенето (*CO_2, H_2O, и N_2*). За начални температурни условия се приема T=20°C и налягане 1atm.

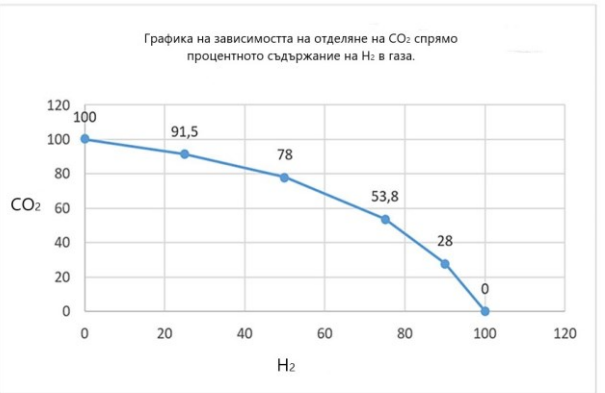
Таблица 2. *Сравнение на изчислените стойности*

Концентрация CH4 / H2	Температура на горене °C	Температур-на разлика спрямо CH4	Скорост на пламъка *S_l sm/s*
100 / 0	1950°C	-	37-38
90 / 10	1962°C	+12°C	40-41
80 / 20	1975°C	+25°C	44-46
70 /30	1990°C	+40°C	50-55

Данните, представени в таблица 2 показват, че скоростта на ламинарното горене и увеличената температура увеличават височината на пламъка вследствие на увеличаване на налягането и по-силното загряване на продуктите на горенето. Изгарянето на водорода в газодинамичната смес влияе положително върху отделянето на въглеродните емисии, но с увеличаване на съдържанието на водорода в общия обем на газовата смес се наблюдава спад в калоричността на общата газова смес LHV_{mix}.

Продукти на горенето на H_2CNG, нива на CO_2 и NO_x

На графика 2 е показана редукцията на въглеродните емисии при увеличаване на водородното съдържание в общия обем на изгорената газова смес.



Графика 2. Стойности на отделени CO2

LHV – Долна топлина на изгаряне и продукти на горенето

LHV_{mix} на газовата смес при *α=1*, се изчислява по формула (13) при стойности LHV_{H2} = 10,78 MJ/m³ и LHV_{CH4}=35,8 MJ/m³. Изчислените резултати са съпоставени в таблица 3, където може да се проследи намаляването на калоричността при изгаряне на разглежданите 0-30% газо-водородни смеси и намаляването на стойностите на CO_2.

$$LHV_{mix} = x * 10{,}78 + (1 - x) * 35{,}8 \quad (13)$$

Таблица 3. *Сравнение на изчислените стойности*

Концентрация CH4 / H2	LHV_{mix} (MJ/m³)	Увеличаване на NO_x (%)	CO_2 (kg/m³)
100 / 0	35,5	-	1,96
90 / 10	33,30	+5-10%	1,76
80 / 20	30,80	+15-25%	1,57
70 /30	28.29	+35-50%	1,37

Изводи

Данните от таблици (2) и (3) показват, че с увеличаване на водорода в газовата смес се променя стехиометрията на процеса във всяко отношение. Влиянието на изгарянето на водород върху образуваните емисии от азотни оксиди се увеличава рязко при концентрации над 30% в газовата смес, въпреки ниската температурна разлика спрямо смесите с 20% водородно съдържание. Това се дължи на необходимостта от по-голям дебит въздух за запазване на калоричността на горенето (таблица 1). Благодарение на постигането на по-високи температури на горене и увеличаване на скоростта на процеса, се постига оптимизация на общия процес на изгарянето, като същевременно процесът остава контролируем при концентрации около 20-30% водородно съдържание, което прави газоводородните смеси адаптивни към изискванията за нормална функционалност на газовите уреди. За газовите горелки с по-висок дебит и мощност тип А, по-високата скорост на процеса ще повлияе положително горенето, като позволява безаварийна работа и при променливи стойности на *α,* запазва стабилността на пламъка и не позволява неговото „откъсване“, дори и при работа с „по-бедни“ газови смеси. Нивата на калоричност са допустими, като смеси в 20% не биха оказали съществено влияние върху функционалността на газовите уреди и се постига значително намаляване на изхвърлянето на емисии въглерод.

Литература:

Байкалов, Н., Раденков, В. (2024). Оценка на възможността за използване на водород в производствения процес на котли ПК-38-4 в ТЕЦ „МАРИЦА ИЗТОК 2“ ЕАД., Енергиен форум. 25.06-28.06 2024 Сборник доклади. София 2024. ISSN 2367-6728.

Георгиев, Л., Лаков, Н. (2011). Анализ на възможностите за производство на електрическа енергия от различни енергийни източници, Девета научно-практическа сесия, София 02-03 май 2011 г., стр.135-141, ISSN 1314-8931

Николов, Г. (2007). *Разпределение и използване на природен газ*, Юкономикс, София.

Boyadjiev, M. (2020). *Analysis of the hydrogen concentration on networks for gas supply*, Sofia, 2020 ISBN 2682-952.

Ilbas, M., Crayford, A.P., Yilmaz, I., Bowen, P.J., Syred, N. (2006). Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane air mixtures: an experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.007

Karadjov, M. (2021). Problems, opportunities and solutions for the gas supply of households in Bulgaria. *Min. and Geo. Sci. 2.*

Karadjov, M. (2022). Design, construction, maintenance and service of domestic hybrid systems using natural gas. *Mining and Geology 9*.

Menon, E. Shashi. Gas pipeline hydraulics / E. Shashi Menon. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 0-8493-2785-7 1. Natural gas pipeline--Design and construction. 2. Pipe--Hydrodynamics. I. Title. TN880.5.M455 2005 665.7'44--dc22

БДС EN 1555-1:2010 Пластмасови тръбопроводни системи за газоснабдяване. Полиетилен (PE). Част 1: Общи положения.

БДС EN 1555-2:2010 Пластмасови тръбопроводни системи за газоснабдяване. Полиетилен (PE). Част 2: Тръби.

Закон за техническите изисквания към продуктите (Обн. ДВ, бр. 86 от 1.10.1999 г., посл. доп., бр. 105 от 11.12.2020 г., в сила от 1.01.2021 г.)

Наредба № 6 от 25.11.2004 г. за технически правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите и съоръженията за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ (Обн. ДВ, бр. 107 от 7.12.2004 г., в сила от 7.12.2004 г.; изм. и доп., бр. 1 от 3.01.2012 г., бр. 30 от 1.04.2014 г.).

EXPERIMENTAL DETERMINATION AND INVESTIGATION OF THE POWER NUMBER K_N OF A NEW SERIES OF ENERGY-EFFICIENT MECHANICAL AGITATORS FOR BIOTECHNOLOGICAL APPLICATIONS

Svetlozar Grozdanov, Evgeni Kraychev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: evgeni.kraychev@mgu.bg

Abstract: This article presents the experimental determination and investigation of the power number K_N of a new series of energy-efficient mechanical agitators intended for applications in biotechnological processes. The experimental studies were carried out under laboratory conditions using model fluids representative of biotechnological media, over a wide range of Reynolds numbers covering turbulent flow regime. Based on the measured power consumption, correlations of the power number K_N with the hydrodynamic parameters of the process were established. The results were compared with data for conventional impeller types and they demonstrate lower values of K_N under comparable operating conditions, confirming the energy-saving character of the developed agitator series. The obtained correlations are applicable to the optimisation, design, and scale-up of mechanically agitated vessels in biotechnological practice.

Keywords: power number K_N, energy-efficient mechanical agitators, biotechnological processes, experimental investigation, power characteristics.

ОПИТНО ОПРЕДЕЛЯНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА МОЩНОСТТА K_N НА НОВ ТИП СЕРИЯ ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ МЕХАНИЧНИ БЪРКАЧКИ С ПРИЛОЖЕНИЕ В БИОТЕХНОЛОГИИТЕ

Светлозар Грозданов, Евгени Крайчев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

Резюме: В статията е представено опитно определяне и изследване на коефициента на мощността K_N на нов тип серия енергоспестяващи механични бъркачки, предназначени за приложение в биотехнологичните производства. Експерименталните изследвания са проведени в лабораторни условия с използване на моделни флуиди, характерни за биотехнологични процеси, в широк диапазон от числа на Рейнолдс, обхващащ турбулентен режим на течение. На база на измерената консумирана мощност са получени зависимости на коефициента K_N от хидродинамичните параметри на процеса. Резултатите са сравнени с данни за класически типове бъркачки и показват по-ниски стойности на K_N при аналогични условия, което потвърждава енергоспестяващия характер на разработената серия. Получените зависимости са приложими при оптимизацията, проектирането и мащабирането на разбъркващи апарати в биотехнологичната практика.

Ключови думи: коефициент на мощността K_N, енергоспестяващи механични бъркачки, биотехнологични производства, експериментално изследване, мощностни характеристики.

Introduction

Mechanical agitation is one of the key unit operations in biotechnological production, finding widespread application in bioreactors for the cultivation of microorganisms, cell cultures, and enzymatic systems (Nienow, 1996; Doran, 2013). The efficiency of mass and heat transfer processes, gas-phase dispersion, and homogenisation of the reaction medium largely depends on the design and energetic characteristics of the mechanical impellers employed (Paul et al., 2004). At the same time, increasing demands for energy efficiency and sustainable development necessitate the development and implementation of new types of mixing devices with reduced specific energy consumption (Paul et al., 2004).

One of the principal dimensionless criteria used for the quantitative evaluation of the energetic performance of mechanical agitators is the power number, K_N (Nagata, 1975). This parameter characterises the relationship between power consumption, impeller geometry, and the hydrodynamic flow regime, as defined by the Reynolds number. The analysis of the dependence $K_N= f(Re)$ enables the comparison among different impeller types and provides an assessment of their efficiency under various operating conditions (Rushton et al., 1950).

Despite the widespread use of classical impeller designs - such as paddle, turbine, and propeller types - their power characteristics often fail to meet contemporary requirements for energy optimisation, particularly when operating in viscous biotechnological media and during process scale-up (Metzner et al. 1957). This necessitates the development of new series of energy-efficient mechanical agitators in which targeted design solutions enable a more effective distribution of energy throughout the vessel volume (Nienow, 1996; Paul et al., 2004).

The present article is aimed at the experimental determination and investigation of the power number K_N for a newly developed series of energy-saving mechanical agitators intended for application in biotechnological processes. Through systematic experimental investigations over a wide range of hydrodynamic regimes, reliable power correlations are obtained and the energetic potential of the developed designs is evaluated. The results provide a basis for the optimisation of mixing processes, as well as for their accurate design and scale-up in biotechnological industrial practice (Nagata, 1975; Doran, 2013).

Investigated Mixing Devices and Working Media

The energy characteristic $K_N=f(Re_b)$ constitutes the fundamental basis for the evaluation of any newly designed mechanical agitator. For the experimental determination of the power number K_N, studies were carried out during agitation of two types of liquid systems typical of biotechnological processes:

- single-phase system – water;
- two-phase system – water–vegetable oil emulsion.

The investigations were performed using newly developed series of modified energy-saving mechanical agitators, as follows:

- Modified Narcissus – MN - 6.1
- Impeller – IM - 6.1
- Modified Propeller – MP - 3.1
- “Clover” Propeller – PD – 4.1

The investigated designs represent a new series of energy-efficient mechanical agitators developed to enhance the hydrodynamic efficiency of the process and to reduce specific energy consumption during dispersion, emulsification, and homogenisation of liquid systems characteristic of biotechnological production (Kraychev et al., 2003). The newly designed impeller series is presented in Figures 1–4.

Fig.1. Modified Narcissus – MN - 6.1

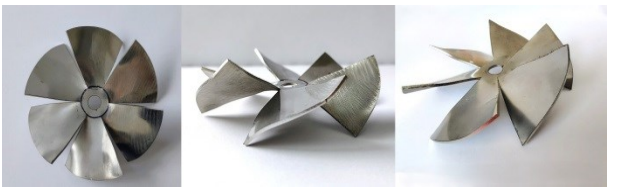


Fig.2. Impeller – IM - 6.1

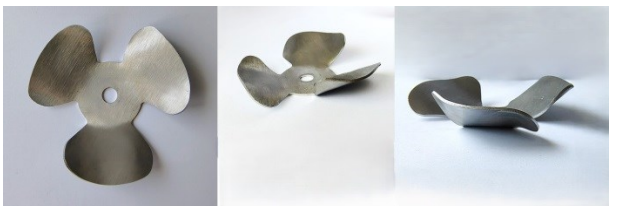


Fig.3. Modified Propeller – MP - 3.1

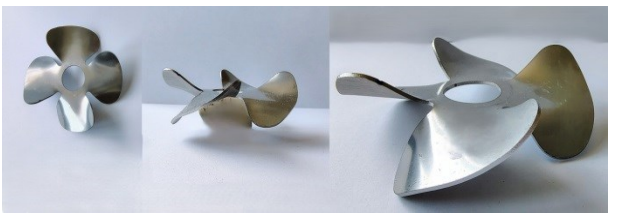


Fig.4. “Clover” Propeller – PD - 4.1

The constructive modification of the working elements is aimed at optimising the flow structure within the vessel, limiting turbulent energy loss, and improving momentum transfer throughout the working volume.

All mixing devices were manufactured of stainless steel type AISI 304, ensuring:

- high corrosion resistance;
- chemical inertness with respect to the investigated media;
- compliance with the hygiene requirements for biotechnological applications;
- good mechanical strength at relatively small material thickness.

The main geometric parameters of the impellers are:

- impeller diameter: d = 0.09 m;
- blade thickness: δ = 0.5 mm.

The selected diameter is consistent with the working volume of the vessel (V_R=14.3 dm³) and provides an appropriate impeller to vessel diameter ratio, necessary for the accurate determination of the power number K_N and for a comparable assessment of the energy efficiency among the individual designs.

Physico-Chemical Properties of the Working Media

The experimental investigations were conducted at a temperature of T = 20°C. The dynamic viscosity of water was μ = 0.001 Pa·s. The liquid media used and their densities were ρ water = 998 kg/m³

Two dispersed-phase concentrations (vegetable oil) were investigated:

- 20% vegetable oil + 80% water - ρ 20% = 984 kg/m³
- 40% vegetable oil + 60% water - ρ 40% = 968 kg/m³

The dynamic viscosity μ for the dispersed phase concentration at 20% was 0.002 Pa·s, while at 40% it was 0.005 Pa·s. The working liquid volume in the experimental vessel was V = 12 L (0.012 m³).

Geometric Ratio d/D and Its Influence on the Power Number

One of the principal dimensionless geometric parameters governing mixing hydrodynamics is the ratio between the impeller diameter d and the internal vessel diameter D: d/D

This ratio significantly influences:

- the formation of circulation flow patterns within the working volume;
- the intensity of turbulence;
- the magnitude of power consumption;
- the value of the power number K_N.

In the present study, the impeller diameter was d = 0.09 m. The ratio d/D was selected to ensure:

- effective bulk mixing without the formation of a stable central vortex;
- minimisation of dead zones within the reaction volume;
- correct comparison among different impeller types under identical geometric conditions.

Maintaining a constant *d/D* ratio for all investigated designs guarantees that the observed variations in the power number K_N are attributable solely to the constructive characteristics of the impeller and not to geometric differences in the system (Stephan et al., 2019).

Determination of the Power Number

The power number K_N is the principal dimensionless criterion characterising the energy efficiency of the mixing device and is determined by:

$$K_N = \frac{P}{\rho \, . \, n^3 \, . D^5} \qquad (1)$$

where:

P is the power (W)

ρ - fluid density (kg/m³)

n - rotational speed (min⁻¹)

D - impeller diameter (m)

To analyse the hydrodynamic operating regime, the Reynolds number was used:

$$Re = \frac{n \cdot \rho \cdot D^2}{\mu} \quad (2)$$

where:

n is rotational speed (min $^{-1}$)

ρ - fluid density (kg/m³)

D - impeller diameter (m)

μ - dynamic viscosity (Pa.s)

This criterion enables identification of laminar, transitional, or turbulent flow regimes and examination of the relationship *KN=f(Re)* (Kraychev et al., 2004). Such an approach is particularly important in biotechnological processes, where an optimal balance is required between:

- energy efficiency;
- mechanically gentle action on biological systems;
- effective mass and heat transfer.

Experimental Setup

The experimental investigations were carried out in a laboratory semi-industrial reactor (10) with a nominal working volume V_R=14.3 dm³ and made of transparent PMMA (Plexiglas). Inside the vessel, four vertical baffles (4) were mounted at 90° intervals along the periphery to prevent vortex formation and uncontrolled swirling of the liquid.

A horizontally wound copper coil (3) with a total length L = 7.94 m was installed along the internal wall of the reactor. Its function was to serve as a heat-transfer surface through which a heat carrier flows to maintain the set temperature conditions within the reaction volume.

Fig. 5. Laboratory reactor in operating mode

At the bottom of the reactor, a sparger (11) was installed, consisting of a porous element for inert gas introduction. The mixing mechanism was driven by a stainless steel shaft (2), to which the mechanical agitator (9) was attached, coupled to a DC electric motor (1) allowing stable operation at different rotational regimes (Fig. 5) (Kraychev, 2023).

The rotational speed of the main shaft was regulated by an autotransformer and monitored via potentiometers with voltmeter and ammeter readings using calibration curves. The rotational speed was measured by an infrared non-contact tachometer (7) and recorded by a data acquisition unit (8).

Sensitive manometric thermometers (5) were mounted at the inlet and outlet of the system, and a digital flow meter (6) recorded the flow rate in real time. A photo and a diagram of the experimental installation are shown in Fig. 6 and 7.

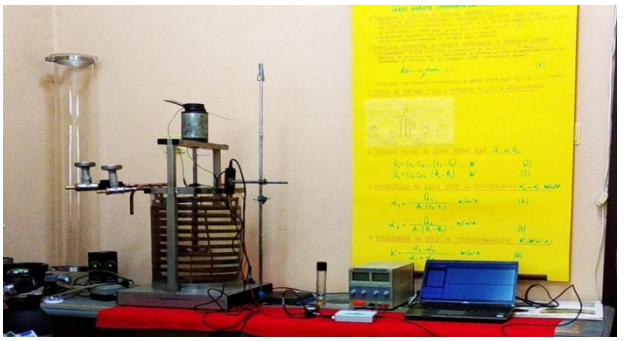


Fig. 6. Photograph of the experimental installation

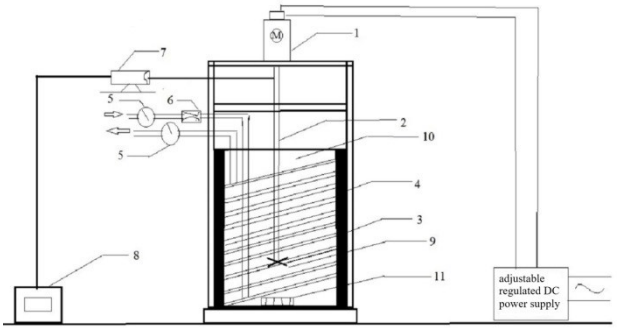


Fig. 7. Diagram of the experimental installation:
1 – DC electric motor; 2 – stainless steel shaft; 3 – copper coil; 4 – baffles (4 pcs.); 5 –manometric thermometers; 6 – digital flow meter; 7 – infrared tachometer; 8 – recording unit; 9 – mechanical agitator; 10 – PMMA (Plexiglas) reactor; 11 – sparger

Experimental Procedure and Presentation of Results

Initially, the “self-consumed” idle power was measured at rotational speeds n = 200÷1000 min⁻¹, without the impeller being immersed in liquid. This allowed determination of the “net” mixing power for water and water–vegetable oil systems for the four impeller types.

The net power was calculated as:

$P=P_1-P_2$ *(W),*

where P_1 is the gross power and P_2 is the idle power.

It was observed that the power curves of the newly developed devices are less steep, indicating lower electrical energy consumption.

To intensify heat and mass transfer, hot water could be circulated through the copper coil at different inlet and outlet temperatures when necessary. By plotting the relationship *P* =

f(n), the power number K_N was determined according to Equation (1) (Strenk, 1975).

Table 1 compares the gross and net mixing power for water and water–vegetable oil systems for the four impeller series (Kraychev, 2000). The rotational speed varied from 200 to 1000 min⁻¹. The second column presents idle power, while the remaining columns show results for the four impeller series with two liquid systems.

Table 1. *Comparison of gross and net mixing power for two types of liquid system and four impeller series.*

	Agitation power-gross							
	Modified Narcissus - MN - 6.1				Impeller IM - 6.1			
Rotations (n)	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%
min^{-1}	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)
200	0.64	0.87	0.90	1.05	0.56	1.06	0.88	1.02
400	1.11	2.98	3.04	3.20	1.04	3.69	3.63	3.80
600	1.50	8.29	8.06	8.28	1.37	10.43	10.35	10.52
800	2.04	18.23	17.36	17.52	1.90	24.04	23.50	23.71
1000	2.69	35.19	32.76	33.10	2.72	49.66	48.65	48.86
	Agitation power-net							
Rotations (n)	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%
min^{-1}	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)
200	0.64	0.23	0.27	0.41	0.56	0.50	0.32	0.46
400	1.11	1.87	1.93	2.09	1.04	2.65	2.59	2.76
600	1.50	6.80	6.57	6.79	1.37	9.06	8.98	9.15
800	2.04	16.18	15.31	15.48	1.90	22.14	21.61	21.81
1000	2.69	32.51	30.08	30.42	2.72	46.95	45.94	46.15
	Agitation power-gross							
	Modified Propeller - MP - 3.1				“Clover” Propeller – PD – 4.1			
Rotations (n)	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%
min^{-1}	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)
200	0.59	0.66	0.74	0.85	0.66	0.78	0.85	0.95
400	1.05	2.06	2.11	2.20	1.11	3.07	3.33	3.50
600	1.61	4.66	4.98	5.20	1.67	9.01	9.20	9.35
800	2.10	9.41	9.98	10.15	2.31	19.90	20.90	21.21
1000	2.75	18.26	18.56	18.75	2.79	38.10	40.35	42.40
	Agitation power-net							
Rotations (n)	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%	Power (idle)	Water	Emulsion-20%/80%	Emulsion-40%/60%
min^{-1}	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)
200	0.59	0.07	0.15	0.26	0.66	0.12	0.19	0.29
400	1.05	1.01	1.06	1.15	1.11	1.96	2.22	2.40
600	1.61	3.05	3.37	3.59	1.67	7.34	7.53	7.68
800	2.10	7.31	7.88	8.05	2.31	17.59	18.59	18.90
1000	2.75	15.52	15.82	16.01	2.79	35.31	37.56	39.61

Figures 8 a–c present the experimental data for *P = f(n)* for the two investigated systems: mixing of water and emulsions (with 20% and vegetable oil and 80% water, and 40% vegetable oil and 60 % water, respectively) at temperature T = 20 C°. Power was recorded during both increasing and decreasing shaft rotational speeds from 200 to 1000 min⁻¹. The rotation frequency was controlled by an infrared non-contact tachometer (Kraychev, 2023).

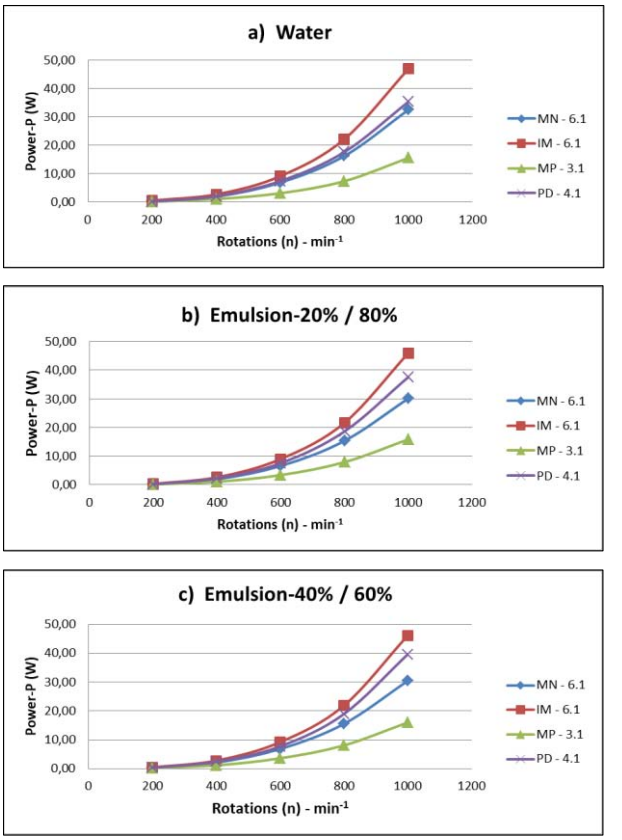


Fig.8. Experimental data for net consumed power (*P*) for four impeller series during mixing of: a) water; b) 20% vegetable oil emulsion in water; c) 40% vegetable oil emulsion in water

The calculated power numbers K_N (Equation 1) are presented graphically in Fig. 9 a-c as a function of Reynolds number (Equation 2).

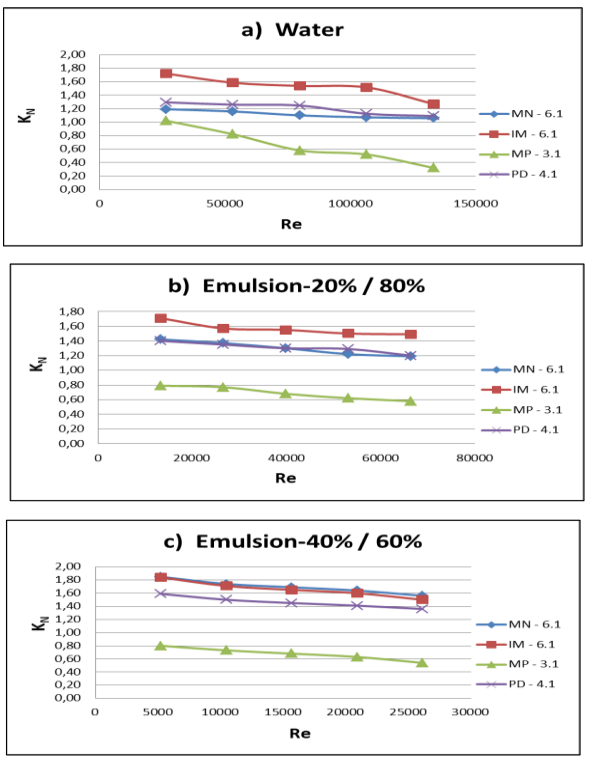


Fig.9. Dependence of K_N = f(Re) for four impeller series under standard reactor configuration during mixing of: a) water; b) 20% vegetable oil emulsion; c) 40% vegetable oil emulsion

Conclusion

Within the scope of this study, new designs of energy-saving impellers were constructed, manufactured, and experimentally characterised. The power number K_N was determined and analysed for four series of modified impellers tested in a laboratory reactor equipped with a horizontally wound copper coil. The obtained K_N values can be used in engineering calculations for determining the theoretical mixing power.

The results demonstrate improved power characteristics under identical operating conditions and comparable Reynolds numbers, which characterise the hydrodynamic mode (laminar, transitional, or turbulent).

From the presented graphical relationships, it is established that at identical rotational speeds and under different operating conditions, the newly developed mixing devices require significantly lower power.

In the working range $Re_б$ >5000÷150000, corresponding to peripheral velocities 3.3 <Vp< 4.5 m/s, the impellers exhibit K_N< 1.2, classifying them as energy-saving mixing devices and confirming their efficiency under turbulent flow conditions.

References

Doran, P. M. (2013). Bioprocess engineering principles (2nd ed.). Academic Press.

Kraychev, E. (2023). Izsledvane i opitno opredelyane na koefitsienta na moshtnostta na nov tip razbarkvashto ustroystvo “KS – 3.1 PM.” *Godishnik na MGU “Sv. Ivan Rilski”, 66.*

Kraychev, E., & Yordanov, V. (2003). Toploobmen pri razbarkvane v techna sreda vlaboratoren reaktor s nov tip aksialen impeler. EMF TU-Sofiya.

Kraychev, E., Yordanov, V., & Popova, I. (2004). Opitno opredelyane koefitsienta na moshtnostta na nov tip mehanichno razbarkvashto ustroystvo – aksialen impeler. EMF TU-Sofiya.

Kraychev, S. (2000). Novi energospestyavashti mehanichni barkachki za himicheskoto, hranitelno-vkusovoto i biotehnologichno proizvodstvo (Habilitatsionen trud). Sofiya.

Metzner, A. B., & Otto, R. E. (1957). Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE Journal, 3(1),* 3–10.

Nagata, S. (1975). Mixing: Principles and applications. Wiley.

Nienow, A. W. (1996). Impeller selection for stirred bioreactors. *Trends in Biotechnology, 14(9)*, 309–314.

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). Handbook of industrial mixing: Science and practice. Wiley-Interscience.

Rushton, J. H., Costich, E. W., & Everett, H. J. (1950). Power characteristics of mixing impellers. *Chemical Engineering Progress, 46(8)*, 395–404.

Stephan, P., Kabelac, S., & Kind, M. (2019). VDI - Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen - VDI - Waermeatlas (12th ed.). VDI Verlag.

Strenk, F. (1975). Mixing and apparatus with stirrers. Chemistry.

THE HYBRID SYSTEM – ENERGY FOR THE FUTURE

Malina Ivanova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: malina_vatz@abv.bg

ABSTRACT: One of the most pressing future issues is expected to be the optimisation of energy consumption in the building sector. A massive shift is needed to the use of environmentally friendly heating systems, the use of which will lead to a reduction in greenhouse gas emissions. One of the most promising solutions to the decarbonisation of residential heating and cooling are hybrid systems.
This report examines a technological solution for the production of electrical energy, heating, and cooling through a hybrid system that includes photovoltaic panels, a gas boiler, and a heat pump—not only as a technical solution, but also as a tool for: reducing energy poverty; building sustainable habits; increasing energy literacy; protecting personal data in the smart home; and creating more sustainable communities.

Key words: hybrid system, energy, photovoltaic, gas boiler, heat pump.

ХИБРИДНАТА СИСТЕМА – ЕНЕРГИЯ ЗА БЪДЕЩЕТО

Малина Иванова
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Един от най-належащите бъдещи въпроси се очаква да е оптимизирането на потреблението на енергия в сградния сектор. Масово трябва да се премине към използването на екологосъобразни отоплителни системи, чиято употреба ще доведе до редуциране на емисиите на парникови газове. Едно от най-обещаващите решения за декарбонизация на жилищното отопление и охлаждане са хибридните системи.
В настоящия доклад е разгледано технологично решение за производство на електрическа енергия, отопление и охлаждане чрез хибридна система, включваща фотоволтаик, газов котел и термопомпа, не само като техническо решение, а като инструмент за: намаляване на енергийната бедност; изграждане на устойчиви навици; повишаване на енергийната култура; защита на личните данни в смарт-дома и създаване на по-устойчиви общности.

Ключови думи: хибридна система, енергия, фотоволтаик, газов котел, термопомпа.

Introduction

One of the most pressing future issues is expected to be the optimisation of energy consumption in the building sector. In order to achieve the goals set in the Kyoto Protocol, a complete transition in terms of energy consumption in households is necessary. A massive shift is needed to the use of environmentally friendly heating systems, the use of which will lead to a reduction in greenhouse gas emissions. One of the most promising solutions for the decarbonisation of residential heating are hybrid systems.

In the face of global climate change and increasing demands for sustainable development, reducing carbon emissions is becoming a top priority for the energy sector. Energy production and consumption, especially when using fossil fuels, are major contributors to greenhouse gas emissions (IPCC, 2021).

This paper examines a technological solution for the production of electricity, heating and cooling through a hybrid system including a photovoltaic, a gas boiler, and a heat pump not only as a technical solution, but as a tool for:

- reducing energy poverty;
- building sustainable habits;
- increasing energy literacy;
- protecting personal data in the smart home;
- creating more sustainable communities.

Objectives of the project

The objectives of this project are to solve the following tasks:

1. Problems in a social context

– *Energy poverty*

In Bulgaria, many households use inefficient heating appliances, rely on wood and coal, and spend a high percentage of their income on heating.

The smart hybrid system offers lower monthly costs, more stable bills, and reduces dependence on a single source.

– *Air pollution*

Burning solid fuels increases fine particulate matter (PM 2.5), affects people's health, and creates social and health costs.

The hybrid system reduces emissions, uses renewable energy and contributes to a cleaner urban environment. Hybrid energy systems, which combine different energy sources (e.g. electricity and gas), are seen as an effective solution to increase energy efficiency and reduce emissions (IEA, 2022). This report aims to analyse the difference in CO_2 emissions between a conventional gas system and a hybrid system.

– *Digitalisation and personal data*

Smart systems collect information about the presence in the home, temperature habits, and consumption.

2. Influence on the change in habits - the system shows in real time: how much energy is used, which source is active, and what is the price per day. This leads to:

– *more conscious consumption,*
– *reduction of excess consumption,*
– *building an energy literacy.*

3. Educational effect - the project can be used in an educational institution as:

– *a model of a smart home;*
– *a demonstration of energy transition;*
– *an example of sustainable energy.*

This is how one understands how renewable energy sources works; how costs are calculated; and what a carbon footprint is.

4. Energy fairness - intelligent energy management allows

access to cheaper energy, use of night-time tariffs, and optimisation according to household income. The system can operate in the following modes:

- *"Minimum costs";*
- *"Minimum emissions";*
- *"Balance comfort - savings".*

This gives a user a choice.

5. Community effect - if the system is implemented on a large scale, it will lead to reduced load on the electricity grid, reduced peak loads, more sustainable neighbourhoods, and lower public health costs.

Buildings become part of the energy ecosystem.

6. Automation with a social purpose - the developed algorithm compares the price of gas and electricity, takes into account the outside temperature, predicts the load, and selects the most economical solution. But in addition to saving, it reduces emissions, supports the stability of the grid, and creates a sustainable consumption model.

7. Ethical aspect - the project raises questions, like:

- *Should energy be a luxury?*
- *How can technology reduce social inequality?*
- *How can we combine digitalisation with privacy protection?*

The answer is: Intelligent systems must be accessible, transparent, and oriented towards the public interest.

Problem Analysis

Features of the Hybrid Heat Pump System

A hybrid heat pump system is supposed to consist of:

– an electric air-to-water or ground-to-water heat pump combined with a gas boiler;

– a mechanism for supplying heat energy to an existing heat distribution system;

– a special control system to switch between the two sources.

These are shown in fig. 1

Fig. 1. Hybrid heat pump and gas boiler

The main component of the system is the **heat pump**. It uses renewable energy from the environment (air, soil or groundwater), by converting low-potential heat into high-potential heat through electrical energy.

The second key element is the **gas boiler**, which acts as a backup or supplementary heat source. It is switched on in unfavourable operating conditions for the heat pump – for example, at very low outdoor temperatures or during peak heat demand. This ensures reliability and continuity of heat supply.

An essential part of the hybrid system is the **mechanism for supplying and distributing heat energy**, which usually uses an existing heating installation (radiators, underfloor heating, or fan coils).

This allows for relatively easy integration of the hybrid system into existing buildings without the need for significant infrastructure changes.

A key role is also played by the **intelligent control system**, which automatically selects the most efficient energy source in real time.

There are two types of solution:

- a hybrid heat pump package, including a heat pump unit, a gas boiler and an intelligent controller;

- an additional hybrid heat pump with an intelligent controller, which is installed to an existing gas boiler.

Hybrid pumps usually operate in two ways. In balancing mode, the boiler is switched on with additional heating capacity and maintains the heat pump at a certain temperature value. This temperature point is the temperature below which the heat pump cannot meet the heat load. Below this point, two operating modes are possible - the heat pump can continue to operate in parallel with the boiler, or the heat pump can be switched off and the boiler can take the entire load. The balance shifts according to the capacity and size of the heat pump. In addition, users can to a certain extent choose the equilibrium temperature point. fig. 2 shows a hybrid system including a gas boiler and a heat pump separately.

Fig. 2. Hybrid system including gas boiler and heat pump separately

Smart controllers can be set to perform a wide range of functions, including optimising operating costs, increasing energy efficiency, reducing emissions, or controlling the heat pump by a utility company in order to regulate demand based on weather conditions, for example.

Since “hybrid” essentially means two different systems working together, some other technologies are also offered as hybrid products. These include, for example, a combination of a solar system and a boiler, two separate heat pumps, and heat pumps and oil boilers.

Hybrid heat pumps can be monoblock or split. In **monoblock** solutions, the heat pump is a single unit, usually installed outside. The heat energy is transferred to the interior of

the building through water containing glycol, which protects it from freezing. In **split** hybrid systems, the heat pump consists of two parts - an outdoor unit, including a heat exchanger and a compressor, and an indoor unit (indoor heat exchanger). A refrigerant circulates between the two parts. Some of the indoor elements can be installed in a single housing.

It is recommended to add a buffer tank (fig. 3) to the system for storing thermal energy, which allows the separation of the heat supply from the heat pump and the energy required for the heating system. The buffer tank can be used for ensuring a minimum flow through the heat pump, minimising the duration of the cycles or for heat supply in the event of a heat pump failure.

Fig. 3. A hybrid system with a buffer tank for thermal energy storage

The buffer tank can be connected to the heat pump system in parallel or in series. If a series connection is used, the tank is usually added in the direction of movement towards the heat pump to avoid delaying the heat supply when needed.

A hybrid heat pump system can meet the overall heating and hot water needs of any household. The boiler is used to reach higher temperatures for obtaining domestic hot water, while the heat pump can provide low-temperature heating at reduced costs and significantly lower energy consumption.

By switching between the two heat sources, smart hybrid heat pump systems can help optimise operating costs, improve energy efficiency, and reduce carbon dioxide emissions.

Hybrid heat pump control

Smart controllers (fig. 4) in hybrid systems allow switching between the heat pump and the boiler for optimisation based on a number of factors. Ideally, it should be possible to set the fuel price, carbon dioxide conversion factors, and the efficiency of the alternative heat source. There should also be a function for compensation of weather conditions and load. In most cases, it is possible to set a floating (variable) point, characterised by the lowest costs, lowest emissions, and least energy consumption.

Fig. 4. Hybrid heat pump controller

The controller can also offer Wi-Fi connectivity with smart features, including two-way communication, allowing external control of the system. In the future, this feature could be used by utility companies for demand management. Not all controllers on the market offer this level of functionality.

The control system is usually compatible with a simple two-channel controller and can be connected to the customer's existing heating solutions and a hot water controller.

The maximum temperature provided by the heat pump component of a domestic hybrid system is typically in the range of up to 55°C. Although these high temperatures are actually achievable, it is a more common practice for the heat pump component to operate at low temperatures, providing a continuous low-temperature base load while the boiler provides high-temperature heating (when needed) and domestic hot water.

Hybrid systems combining photovoltaics, gas boiler and heat pump

Hybrid systems combining a photovoltaic, a gas boiler and a heat pump are an innovative approach to energy production that offers numerous advantages and opportunities for optimising energy efficiency. This technology is becoming increasingly popular due to its flexibility and ability to reduce energy costs and carbon emissions.

Features of the hybrid system with photovoltaics, a gas boiler and a heat pump. The hybrid system with photovoltaics + heat pump + gas boiler is one of the most efficient solutions for heating and cooling a home in Bulgaria. It combines renewable energy with a backup source for maximum savings and security.

A photovoltaic system produces electricity from the sun.

Features: reduces heat pump electricity costs; option for batteries or net metering (if available); most effective during the day and in sunny seasons; requires sufficient roof area and proper orientation.

With a good configuration, it can cover 30–70% of the annual consumption of the home.

A heat pump (air-to-water or ground-to-water) is the main source of heating, cooling and DHW (domestic hot water).

Features: very high efficiency (COP 3–5); most effective in low-temperature systems (underfloor heating); its consumption depends on the outdoor temperature and runs entirely on electricity → ideally compatible with photovoltaics.

In a temperate climate (like in most regions of Bulgaria) the heat pump can be the main source 80–90% of the time.

A gas boiler (reserve/peak load) provides additional power at very low temperatures.

Features: works regardless of the outside temperature; cheaper as an initial investment; higher operating costs compared to a heat pump; suitable for "boosting" at -10°C and lower temperatures.

Provides security in extreme cold or heat pump failure.

The smart controller selects the most economical source according to: the outside temperature; the price of electricity and gas; the available solar energy and the heating/cooling needs.

Operation:

– In mild winters → the heat pump works (with electricity from the photovoltaics).

– In very cold weather → the gas boiler is turned on. ~~and~~

– In summer → the photovoltaics cover the cooling.

Advantages:

+ Very low monthly costs - by combining different energy sources, the hybrid system can reduce overall energy costs. Heat pumps are more efficient at lower temperatures, which reduces the need for gas and therefore fuel costs.

+ Flexibility when energy prices change. In addition, the hybrid system can adapt to different weather conditions and seasons. The heat pump is more efficient during colder months, while the gas boiler can handle the higher load during peak consumption times.

+ Energy independence.

+ Easy integration - the hybrid system can be easily integrated into the existing heating systems, facilitating the transition to more sustainable solutions without significant construction modifications.

+ Lower carbon emissions - heat pumps use renewable energy sources, which reduces the dependence on fossil fuels and, therefore, carbon emissions. This makes the hybrid system more environmentally friendly and sustainable.

+ Backup source (security).

Disadvantages:

- Higher initial investment;
- More complex installation and management;
- Need for proper sizing.

The hybrid system is **suitable for**:

– new construction with good insulation;
– houses 120–350 sq. m;
– homes with underfloor heating;
– long-term savings.

Energy producer for the future. Hybrid systems with photovoltaics, a gas boiler, and a heat pump are a promising energy producer for the future for the following reasons:

- Sustainability and environmental friendliness – the estimated share of these systems shows a reduction in the dependence on fossil fuels and use of renewable energy sources, making them more sustainable and environmentally friendly.
- Economic efficiency - by optimising energy costs and reducing carbon emissions, hybrid systems offer economic benefits for consumers and businesses.
- Adaptability to different conditions - the system's ability to adapt to different climatic conditions and seasons makes it suitable for a wide range of applications and geographical areas.
- Technological advancements - the development of new technologies and materials continues to improve the efficiency and reliability of hybrid systems, making them even more attractive for the future.

Practical study and quantitative analysis of the hybrid system

Research methodology. For the purposes of the study, a single-family house with an area of 150 m² in the climatic conditions of Bulgaria is considered.

The parameters adopted are as follows:

- Annual heat demand: 12,000 kWh
- Electricity price: 0.25 €/kWh
- Natural gas price: 0.12 €/kWh
- Heat pump COP: 3.5
- Photovoltaic share: 40% of electricity consumption.

The electricity consumption of heat pump systems is determined by an integral relationship taking into account the instantaneous power and the system efficiency over time. This allows for a more accurate assessment of the actual energy consumption under variable operating conditions.

The simplified formula for heat pump consumption has the form:

$$\mathrm{Eel} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{COP}} \quad (1)$$

where:

Q – required thermal energy
COP - transformation coefficient

Calculation:

$$\mathrm{Eel} = \frac{12000}{3{,}5} = 3429 \text{ , kWh}$$

Consumption in different systems:

– Gas boiler only, € per year ~~only~~:

C_{gas} = 12000 X 0,12 = 1440 €/year

– Heat pump only:

C_{HP} = 3429 X 0,25 = 857 €/year

– Hybrid system (with 40% photovoltaic):

The photovoltaic covers:

$$0{,}4 \text{ x } 3429 = 1371 \text{ kWh}$$

Remaining energy:

3429 - 1371 = 2058 kWh

Cost:

C_{hybrid} = 2058 x 0,25 = 514 €/year

Table 1. *Results table: Annual cost comparison*

System	**Energy**, kWh	Cost, €/year
Gas boiler	12000	1440
Heat pump	3429	857
Hybrid	2058	51

Analysis of the results

The hybrid system reduces costs by: 64% compared to a gas boiler, and 40% compared to a heat pump. The photovoltaic system has the greatest contribution. The savings increase with higher electricity prices and a larger share of renewable energy sources.

Graphical representation of the "system-cost" relationship. This is given in fig. 5. The expected result is clearly visible cost reduction.

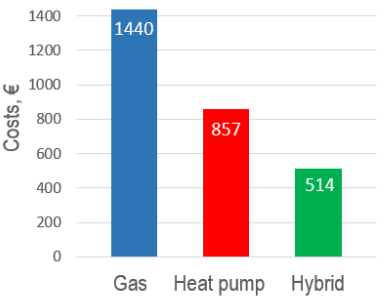


Fig. 5. “System-cost” dependency

Additional indicator. This is graphically presented in fig. 6 – CO_2 emissions.

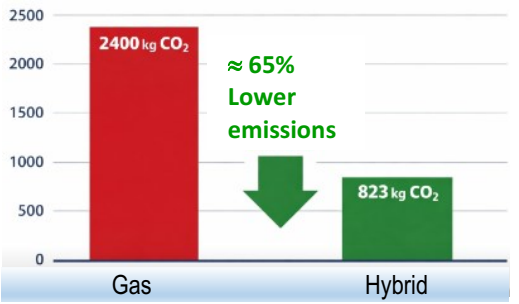


Fig. 6. CO_2 emissions

Approximate factors – gas: 0.2 kg CO_2/kWh, and electricity: 0.4 kg CO_2/kWh (EEA, 2023)

Gas: 12000 X 0,2 = 2400 kg CO_2

Hybrid: 2058 X 0,4 = 823 kg CO_2

Reduction: ≈ 65%

The chart shows a significant reduction in carbon emissions when using a hybrid system. With a gas system, emissions reach approximately 2,400 kg CO_2 per year, while with a hybrid system they are around 823 kg CO_2, which represents a reduction of approximately 65%.

Conclusion regarding the practical part. The conducted research shows that the hybrid system:

- provides significantly lower operating costs;
- reduces carbon emissions by over 60%.

The results obtained show a significant reduction in emissions when using a hybrid system. The reduction amounts to approximately 65%, which is a significant contribution to limiting the carbon footprint.

These results are consistent with other studies which show that integrating more efficient and combined energy solutions leads to significant emission reductions (Smith & Jones, 2019; Petrov et al., 2020). Furthermore, such systems allow for the optimisation of energy consumption and a more flexible resource management (Davis et al., 2018, 2021).

- increases energy independence.

That makes it, not only technically, but also economically and environmentally, an optimal solution for Bulgaria.

Conclusion

The hybrid system is not just a technology. It is a tool for social sustainability, a means to reduce energy poverty, a solution for cleaner air, and an example of responsible digitalisation. The study proves that the future of energy is not only about efficiency, but also about the connection between technology and society. Thanks to the flexibility, combinations of domestic hybrid heat pumps can be used both in new buildings and in the modernisation of existing ones. The greatest potential of hybrid systems is precisely in retrofit applications. The technology can provide the link between the widespread gas boilers and the requirement for a transition to the use of low-carbon electric heating.

This paper examined a technological solution for electricity production, heating, and cooling through a hybrid system, including photovoltaics, a gas boiler, and a heat pump, not only as a technical solution, but also as a tool for:

- reducing energy poverty;
- building sustainable habits;
- increasing energy literacy;
- protecting personal data in the smart home;
- creating more sustainable communities.

The study has shown how smart energy management impacts people's daily lives and how technologies can work for the benefit of society. The implementation of such technologies is key to achieving sustainable development goals and reducing environmental impacts (IEA, 2022; IPCC, 2021). Their importance is expected to grow in the future, especially in the context of the energy transition to a low-carbon economy.

References

Angelov, S. & Asenov, T. (2015). Mining Industry. *Mining and Geology, 2*, 24–31.

Ivanov, A. (2023). Mineral and Raw Materials Industry of Bulgaria, 5, 12-19.

Davis, L., Brown, T., & Wilson, R. (2018). Hybrid energy systems and efficiency improvements. *Energy Journal, 45*(2), 112–130.

Davis, L., Brown, T., & Wilson, R. (2021). Advances in hybrid energy technologies. *Renewable Energy, 67*(4), 210–225.

EEA - European Environment Agency. (2023). Greenhouse gas emission intensity of electricity generation.

IEA - International Energy Agency. (2022). World Energy Outlook 2022.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

Ivanov, P. (2017). Energy efficiency in modern systems. *Energy and Environment, 12*(3), 55–63.

Petrov, D., Ivanov, A., & Georgiev, M. (2020). Analysis of hybrid systems in residential buildings. *Energy Systems, 9*(1), 33–41.

Smith, J., & Jones, M. (2019). Reducing CO_2 emissions through hybrid solutions. *Journal of Cleaner Production, 145*, 200–210.

EXPERIMENTAL DETERMINATION AND INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN A NEW SERIES OF ENERGY-EFFICIENT MECHANICAL AGITATORS IN A LABORATORY REACTOR WITH A COPPER COIL

Evgeni Kraychev, Svetlozar Grozdanov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: evgeni.kraychev@mgu.bg

Abstract: In the present article, an experimental study of heat transfer is presented for a new series type of energy-saving mechanical agitators installed in a laboratory cylindrical reactor with an internal copper coil. The aim is to evaluate the influence of design parameters and rotational speed on the intensity of heat transfer and the energy efficiency of the system. The experiments were carried out under different mixing regimes measuring the temperatures of the working medium and the heat carrier, as well as the consumed power. Based on the energy balance, the heat flux and the average heat transfer coefficient were determined. A relationship was established between the hydrodynamic regime and the values of the heat transfer coefficient. The results show that the investigated energy-saving agitators provide increased heat transfer intensity at lower specific energy consumption compared to traditional designs. The obtained relationships can be used in the design and optimisation of reactors with intensive heat transfer.

Key words: energy-saving mechanical agitators; heat transfer; laboratory reactor; copper coil; heat transfer coefficient.

ОПИТНО ОПРЕДЕЛЯНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛООБМЕНА НА НОВ ТИП СЕРИЯ ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ МЕХАНИЧНИ БЪРКАЧКИ В ЛАБОРАТОРЕН РЕАКТОР С МЕДНА СЕРПЕНТИНА

Евгени Крайчев, Светлозар Грозданов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

Резюме: В настоящата статия е представено експериментално изследване на топлообмена при нов тип серия енергоспестяващи механични бъркачки, монтирани в лабораторен цилиндричен реактор с вътрешна медна серпентина. Целта е да се оцени влиянието на конструктивните параметри и оборотната скорост върху интензивността на топлообмена и енергийната ефективност на системата. Експериментите са проведени при различни режими на разбъркване, като са измервани температурите на работната среда и топлоносителя, както и консумираната мощност. На база на енергийния баланс са определени топлинният поток и средният коефициент на топлообмен. Установена е зависимост между хидродинамичния режим и стойностите на коефициента на топлоотдаване. Резултатите показват, че изследваните енергоспестяващи бъркачки осигуряват повишена топлообменна интензивност при по-ниска специфична консумация на енергия в сравнение с традиционни конструкции. Получените зависимости могат да бъдат използвани при проектиране и оптимизация на реактори с интензивен топлообмен.

Ключови думи: енергоспестяващи механични бъркачки; топлообмен; лабораторен реактор; медна серпентина; коефициент на топлоотдаване.

Introduction

Mechanical agitation is a fundamental technological process widely applied in the chemical, biotechnological, pharmaceutical, and food-processing industries to enhance mass, heat, and kinetic transfer within reaction volumes. The efficiency of these processes depends on the interaction between the hydrodynamic regime of the fluid, the geometry of the impellers, and the structural characteristics of the vessel, as well as on the capability to control heat transfer within the reactor (Smith et al., 2023; Shah et al., 2024).

The optimisation of the design of new energy-efficient mechanical impellers is a key factor in improving the energy performance of mixing systems. In recent years, numerous modified configurations have been proposed with the objective of minimising specific energy consumption while maintaining satisfactory mixing and heat-transfer performance (Beale et al., 2025; Zhou et al., 2025).

Heat transfer in mechanically agitated vessels is a complex process directly dependent on the hydrodynamic conditions generated by the impeller. The presence of internal heat exchangers, such as copper coils, alters the local flow pattern and leads to specific velocity profiles and temperature gradients in the vicinity of the heat-transfer surface. This necessitates comprehensive experimental investigations, since standard correlations are often insufficient to adequately describe real operating conditions in systems with complex flow structures (Smith et al., 2023; Shah et al., 2024).

Energy-efficient mechanical impellers represent an innovative class of devices developed with the aim of reducing specific energy consumption and improving heat-transfer performance in reactors. Studies have shown that optimised geometric configurations and the application of specialised impellers can result in a significant reduction in power consumption while maintaining or improving heat-transfer and mixing characteristics (Beale et al., 2025).

Despite the extensive body of literature devoted to the analysis of mechanical impellers, a limited number of studies address an integrated analysis of hydrodynamics, heat transfer, and energy efficiency in systems equipped with internal heat exchangers such as copper coils. This defines the scientific context of the present study, which aims to fill this gap through systematic experimental investigation.

The copper coil functions as an effective heat exchanger due to the high thermal conductivity of copper and the possibility of compact arrangement of the heat-transfer surface within a limited volume. In combination with the flow dynamics generated by the structural characteristics of energy-efficient impellers, it forms a complex thermo-hydrodynamic environment whose influence requires quantitative determination through experimental approaches.

This paper aims to present an experimental determination and investigation of heat transfer for a new series of energy-

efficient mechanical impellers in a laboratory-scale reactor equipped with a copper coil. The main objective is to obtain quantitative relationships between agitation parameters, structural characteristics of the impellers, and heat-transfer performance, which will support the optimisation of systems for sustainable and energy-efficient mixing and heat-transfer processes (Rahman et al., 2025).

Role of the Coil as an Internal Heat Exchanger

The internal coil is one of the most efficient and widely used heat-transfer elements in agitated reactors, particularly in processes requiring precise temperature control throughout the entire reaction volume. Its primary function is to provide intensive heat exchange between the working medium in the reactor and the heat-transfer fluid circulating through the coil. This enables both heating and cooling of the reaction mixture depending on process requirements (Mahir et al., 2021).

➢ **Design Advantages of the Coil**

The coil represents a tubular heat exchanger installed inside the reactor, typically arranged in a helical configuration. This design offers several key advantages:

- Large heat-transfer surface area within compact dimensions;
- High thermal conductivity, especially when copper is used, as it has one of the highest thermal conductivities among engineering metals;
- Effective contact with the liquid, since the coil is directly immersed in the reaction medium;
- Capability to operate over a wide range of temperatures and pressures.

These characteristics make the coil highly suitable for both laboratory-scale and industrial reactors where temperature control is critical.

➢ **Heat-Transfer Mechanism**

Heat transfer between the coil and the reaction medium occurs through a combination of:

- heat conduction through the pipe wall;
- convective heat transfer on the part of the heat-transfer fluid inside the coil;
- convection and turbulent mixing on the part of the reaction medium .

The efficiency of heat transfer depends on:

- the flow velocity of the heat-transfer fluid;
- the temperature of the inlet and outlet streams;
- the geometry of the coil (diameter, pitch, number of turns);
- the intensity of agitation within the reactor.

➢ **Interaction Between the Coil and Mechanical Agitation**

Mechanical agitation plays a key role in the performance of the coil. Without agitation, a stationary boundary layer forms around the coil, significantly reducing the heat-transfer coefficient. New energy-efficient impellers are designed to:

- direct the flow toward the coil surface;
- disrupt the boundary layer;
- increase turbulence near the pipe surface;
- ensure uniform flow distribution along the entire length of the coil.

This results in a substantial increase in both the local and overall heat-transfer coefficients (Farhadi et al., 2008).

➢ **Advantages of Copper Coils**

The selection of copper as the construction material is determined by its favourable physical properties:

- high thermal conductivity (approximately 400 W/m.K), enabling rapid heat transfer;
- ease of fabrication, allowing production of coils with small radii and complex geometries;
- corrosion resistance over a wide range of operating environments;
- good mechanical strength even at thin wall thickness.

Due to these properties, copper coils respond rapidly to changes in the temperature of the heat-transfer fluid, enabling precise and dynamic process control.

➢ **Significance for the Technological Process**

Efficient coil performance is critical for:

- maintaining the optimal reaction temperature;
- preventing local overheating or overcooling;
- ensuring homogeneous conditions throughout the reactor volume;
- improving product quality and reproducibility;
- reducing energy consumption.

When combined with energy-efficient impellers, the internal coil enables a significant improvement in the overall energy efficiency of the reactor system (Copper Development Association, 2023).

Investigated Mixing Devices and Working Media

In a previous publication of ours, the power number K_N was investigated both theoretically and experimentally. For the experimental determination of heat transfer, studies were conducted during agitation of two types of liquid systems typical of biotechnological processes:

- single-phase system – water;
- two-phase system – water–vegetable oil emulsion at different concentrations.

The investigations were carried out using developed series of modified energy-efficient mechanical impellers, as follows:

- Modified Narcissus – MN–6.2
- Impeller – IM–6.2
- Modified Propeller – MP–3.2
- “Clover” Propeller – PD–4.2

The investigated designs represent a new series type of energy-efficient mechanical impellers developed with the aim of increasing the hydrodynamic efficiency of the process and reducing specific energy consumption during dispersing, emulsifying, and homogenising of liquid systems typical for biotechnological production (Kraychev et al., 2003).

The newly designed series of impellers are presented in Figs. 1, 2, 3, and 4.

Fig.1. Modified Narcissus - MN–6.2

Fig.2. Impeller – IM–6.2

Fig.3. Modified Propeller – MP–3.2

Fig.4. “Clover” Propeller – PD–4.2

The structural modification of the working elements is directed toward optimisation of the flow structure within the apparatus, limitation of turbulent energy losses, and improvement of momentum transfer within the working volume.

All impellers were precisely manufactured from AISI 304 stainless steel, ensuring:

- high corrosion resistance;
- chemical inertness toward the investigated media;
- compliance with the hygiene requirements for biotechnological applications;
- good mechanical strength at relatively small material thickness.

The main geometric parameters of the impellers are:

- impeller diameter: d = 0.09 m
- blade thickness: δ = 0.5 mm.

The selected diameter was chosen in accordance with the working volume of the vessel (V_R = 14.3 dm³) and provides an appropriate ratio between the impeller diameter and the vessel diameter. This ratio is necessary for the accurate determination of heat-transfer characteristics and for a comparable evaluation of energy efficiency among the different impeller designs.

Physico-Chemical Characteristics of the Working Media

The experimental investigations were conducted at ambient temperature within the range T=15–20 C°. The dynamic viscosity μ of water is 0.001 Pa.s. The liquid media used and their densities were as follows:

- Water: ρ-water = 998 kg/m³

Emulsion systems water–vegetable oil:

Two concentrations of the dispersed phase (vegetable oil) were investigated:

- 20% vegetable oil + 80% water - ρ 20% = 984 kg/m³
- 40% vegetable oil + 60% water - ρ 40% = 968 kg/m³

The dynamic viscosity μ for the dispersed phase concentration at 20% was 0.002 Pa.s, while at 40% it was 0.005 Pa.s. The working liquid volume in the experimental vessel was V = 12 L (0.012 m³).

Experimental Setup

The experimental investigations were carried out in a laboratory semi-industrial agitated system implemented in a cylindrical reactor (10) with a nominal working volume V_R=14.3 dm³, manufactured from a transparent polymer material (plexiglass). The selection of a transparent reactor design was determined by the need for visual control of the hydrodynamic flow structure, turbulence development, and spatial phase distribution within the reaction volume. This enables observation of characteristic flow features, including the formation of vortex structures, the degree of gas dispersion, and the efficiency of macro- and micromixing.

To stabilise the hydrodynamic regime and to limit axisymmetric liquid rotation, four vertical baffle plates (4) were installed along the inner periphery of the vessel, evenly spaced at an angle of 90° relative to each other. The presence of baffles significantly reduces the probability of central vortex (“funnel”) formation and the associated development of undesirable secondary flows. Furthermore, these structural elements facilitate the conversion of tangential velocity components into radial and axial components, resulting in an increase in turbulent energy and a substantial improvement in the intensity of heat- and mass-transfer processes within the reaction volume.

In order to provide the required thermal conditions and maintain a specified temperature regime, a horizontally wound copper coil (3) was mounted along the inner wall of the reactor, with a total length of L_{coil} = 7.94 m. The coil functions as an internal heat-transfer surface through which heat exchange occurs between the reaction medium and the circulating heat-transfer fluid. The use of copper as the construction material is due to its high thermal conductivity, which ensures uniform heat-flux distribution and minimises temperature gradients within the reaction volume. The heat-transfer fluid is supplied to the coil from an external heat-exchange unit (12) at a preset temperature, enabling effective control of the thermal balance and stabilisation of the system's thermal regime.

A sparger (11) was installed at the bottom section of the reactor, consisting of a porous gas-distribution element designed to introduce an inert gas into the liquid phase. Gas sparging results in its dispersion into numerous fine bubbles, increasing the interfacial surface area and creating favourable conditions for the intensification of mass-transfer processes.

The agitation system is driven by a vertical shaft (2) made of stainless steel, to which a mechanical impeller (9) with a specified geometric configuration is attached. The shaft is mechanically coupled to a direct-current electric motor (1), ensuring reliable and stable operation over a wide range of

rotational speeds. The use of a DC motor allows smooth regulation of rotational frequency and maintenance of constant hydrodynamic conditions during the experiments. The structural design of the drive system ensures minimal mechanical losses, high reliability, and stability during prolonged operation (Fig.5) (Kraychev, 2023).

Fig. 5. Laboratory reactor in operating mode

The regulation of the rotational speed of the main shaft, and consequently of the impeller, is achieved by means of an autotransformer, allowing smooth variation of the voltage supplied to the electric motor.

Control of the electrical parameters of the system is implemented through potentiometers combined with a voltmeter and ammeter, while the power characteristics of the motor are determined based on previously established calibration relationships.

Measurement of the actual rotational speed of the impeller is performed using an infrared non-contact tachometer (7), which ensures high measurement accuracy and eliminates the influence of mechanical contact on system dynamics. The obtained experimental data are automatically recorded by a data acquisition unit (8), enabling subsequent processing, statistical analysis, and graphical representation of the results.

Temperature control within the system is achieved using highly sensitive manometric thermometers (5) installed at the inlet and outlet of the heat-exchange system. By comparing the inlet and outlet temperatures of the heat-transfer fluid, the quantity of transferred heat is determined and the efficiency of the heat-transfer process is evaluated.

Additionally, a digital flowmeter (6) is integrated into the system to measure the flow rate of the heat-transfer fluid G_1 in real time, as well as the flow rate of the circulating liquid in the reactor G_2. The inlet and outlet temperatures of the system, denoted as T_1 and T_2, are recorded, enabling accurate determination of heat fluxes and analysis of the thermodynamic parameters of the process.

A photographic image and a schematic diagram of the experimental installation are presented in Fig. 6 and Fig. 7, respectively, where the main structural elements, measuring devices, and functional units of the system are indicated. The presented scheme allows clear visualisation of the interconnections between individual components and facilitates interpretation of the obtained experimental results (Kraychev et al., 2000).

Fig. 6. Photograph of the experimental installation

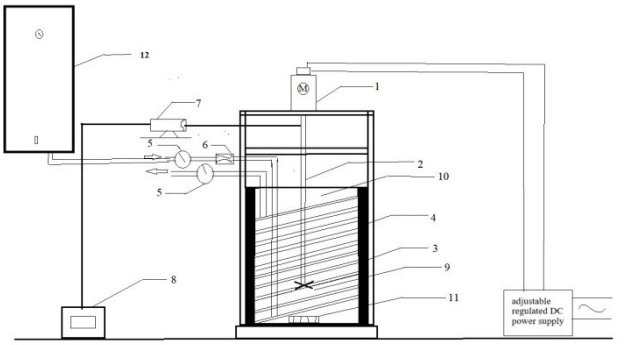


Fig. 7. Diagram of the experimental installation:
1 – DC electric motor; 2 – stainless steel shaft; 3 – copper coil; 4 – baffles (4 pcs.); 5 – manometric thermometers; 6 – digital flow meter; 7 – infrared tachometer; 8 – recording unit; 9 – mechanical agitator; 10 – plexiglass reactor; 11 – sparger; 12 – heat exchanger

In Fig. 8, a photograph of the experimental stand equipped with a *Testo-890* thermal imaging camera model is presented, taken at different viewing angles. The entire emulsion inside the reactor was observably heated to the required operating temperature necessary for determining the heat and mass balance.

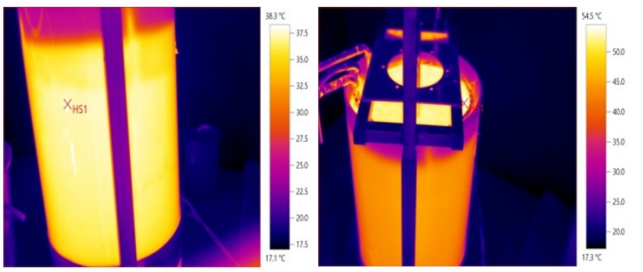


Fig. 8. Photograph of the reactor operating under working conditions with a thermal imaging camera

Research Methodology and Experimental Results

The heat-transfer coefficient (α_2) on the agitation side was investigated, and based on this parameter, the Nusselt number (Nu_2) on the agitation side was determined. For this purpose, the heat-balance method was applied to determine the overall heat-transfer coefficient (k). The heat-transfer coefficient on the heat-carrier side (α_1) was calculated using (Nu_1) from equation

(5), which describes heat transfer during fluid flow in pipes and channels. A correction $\varepsilon_{\Delta t}$ of the temperature difference for the presence of parallel mixed flow was also calculated (Stephan et al., 2019).

The experimental data were processed using a computer program according to the following algorithm:

a) determination of the heat flux

$$\dot{Q} = G_1.C_p.\Delta t_{avg} \quad (1)$$

b) determination of the effective heat-transfer surface of the horizontally wound copper coil - (A = 0,147 m^2);

c) determination of Δt_{avg} for each experiment, using counter-flow equations and correction $\varepsilon_{\Delta t}$;

d) calculation of the overall heat-transfer coefficient

$$k = \frac{\dot{Q}}{A.\Delta t_{avg}} \quad (2)$$

e) determination of the heat-carrier velocity in the coil

$$W = G_1 / S_c \quad (3)$$

f) determination of the Reynolds number in the coil

$$Re = W.d_{eq} / v \quad (4)$$

g) determination of the Nusselt number Nu_1 in the turbulent region (Re > 10000)

$$Nu_1 = 0.0235.Re^{0.8}.Pr^{0.48}.\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,11} \quad (5)$$

h) determination of the Prandtl number

$$Pr = \mu .C_p / \lambda \quad (6)$$

i) determination of the heat-transfer coefficient α_1

$$\alpha_1 = \frac{Nu . \lambda_T}{d_{eq}} \quad (7)$$

j) determination of the heat-transfer coefficient α_2

$$\alpha_2 = \frac{k .\alpha_1}{\alpha_1 - k} \quad (8)$$

k) determination of the Reynolds number during agitation

$$Re = \frac{n .\rho .D_a^2}{\mu} \quad (9)$$

l) determination of the Nusselt number Nu_2

$$Nu_2 = C . Re^A . Pr^B . \left(\frac{\mu}{\mu_{wall}}\right)^F \quad (10)$$

Table 1 presents the calculated results obtained from laboratory experiments during the agitation of a 20% vegetable oil – water emulsion using a coil heat-exchange system and four series of newly developed energy-efficient agitators.

Table 1. *Results of calculations from laboratory experiments during the agitation of 20% vegetable oil – water emulsion for four impeller series*

Modified Narcissus - MN - 6.2											
n	G	t_1	t_2	Q	θ_1	θ_2	Re	α_2	Nu_2	k	Δt_{cp}
min^{-1}	kg/s	C°	C°	W	C°	C°	-	W/m²K	-	W/m²K	C°
200	0.181	50.9	48.3	1964	20.6	45.0	57452	520	230	432	12.8
400	0.181	50.8	48.0	2120	22.0	45.5	74880	620	260	562	10.7
600	0.181	51.8	47.8	2300	22.5	46.0	89900	695	293	634	10.2
800	0.181	50.8	47.6	2415	22.8	45.6	104820	760	327	696	9.8
1000	0.181	50.7	47.4	2512	22.7	45.8	119836	826	353	755	9.4
Impeller - IM - 6.2											
n	G	t_1	t_2	Q	θ_1	θ_2	Re	α_2	Nu_2	k	Δt_{cp}
min^{-1}	kg/s	C°	C°	W	C°	C°	-	W/m²K	-	W/m²K	C°
200	0.181	50.8	48.2	47.9	20.5	44.9	57452	550	240	456	12.8
400	0.181	50.7	47.9	2116	22.1	45.6	74880	654	287	573	10.4
600	0.181	51.8	47.8	3023	22.4	45.9	89900	721	327	654	9.8
800	0.181	50.8	47.6	2418	22.8	45.6	104820	790	355	693	9.9
1000	0.181	50.6	47.3	2494	22.7	45.8	119836	836	391	780	9.3
Modified Propeller - MP - 3.2											
n	G	t_1	t_2	Q	θ_1	θ_2	Re	α_2	Nu_2	k	Δt_{cp}
min^{-1}	kg/s	C°	C°	W	C°	C°	-	W/m²K	-	W/m²K	C°
200	0.181	50.7	48.1	1965	20.4	44.9	57452	430	206	460	12.1
400	0.181	50.6	47.8	2116	22.2	45.6	74880	534	227	584	10.2
600	0.181	50.8	47.8	2267	22.5	45.9	89900	605	255	655	10.0
800	0.181	50.8	47.6	2418	22.8	45.6	104820	685	285	693	9.9
1000	0.181	50.7	47.4	2494	22.7	45.7	119836	750	315	750	9.4
“Clover” Propeller - PD - 4.2											
n	G	t_1	t_2	Q	θ_1	θ_2	Re	α_2	Nu_2	k	Δt_{cp}
min^{-1}	kg/s	C°	C°	W	C°	C°	-	W/m²K	-	W/m²K	C°
200	0.181	50.8	48.2	1965	20.5	44.9	57452	484	220	449	12.6
400	0.181	50.7	47.9	2117	22.1	45.6	74880	585	253	573	10.4
600	0.181	51.5	47.8	2530	22.5	45.9	89900	655	280	648	10.4
800	0.181	50.8	47.6	2417	22.8	45.6	104820	738	315	694	9.9
1000	0.181	50.7	47.7	2500	22.7	45.8	119836	800	340	762	9.4

In Fig. 9, the experimental data showing the relationship between Nu_2 and Re during agitation of a 20% vegetable oil–water emulsion in a coil heat-transfer system are presented for four newly designed impeller series at T=15–20 C°. The relationship was recorded during both increase and decrease of shaft rotational speed *n* from 200 to 1000 min^{-1}. The rotational speed was controlled using an infrared non-contact tachometer (Kraychev, 2023).

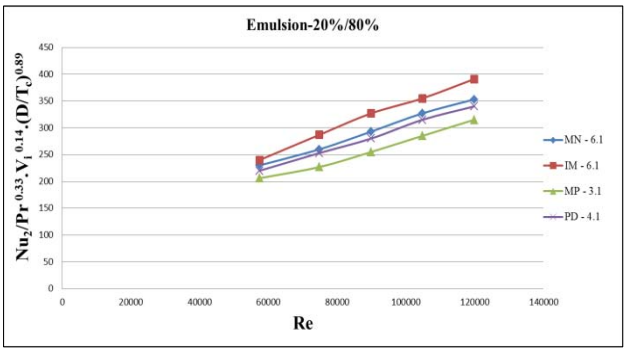


Fig. 9. Dependence of Nu_2 on Re during the agitation of a 20% vegetable oil–water emulsion in a coil heat-transfer system

A comparison was performed between the heat-transfer coefficient (α_2) for the four series of energy-efficient impellers on the agitation side as a function of the Reynolds number (Re_a). The results are presented in Fig. 10.

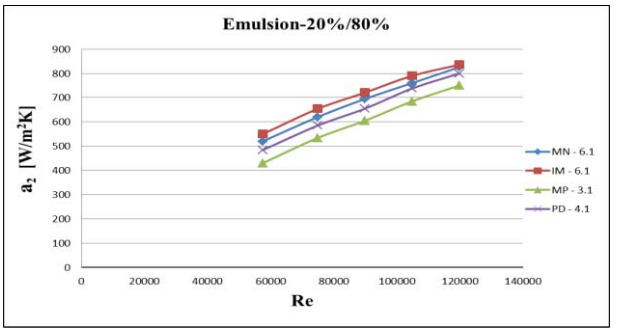


Fig. 10. Comparison of heat-transfer coefficient (α_2) as a function of Reynolds number (Re)

Symbols and Notation

A – heat-transfer surface area of the coil (m²)
A, B, C – empirical constants (determined experimentally for each impeller type)
Cp – specific heat capacity (kJ/kg.K)
D_a – impeller diameter (m)
d_{eq} – equivalent diameter (m)
F – empirical constant (determined experimentally for each impeller type)
G_1 – heat-carrier flow rate (m³/h)
G_2 – circulating liquid flow rate (m³/h)
k– overall heat-transfer coefficient (kW/m².K)
L_{coil} – coil length (m)
n – shaft rotational speed (min⁻¹)
Nu_1, Nu_2 – Nusselt numbers describing heat transfer
Pr – Prandtl number
Pr_w – Prandtl number near the coil wall
Re – Reynolds number
$\dot{Q}$ – heat flux (W)
S_c – cross-sectional area through which the heat carrier flows (m²)
T – ambient temperature (K)(C°)
T_1, T_2 – temperatures of heat flows in the system (K) C°)
W – heat-carrier velocity (m/s)
α_1, α_2 – heat-transfer coefficients (W/m².K)
Δt_{avg} – temperature difference between inlet and outlet of the heat carrier (K)(C°)
$\varepsilon_{\Delta t}$ – correction factor for temperature difference (K)(C°)
λ – thermal conductivity coefficient (W/m.K)
λ_t – thermal conductivity of the heat carrier (W/m.K)
μ – dynamic viscosity (Pa.s)
ν – kinematic viscosity of water (m²/s)
ρ – fluid density (kg/m³)
θ_1, θ_2 – emulsion temperatures in the reactor (K)(C°)

Conclusion

Laboratory investigations of heat transfer were conducted using four series of modified energy-efficient mechanical impellers. The values of Nu_2 and α_2 on the agitation side were experimentally determined using two types of liquid systems. The obtained results were presented in tabular and graphical form as functions of the Reynolds number during agitation (Re_a).

Additional experimental studies were also carried out using two and three impellers mounted along the length of the main shaft, with the objective of improving mixing time and overall system efficiency. Particularly promising results were obtained with the Modified Propeller – MP-3.2 impeller. When compared in terms of Nu_2 and α_2, this impeller demonstrated significantly better performance than the other tested designs.

These results may be applied in the design and sizing of reactors equipped with the same type of mechanical impellers for applications in the chemical, food-processing, and biotechnological industries.

References

Beale, E. G., & Hernandez, M. T. (2025). Energy-efficient impeller designs for stirred tanks: Performance evaluation and optimization. *Chemical Engineering Research and Design, 189*, 214–227.

Copper Development Association. (2023). *Copper in heat exchangers*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Copper_in_heat_exchangers

Farhadi, F., Lakghomi, B., Kolahchian, E., & Jalali, A. (2008). Coil and jacket's effects on internal flow behavior and heat transfer in stirred tanks. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*.

Kraychev, E. (2023). Izsledvane i opitno opredelyane na koefitsienta na moshtnostta na nov tip razbarkvashto ustroystvo „KS – 3.1 PM“. *Godishnik na MGU “Sv. Ivan Rilski”, 66*.

Kraychev, E., & Yordanov, V. (2003). Toploobmen pri razbarkvane v techna sreda v laboratoren reaktor s nov tip aksialen impeler. EMF TU-Sofiya.

Kraychev, S., & Tzekov, R. (2000). Izsledvane na toploobmen v reaktor s mehanichno razbarkvane i toploobmenni tela triagalni prizmi otboynitsi. In *Nauchna konferentsiya EMF 2000*, TU–Sofiya (pp. 119–123).

Li, Q., Zhou, Y., & Wang, H. (2025). Review on energy saving techniques for stirred tank reactors: Mechanisms and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 175*, 113469.

Mahir, M., El Maakoul, A., Khay, I., Saadeddine, S., & Bakhouya, M. (2021). An investigation of heat transfer performance in an agitated vessel. *Processes, 9*(3), 468. https://doi.org/10.3390/pr9030468

Rahman, M. A., & Kazi, R. S. (2025). Impact of impeller geometry on mixing efficiency and energy consumption in stirred vessels. *Processes, 11*(3), 445–459.

Shah, S. R., & Mahto, N. N. (2024). Study of hydrodynamics and heat transfer in baffled stirred tanks with internal coils. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology, 14*(5), 1–10.

Smith, J. L., & Gupta, A. K. (2023). Quantitative experimental analysis of heat transfer characteristics in mechanically stirred reactors. *International Journal of Thermal Sciences, 137*, 106–117.

Stephan, P., Kabelac, S., & Kind, M. (2019). *VDI-Waermeatlas* (12th ed.). VDI Verlag.

OPTIMISATION OF THE OPERATION OF HYBRID HEATING SYSTEMS THROUGH THE INTEGRATION OF THERMAL ENERGY STORAGE

Alexander Kustelev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: a.kustelev@mgu.bg

ABSTRACT. The present article examines the possibilities for optimising the operation of hybrid heating systems through the integration of thermal energy storage. The influence of buffer tanks on energy efficiency, operational stability, and the reduction of peak loads is analysed. Through modelling or comparative analysis, the behavior of the system under different operating modes and storage volumes is evaluated. The obtained results allow for determining optimal parameters for improving the efficiency and reliability of the system.

Key words: thermal energy storage, energy efficiency, system optimisation.

ОПТИМИЗАЦИЯ НА РАБОТАТА НА ХИБРИДНИ ОТОПЛИТЕЛНИ СИСТЕМИ ЧРЕЗ ИНТЕГРАЦИЯ НА ТОПЛИННО СЪХРАНЕНИЕ

Александър Кюстелев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящият доклад разглежда възможностите за оптимизация на работата на хибридни отоплителни системи чрез интеграция на топлинно съхранение. Анализира се влиянието на буферни съдове върху енергийната ефективност, стабилността на работа и намаляването на пиковите натоварвания. Чрез моделиране или сравнителен анализ се оценява поведението на системата при различни режими на работа и обеми на съхранение. Получените резултати позволяват определяне на оптимални параметри за повишаване на ефективността и надеждността на системата.

Ключови думи: топлинно съхранение на енергия, енергийна ефективност, оптимизация на системи.

Въведение

В днешно време се приема за необходимост при изработка на хибридна отоплителна система да се предвиди буферен съд. Той изпълнява ключова роля за оптимизацията на работата на различните източници на топлина. Акумулира произведената енергия, позволявайки равномерно и стабилно подаване на топла вода към отоплителната инсталация, като същевременно намалява честотата на включване и изключване на котела и термопомпата. Освен това съдът улеснява координацията между източниците на енергия и интеграцията на възобновяеми технологии, като слънчеви колектори, осигурявайки ефективност и комфорт в целия отоплителен процес.

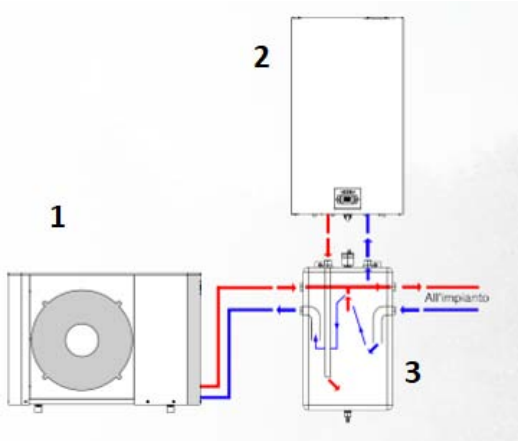
Най-често за постигане на максимална ефективност въпросната отоплителна система представлява подово отопление или преоразмерени радиатори. Колкото е по-голяма площта и мощността на топлоотдаващите компоненти, толкова по-ниска може да е температурата на водата, с която затопляме жилището. Това води до икономия на енергия по два различни начина. Подгряването на вода до по-ниска температура изразходва по-малко количество енергия, без значение дали това е газ или ток. Втората причина е, че при по-малка разлика в температурата между водата в буфера и температурата на въздуха в помещението се получават по-малко загуби на топлина. Буферните съдове почти винаги са изолирани, но това не предотвратява напълно да се предава топлината от водата към въздуха на котелното помещение.

Въздействие на буферен съд върху ефективността на хибридната система

Разделянето на производството на топлина от моментното пиково потребление позволява на източника на топлина да работи по-дълго и по-равномерно. Модерните високоефективни газови котли и термопомпи изразходват най-малко енергия, когато им се осигури възможност за дълготрайно непрекъснато функциониране с ниско натоварване. Този ефект се постига от повишен обем на водата в инсталацията. При приближаване на желаната температура (настроена в буферния съд) уредите успяват да модулират с ниска мощност, което позволява плавно подгряване на водата и води до значителна ефективност. Начинът на модулация при термопомпените съоръжения е малко по-различен от този на газовите котли.

При изгарянето на газ за подгряване на водата модулацията се случва, като вентилаторът на уредите намалява оборотите си, вкарва по-малко количество смес (газ и въздух), което води до по-слаб пламък в горелката и по-ниска температура на затопляне. При термопомпите за модулацията се грижат едновременно компресорът, вентилаторът на топлообменника, както и циркулационната помпа. При необходимост от по-малко топлинна енергия компресорът забавя честотата на работа, което намалява количеството на хладилен агент, преминал през пълния цикъл.

В двата случая се наблюдава равномерна и икономична работа на уредите, което пряко влияе върху повишената им ефективност.



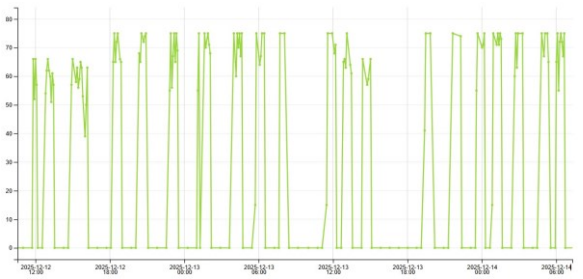
Фиг. 1. Основна схема за подвързване:
1-Термопомпа, 2 – Газов котел, 3 – Буферен съд

При успоредното свързване на отоплителните уреди се цели възможността за едновременна работа при нужди от голямо количество енергия. (Първоначално стартиране на отоплителната система, високо ΔT между външната температура и тази в помещението или големи загуби на енергия). В този случай буферният съд играе роля като хидравлично разделяне на двата източника. Газовият котел, както и термопомпата са оборудвани с циркулационни помпи, които работят с различни дебити. При липса на хидравличен разделител (буферният съд) съществува вероятност от взаимно влияние между помпите, при което дебитът на едната помпа влияе върху другата. Този процес води до неравномерно разпределение на топлината, високи температури на връщащата вода, възможен шум в системата и в дългосрочен план повреда в помпите.

Сравнение на работата на отоплителен уред с буферен съд спрямо инсталация без буферен съд

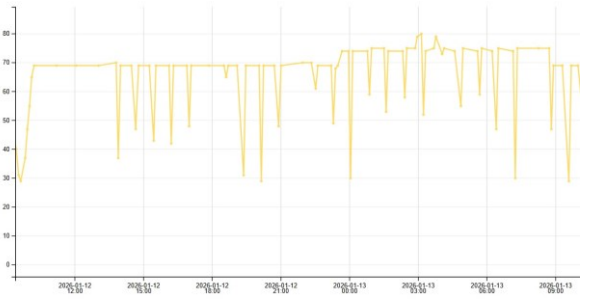
Трите основни ползи от буферния съд представляват:

- Съхранение на топлинна енергия
- По-рядко включване и изключване на отоплителните уреди
- Хидравлично разделяне на енергийните източници



Фиг. 2. Работа на термопомпа в отоплителна система без буферен съд

На графиката е изразена работата на компресор на термопомпа в система без буферен съд. Наблюдават се следните процеси, които се повтарят: често включване, бързо достигане на максимална честота на компресора (около 75 Hz), рязкото спиране. Причината е малкото количество на топлоносителя в системата, както и бързото достигане на зададената температура. Това не само води до ниска ефективност и нисък комфорт, но също така и драстично намалява „живота“ на компонентите в термопомпата. Причините за този тип работа са две: 1. Преоразмеряване на мощността на термопомпата. 2. Липса на буферен съд и малко количество на водата в инсталацията.



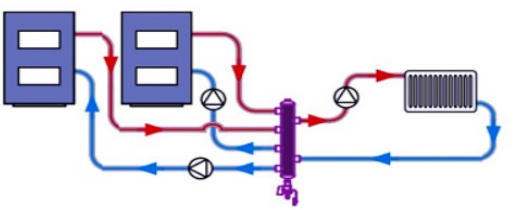
Фиг. 3. Работа на термопомпа в отоплителна система с буферен съд

На (фиг.3.) е показана идентична отоплителна система, като основната разлика с предишната е наличието на буферен съд. Забелязва се по-равномерна работа на компресора на отоплителния уред. Няма нито едно изключване в рамките на няколко дни, което спомага за равномерната и ефективна работа. Рядката цикличност (включване и изключване) на машината ще удължи времето за експлоатация на уреда. Според проучване, направено от един от водещите производители на климатична техника и термопомпи - Carrier Global Corporation, честото включване и изключване (цикличност) и неправилното оразмеряване на уреда могат да намалят експлоатационния срок на една термопомпа средно от 12-15 години до 8-10 години. Това е намаляване на експлоатационния срок между 20% до 47%.

Газовият котел работи с подобен принцип, макар и да не е толкова чувствителен към честите промени. В него компонентите като запалителен електрод, запалителна бубина имат лимит за максимален брой стартирания, след което трябва да бъдат заменени.

Хидравлично разделяне на източниците на енергия

В случаите на хибридни системи, състоящи се от два или повече източници на топлина е от изключителна важност хидравличното им свързване. Най-често срещаният модел е успоредното присъединяване на отоплителните уреди с помощта на хидравличен разделител или буферен съд.



Фиг. 4. Успоредно свързване чрез хидравличен разделител на хибридна система с 2 източника на енергия

Причината за хидравличното разделяне на двата отоплителни уреда лежи в принципа им на работа.

Ако се вземе под внимание най-често срещаният модел на хибридна система – газов котел и термопомпа количеството на циркулирана вода и дебитите, с които работят се различават значително.

Дебит на водата при газов котел (7-15 l/min)

Дебит на водата при термопомпа (25-40 l/min)

Това налага двата източника на топлина да бъдат хидравлично разделени, за да могат да работят независимо един от друг, без взаимно влияние върху циркулационните помпи и необходимите дебити.

При липса на хидравлично разделяне често се наблюдават следните проблеми:

- недостатъчен дебит през термопомпата;
- чести аварии и грешки за нисък дебит;
- нестабилна работа на газовия котел;
- шум в инсталацията и повишена скорост на водата;
- неправилно разпределение на топлината към отоплителните кръгове;
- намалена ефективност и по-висок разход на енергия.

Това са основните причини да се разделят отоплителните уреди с буферен съд или хидравлични съединители както е на фиг. 4.

По този начин всеки уред работи в оптималния за него режим. Газовият котел може да функционира с по-голям температурен пад и по-нисък дебит, докато термопомпата поддържа необходимия висок дебит за ефективен топлообмен и стабилна работа на компресора.

Изчисления за съхранение на енергия

Най-ясно може да се види разликата между двата типа системи, като се пресметне количеството на използваната енергия за функционирането им, както и топлинният капацитет.

За пример ще сравним две стандартни идентични отоплителни системи, като единствената разлика е наличието на буферен съд в отоплителна инсталация.

Система 1:
Подово отопление 100 m^2 = 80 L = 80 kg
Буферен съд 0 литра
Температура на подаване 40°C
Температура на връщане 35°C
Топлинен капацитет на вода 4184 J/g°C

Система 2:
Подово отопление 100 m^2 = 80 L = 80 kg
Буферен съд 100 L = 100 kg
Температура на подаване 40°C
Температура на връщане 35°C
Топлинен капацитет на вода 4184 J/g°C

$$1\ kWh = 3600000J$$

$$c = \frac{4184}{3600000} = 0{,}001162\ kWh$$

Формула за изчисляване на абсорбирана енергия

$$Q = mc\Delta T \qquad (1)$$

където:
Q – абсорбирана енергия [kWh]
m – маса на водата [kg]
c – топлинен капацитет на водата за 1 K x 1 L [kWh]
ΔT – температурна разлика [K]

Пример 1:

$$Q_1 = mc\Delta T = 80\ .\ 0{,}001162\ .\ 5 = 0{,}4648\ kWh$$

Пример 2:

$$Q_2 = mc\Delta T = (80 + 100)\ .\ 0{,}001162\ .\ 5 = 1{,}0458\ kWh$$

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 \qquad (2)$$

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = 1{,}0458 - 0{,}4648 = 0{,}581\ kWh$$

От изчисленията се разбира, че акумулираната енергия при отоплителна система, снабдена с буферен съд, е значително по-висока от тази без буферен съд. Това позволява по-плавно подгряване на топлоносителя, защото топлинната енергия се изчерпва по-бавно. Сензорите на термопомпата имат достатъчно време да реагират на отнетата топлина и да задействат подгряващия процес на по-ранен етап с по-ниска честота на компресора и по-ниски обороти на вентилаторите.

Заключение

Буферният съд е основен елемент при изграждането на съвременни хибридни отоплителни системи, комбиниращи термопомпа и газов котел. Неговата роля не се изчерпва единствено със съхранение на топлинна енергия, а обхваща оптимизацията на цялата инсталация чрез стабилизиране на работните режими, намаляване на цикличността и осигуряване на хидравлично разделяне между различните източници на топлина.

Анализът показва, че увеличеният воден обем в системата позволява по-плавна и продължителна работа на отоплителните уреди при ниско натоварване, което води до по-висока ефективност и по-нисък разход на енергия. Особено при термопомпените системи буферният съд значително намалява честите включвания и изключвания на компресора, като по този начин удължава експлоатационния живот на оборудването и подобрява комфорта при отопление.

Хидравличното разделяне е от критично значение поради различните дебити и принципи на работа на газовия котел и термопомпата. Буферният съд позволява всеки уред да функционира в оптимален режим без взаимно влияние между циркулационните помпи, като предотвратява проблеми като нисък дебит, шум в инсталацията, неравномерно разпределение на топлината и намалена ефективност.

Изчисленията за акумулираната енергия ясно показват, че системите с буферен съд разполагат със значително по-голям топлинен капацитет, което създава условия за по-стабилна работа и по-добро управление на отоплителния процес.

В заключение може да се каже, че правилното оразмеряване и интегриране на буферен съд в хибридните отоплителни системи е ключово условие за постигане на висока енергийна ефективност, надеждна експлоатация, по-дълъг живот на оборудването и максимален комфорт за потребителите.

Литература:

Караджов, М. Проектиране, изграждане, поддръжка и сервиз на битови хибридни системи с използване на природен газ. *Списание ”Минно дело и геология”, бр. 9, 2022 г., София, ISSN 0861 – 5713 (Print), ISSN 2603 – 4549 (Online), стр. 42-46* (in Bulgarian).

Baugh T. How Long Do Heat Pumps https://www.carrier.com/residential/en/ca/products/heat-pumps/how-long-do-heat-pumps-last/

Brumbaugh J. (2004) HVAC FUNDAMENTALS Volume 1: Heating Systems, Furnaces and Boilers *ISBN: 0-764-54206-0*

https://www.idm-energie.at/en/heat-distribution/hydraulic-separators/

CALCULATION OF FLOW RATE AND WELLHEAD PRESSURE FOR A GAS WELL PRODUCING A GAS-HYDROGEN MIXTURE FROM AN UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITY

Veselin Mitkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: veselin.mitkov@mgu.bg

ABSTRACT. The report discusses two important technological parameters during the extraction of a gas-hydrogen mixture with varying concentrations of hydrogen and natural gas from an underground gas storage facility. With the rise of global demand for a stable hydrogen economy, studying changes in flow rate and wellhead pressure during the extraction of a gas-hydrogen mixture provides an important economic and technical perspective on the challenges associated with the storage and extraction of hydrogen from underground gas storage facilities. The changes in flow rate and wellhead pressure of a gas well during the extraction of a gas-hydrogen mixture with hydrogen contents of 5, 15, and 25% in the gas-hydrogen mixture have been determined. The hydraulic friction coefficient has been calculated for the selected hydrogen concentrations.

Key words: hydrogen, flow rate, pressure, gas-hydrogen mixture.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДЕБИТА И УСТИЕВОТО НАЛЯГАНЕ НА ГАЗОВ СОНДАЖ ПРИ ДОБИВ НА ГАЗО-ВОДОРОДНА СМЕС ОТ ПОДЗЕМНО ГАЗОХРАНИЛИЩЕ

Веселин Митков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В доклада са разгледани два важни технологични показатели по време на добив на газо-водородна смес с различни концентрации на водород и природен газ от подземно газохранилище. С нарастване на нуждите на света за стабилна водородна икономика, изследването на изменението на дебита и налягането на газов сондаж за добив на газо-водородна смес е важен икономически и техничен поглед над проблема свързан със съхранението и добива на водород от подземни газохранилища. Определено е изменението на дебита и устиевото налягане на газов сондаж при добив на газо-водородна смес със съдържание на водород 5, 15, 25% в газо-водородната смес. Изчислен е коефициента на хидравлично триене при избраните концентрации на водород.

Ключови думи: водород, дебит, налягане, газо-водородна смес.

Въведение

Определянето на изменението на дебита и устиевото налягане на газов сондаж при добив на газо-водородна смес със съдържание на водород 5, 15, 25% в газо-водородната смес е изключително важно при проектиране на експлоатацията на подземно газохранилище. За целта е необходимо правилно да се определи коефициента на хидравлично триене при движението на газо-водородна смес със съдържание на водород 5, 15, 25% в помпено-компресорните тръби в процеса на добив.

Физични и химични свойства

Водородът (символ H, атомен номер 1) е най-лекият елемент и е безцветен, без мирис и без вкус. Въпреки че е поставен в група 1 на периодичната таблица с алкалните метали, водородът не е метал. При нормални условия той се държи като неметал и лесно образува единична ковалентна връзка с повечето неметални елементи, което води до образуването на съединения като вода и повечето органични молекули. Само при изключително високо налягане водородът проявява метални свойства. Водородът е най-лекият елемент, но осигурява най-високата енергия на единица маса от всички известни горива. Въпреки това, неговата обемна енергийна плътност е много ниска. За да се преодолее това ограничение, газообразният водород обикновено се компресира до налягане между 200 и 700 бара. Разработват се и алтернативни подходи, като криогенна компресия и съхранение на базата на материали, за да се повиши ефективността на съхранението на водород. [Iabidine Messaoudani, Z., Rigas, F., Hamid, M.D.B., Hassan, C.R.C., 2016. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: a critical review. Int. J. Hydrogen Energy 41 (39), 17511–17525]

В таблица 1 са показаните физичните и химичните свойства на водорода.

Таблица1. *Физични и химични свойства на водорода*

Химичен символ	H_2
Фази	Газообразно, течно, полутечно, твърдо, метално и плазмено
Молекулно тегло	2.016 ,g.mol^{-1}
Енергия на дисоциация на H-H връзката	435.7 ,kJ.mol^{-1}
Енергийно ниво на електрона в атома в основното състояние	-13.6 ,eV
Специфичен обем на газа при 70 ºF (21,1 ºC) и 1 atm	11.99 ,m^3.kg^{-1}
Температура на самозапалване	570 ,^{o}C
Точка на кипене при 1,01 bar	-252.8 ,^{o}C
Точка на топене при 1,01 bar	-259.2 ,^{o}C
Относителна плътност (въздух = 1) 1 atm	0.08989 ,g.ml^{-1}
Енергийно съдържание на газа	120 ,MJ.kg^{-1}
Енергийно съдържание на течния водород	8 ,MJ.L^{-1}

Критична температура	-239.9 ,°C
Критично налягане	12.96 ,bar, abs
Критична плътност	30.12 ,kg.m^{-3}
Тройна точка	-259.3 ,°C при 0.07 bar, abs
Граници на възпламеняемост във въздуха (по обем)	4.0-75.0 ,%
Енталпия на горене	-286 ,kJ.mol^{-1}
Скрита топлина на топене при тройната точка	58.09 ,kJ.kg^{-1}
Скрита топлина на изпаряване при точката на кипене	446.0 ,kJ.kg^{-1}
Cp	14.34, kJ.kg^{-1} °C
Cv	10.12 ,kJ.kg^{-1} °C
Съотношение на специфичните топлини	1.42
CAS №	133-74-0
UN №	1049
ERG	115

Определяне на дебита на сондаж по време на добив на газо-водородна смес

В таблица 2 са показани данните на Рпр при пластово налягане от 80 до 150 бара.

Таблица 2. *Рпр при пластово налягане и 5-25% газо-водородна смес*

5% H_2		
Рпр	Рпл ,MPa	Ркр , MPa
1.802	8	4.4397
2.027	9	4.4397
2.252	10	4.4397
2.478	11	4.4397
2.703	12	4.4397
2.928	13	4.4397
3.153	14	4.4397
3.379	15	4.4397
15% H_2		
Рпр	Рпл ,MPa	Ркр , MPa
1.802	8	4.4397
2.027	9	4.4397
2.252	10	0.4397
2.478	11	4.4397
2.703	12	4.4397
2.928	13	4.4397
3.153	14	4.4397
3.379	15	4.4397
25% H_2		
Рпр	Рпл ,MPa	Ркр , MPa
1.802	8	4.4397
2.027	9	4.4397
2.252	10	4.4397
2.478	11	4.4397
2.703	12	4.4397
2.928	13	4.4397
3.153	14	4.4397
3.379	15	4.4397

В таблица 3 са показани данните на Тпр при средна температура Тср.

Таблица 3. *Тпр при средна температура и 5-25% газо-водородна смес*

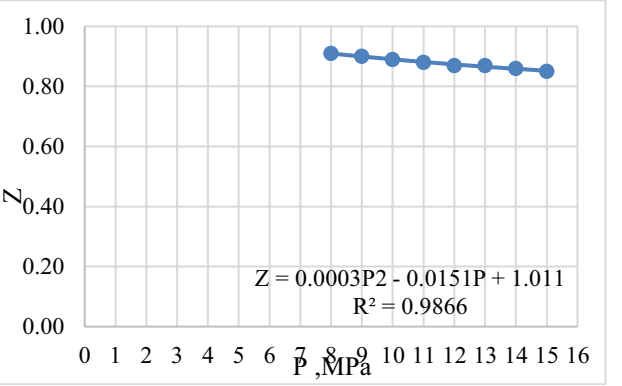
5% H_2		
Трп	Тср ,K	Ткр ,K
1.738	317.65	182.73
15% H_2		
Трп	Тср ,K	Ткр ,K
1.902	317.65	167.01
25% H_2		
Трп	Тср ,K	Ткр ,K
2.100	317.65	151.27

В таблица 4 са показани данните за коефициента на свръхсвиваемост Z при Рпр и Тпр от таблица 2 и таблица 3.

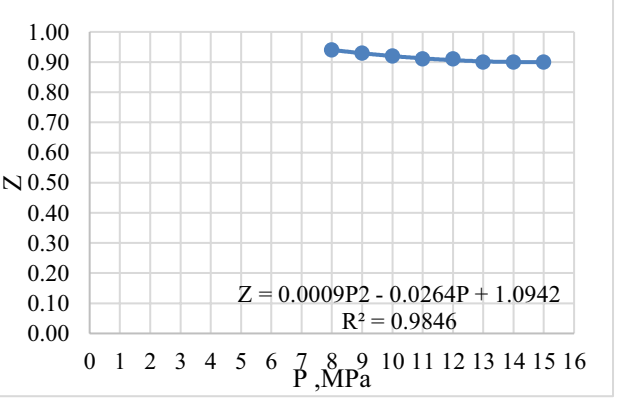
Таблица 4. *Коефициент на свръхсвиваемост Z при Рпр и Тпр и 5-25% газо-водородна смес*

5% H_2		15% H_2		25% H_2	
Z 5%	Рпл, MPa	Z 15%	Рпл, MPa	Z 25%	Рпл, MPa
0.91	8	0.94	8	0.96	8
0.90	9	0.93	9	0.95	9
0.89	10	0.92	10	0.95	10
0.88	11	0.91	11	0.95	11
0.87	12	0.91	12	0.95	12
0.87	13	0.90	13	0.95	13
0.86	14	0.90	14	0.96	14
0.85	15	0.90	15	0.96	15

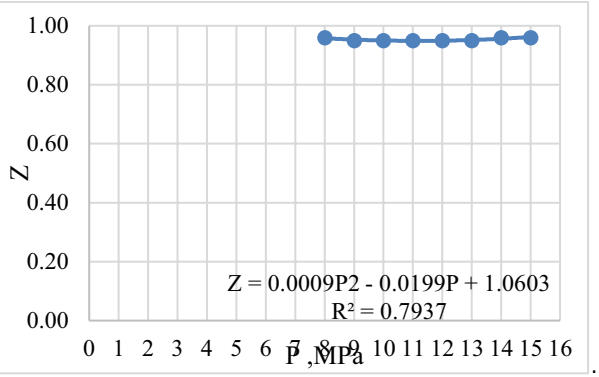
Данните от таблици 2, 3 и 4 са показани на Фигури 1, 2 и 3.



Фиг. 1. Зависимост между коефициента на свръхсвиваемост Z при 5% водород и изменението на пластово налягане.



Фиг. 2. Зависимост между коефициента на свръхсвиваемост Z при 15% водород и изменението на пластово налягане



Фиг. 3. Зависимост между коефициента на свръхсвиваемост Z при 25% водород и изменението на пластово налягане

По формула 1 се намира дебита на сондаж по време на добив на газо-водородна смес.

$$Q = \frac{\pi \times k \times h \times T_{ст} \times [P_{пл}^2 - P_c^2]}{P_{ст} \times \mu \times Z \times T_{пл} \times \left(\ln \frac{R_k}{R_c}\right)} \quad , \frac{m^3}{s} \qquad (1)$$

където:

Q – дебит на сондажа, m^3/s
k – проницаемост на скалата колектор, m
h – дебелина на пласта, m
$T_{ст}$ – стандартна температура, °K
$P_{пл}$ – пластово налягане, MPa
P_c – забойно налягане, MPa
$P_{ст}$ – стандартно налягане, MPa
μ – вискозитет на газо-водородната смес, Pa,s
Z – коефициента на свръхсвиваемост
$T_{пл}$ – пластова температура, °K
R_k – приведен радиус на контура, m
R_c – приведен радиус на сондажа, m

Дебитите на сондаж при различни пластови налягания и съдържание на водород от 5-25% в газо-водородна смес са показани в таблици 5, 6 и 7.

Таблица 5. *Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес с 5% съдържание на водород*

Рпл	Рс	Z	Q
8	3	0.909	7.41
9	4	0.899	8.86
10	5	0.890	10.33
11	6	0.881	11.82
12	7	0.873	13.33
13	8	0.865	14.87
14	9	0.858	16.42
15	10	0.852	17.98

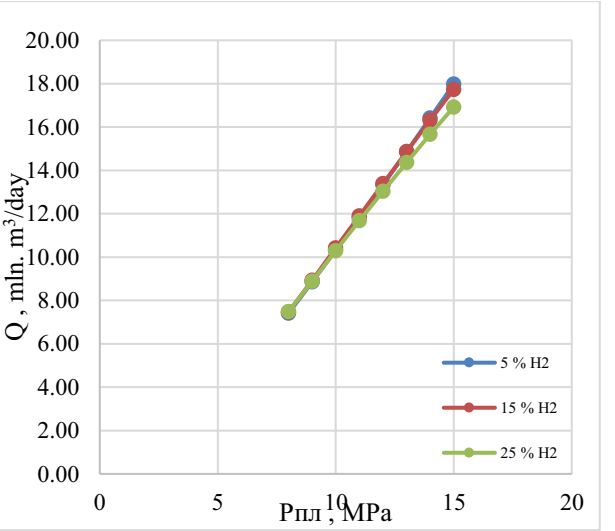
Таблица 6. *Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес с 15% съдържание на водород*

Рпл	Рс	Z	Q
8	3	0.941	7.47
9	4	0.930	8.94
10	5	0.920	10.42
11	6	0.913	11.90
12	7	0.907	13.39
13	8	0.903	14.86
14	9	0.901	16.31
15	10	0.901	17.74

Таблица 7. *Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес с 25% съдържание на водород*

Рпл	Рс	Z	Q
8	3	0.959	7.49
9	4	0.954	8.89
10	5	0.951	10.29
11	6	0.950	11.68
12	7	0.951	13.04
13	8	0.954	14.37
14	9	0.958	15.67
15	10	0.964	16.92

Резултатите от изчисленията в таблици 5, 6 и 7 чрез формула (1) са показани на фигура 4.



Фиг. 4. Зависимост между пластовото налягане и дебита на сондаж при добив на газо-водородна смес с 5, 15 и 25% водород

Определяне на устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес

Чрез формула 2 се пресмята устиевото налягане на газов сондаж по време на добив на газо-водородна смес със съдържание на водород от 5 до 25%.

$$P_y = \sqrt{\frac{P_c^2 - \frac{690{,}5 \times 10^{-12} \times Z \times T_{ср} \times L \times \bar{\rho} \times \lambda (e^S - 1) Q^2}{d_{пкт}^5 \times S}}{e^S}} \quad , MPa \qquad (2)$$

където:

$P_{уст}$ – налягането на устието на сондажа ,MPa
$P_{заб}$ – налягането на забоя на сондажа ,MPa
Z – коефициента на свръхсвиваемост
$T_{ср}$ – средната температура в колоната от помпено-компресорни тръби , °K
L – дължина на колоната от помпено-компресорни тръби, m
$\bar{\rho}$ – относителна плътност на газо-водородната смес
λ – коефициента на хидравлично триене
Q – дебит на сондажа, m^3/s
$d_{пкт}$ – вътрешен диаметър на колоната от помпено-компресорни тръби, m
e – Неперовото число e = 2,7182818284
S – параметър , определя се чрез зависимост 4.

$$f(x) = e^x = \exp(x) \quad (3)$$

$$S = \frac{0{,}03415 \times \bar{\rho} \times L}{Z \times T_{\text{ср}}} \quad (4)$$

Записът f(x), показан на формула 3, се използва особено когато е неудобно изписването на зависимата променлива като степенен показател. Експоненциалната функция има уникалното свойство да е равна на собствената си производна и интеграл (с точност до константа). Затова широко се употребява в математиката, физиката и химията.

За да използваме зависимост 2 е необходимо да се определи коефициента на хидравлично триене λ в зависимост от критерия на Рейнолдс (5) и относителната грапавост на вътрешната повърхност на колоната от ПКТ.

$$Re = \frac{17{,}75 \times Q \times \bar{\rho}}{d_{\text{пкт}} \times \mu} \quad (5)$$

където:

Q – дебита на сондажа, 10^3 x m^3/day

μ – вискозитет на газо-водородната смес, Pa.s

$\bar{\rho}$ – относителна плътност на газо-водородната смес

$d_{\text{пкт}}$ – вътрешен диаметър на колоната от помпено-компресорни тръби, m

Относителната грапавост на вътрешната повърхност на колоната от ПКТ пресмятаме чрез зависимост 6.

$$\varepsilon_{\text{от}} = \frac{K_e}{d_{\text{пкт}}} \quad (6)$$

където Ke е абсолютната грапавост. Тя зависи от състоянието на колоната на ПКТ. В нашия случай колоната е от нови стоманени тръби и Ke = 0,04 x 10^{-3} , m.

В областта на турболентната автомоделност (квадратична зона) – $Re \times \varepsilon_{\text{от}} > 500$, коефициентът на хидравлично триене λ се изчислява по формула 7 [Геров Л., 2019].

$$\lambda = 0{,}11 \times \left(\frac{K_e}{d_{\text{пкт}}}\right)^{0{,}25} \quad (7)$$

Устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес със съдържание на водород от 5 до 25% водород е показано в таблици 8 – 13.

Таблица 8. *Устиево налягане при 5% H_2 и $d_{пкт}$ 4 1/2*

Pc	Q	Z	$\bar{\rho}$	λ	S	Pуст
3	85.77	0.968	0.530	0.0156	0.206	2.707
4	102.49	0.955	0.530	0.0156	0.209	3.604
5	119.51	0.943	0.530	0.0156	0.212	4.499
6	136.80	0.931	0.530	0.0156	0.214	5.392
7	154.33	0.920	0.530	0.0156	0.217	6.282
8	172.07	0.909	0.530	0.0156	0.220	7.170
9	190.00	0.899	0.530	0.0156	0.222	8.057
10	208.07	0.890	0.530	0.0156	0.224	8.942

Таблица 9. *Устиево налягане при 5% H_2 и $d_{пкт}$ 2 7/8*

Pc	Q	Z	$\bar{\rho}$	λ	S	Pуст
3	85.77	0.968	0.530	0.0175	0.206	2.707
4	102.49	0.955	0.530	0.0175	0.209	3.604
5	119.51	0.943	0.530	0.0175	0.212	4.499
6	136.80	0.931	0.530	0.0175	0.214	5.392
7	154.33	0.920	0.530	0.0175	0.217	6.282
8	172.07	0.909	0.530	0.0175	0.220	7.170
9	190.00	0.899	0.530	0.0175	0.222	8.057
10	208.07	0.890	0.530	0.0175	0.224	8.942

Таблица 10. *Устиево налягане при 15% H_2 и $d_{пкт}$ 4 ½*

Pc	Q	Z	$\bar{\rho}$	λ	S	Pуст
3	86.49	1.023	0.481	0.0156	0.177	2.746
4	103.44	1.003	0.481	0.0156	0.181	3.655
5	120.56	0.985	0.481	0.0156	0.184	4.562
6	137.75	0.968	0.481	0.0156	0.187	5.465
7	154.93	0.954	0.481	0.0156	0.190	6.367
8	171.98	0.941	0.481	0.0156	0.193	7.267
9	188.79	0.930	0.481	0.0156	0.195	8.166
10	205.28	0.920	0.481	0.0156	0.197	9.065

Таблица 11. *Устиево налягане при 15% H_2 и $d_{пкт}$ 2 7/8*

Pc	Q	Z	$\bar{\rho}$	λ	S	Pуст
3	86.49	1.023	0.481	0.0175	0.177	2.746
4	103.44	1.003	0.481	0.0175	0.181	3.655
5	120.56	0.985	0.481	0.0175	0.184	4.562
6	137.75	0.968	0.481	0.0175	0.187	5.465
7	154.93	0.954	0.481	0.0175	0.190	6.367
8	171.98	0.941	0.481	0.0175	0.193	7.267
9	188.79	0.930	0.481	0.0175	0.195	8.166
10	205.28	0.920	0.481	0.0175	0.197	9.065

Таблица 12. *Устиево налягане при 25% H_2 и $d_{пкт}$ 4 1/2*

Pc	Q	Z	$\bar{\rho}$	λ	S	Pуст
3	*86.67*	1.009	0.433	0.0156	0.162	2.768
4	*102.92*	0.995	0.433	0.0156	0.164	3.686
5	*119.11*	0.983	0.433	0.0156	0.166	4.603
6	*135.13*	0.973	0.433	0.0156	0.168	5.519
7	*150.90*	0.965	0.433	0.0156	0.169	6.434
8	*166.33*	0.959	0.433	0.0156	0.170	7.349
9	*181.33*	0.954	0.433	0.0156	0.171	8.265
10	*195.83*	0.951	0.433	0.0156	0.172	9.181

Таблица 13. *Устиево налягане при 25% H_2 и $d_{пкт}$ 2 7/8*

Pc	Q	Z	$\bar{\rho}$	λ	S	Pуст
3	*86.67*	1.009	0.433	0.0175	0.162	2.768
4	*102.92*	0.995	0.433	0.0175	0.164	3.686
5	*119.11*	0.983	0.433	0.0175	0.166	4.603
6	*135.13*	0.973	0.433	0.0175	0.168	5.519
7	*150.90*	0.965	0.433	0.0175	0.169	6.434
8	*166.33*	0.959	0.433	0.0175	0.170	7.349
9	*181.33*	0.954	0.433	0.0175	0.171	8.265
10	*195.83*	0.951	0.433	0.0175	0.172	9.181

Заключение

В резултат на получените данни от определяне на дебита на сондаж по време на добив на газо-водородна смес и устиевото налягане могат да се направят следните изводи:

1. Дебитите на сондаж при добив на газо-водородна смес се увеличават с увеличаване на съдържание на водород от 5 до 15% а при 25 % намаляват при по-висок коефициент на проницаемост.
2. Устиевото налягане на сондаж по време на добив на газо-водородна смес със съдържание на водород от 5 до 25% се увеличава с увеличаване на коефициента на проницаемост при диаметър на ПКТ 4 $^{1/2}$ и 2 $^{7/8}$“.
3. Коефициентът на хидравлично триене се изменя от 0,0156 до 0,0175.

Литература

Iabidine Messaoudani, Z., Rigas, F., Hamid, M.D.B., Hassan, C.R.C., 2016. *Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: a critical review*. Int. J. Hydrogen Energy 41 (39), 17511–17525.

Геров Л., 2019, *Добив и съхраняване на природния газ*. МГУ „Св. Ив. Рилски“, София, 297 стр.

STATISTICAL MODELLING OF DRILL BITS DULL

Dobromir Netsov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: d.netsov@mgu.bg

ABSTRACT. Drill bits are probably the most important component of the drilling process. They are the vanguard part in the well depth progression and, thus, drill bit choice is a major factor for successful and emergency-free operations. In this research, five major drilling parameters are observed for a period of 5÷6 years and for different types of drill bits (a total of 22 bits) drilling in different lithological and technical working conditions: nominal OD [D, m]; total drilling meters [∑M]; total working hours [∑h]; average WOB [T, t] and average RPM [min^{-1}]. Bit dull grading is affected by one unregulated parameter: drilled rock formations. This suggests for a certain error in the statistical model since the formations cannot be chosen or changed. Using STATGRAPHICS software, experimental models are brought out showing the connection between bit dull grading and the other drilling parameters.

Key words: drill bits, statistics data, statistical modelling, dull grade.

СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ОТРАБОТВАНЕТО НА СКАЛОРАЗРУШАВАЩИ ИНСТРУМЕНТИ

Добромир Нецов

Минно-геоложки университет „Св.Иван Рилски“, София 1700

РЕЗЮМЕ. Скало-разрушаващите инструменти са може би най-важният компонент на сондажния процес. Те са средството, осъществяващо разрушаването на скалата на забоя и, в този смисъл, изборът им е основен фактор за успешна и безаварийна работа. В настоящето изследване, за период от 5÷6 години, е документирана работата на пет основни параметъра на различни типове длета (общо 22 бр.) при различни геоложки и технически условия на работа: номинален външен диаметър [D,m]; сумарни просондирани метри [∑M]; натрупани часове работа [∑h]; усреднен осев товар [T, t] и усреднена честота на въртене RPM [min^{-1}]. Отработката на длетата се влияе от параметър, неподлежащ на регулиране – просондираните скални формации. Това предполага известна неточност в статистическия модел, тъй като последните не могат да се избират или променят. Чрез статистически софтуер STATGRAPHICS са изведени експериментални модели за връзката между износването длетата и другите сондажни параметри.

Ключови думи: длета, статистически данни, статистическо моделиране, отработка.

Introduction

Drill bits are the most important part of the drilling process. They are the vanguard part in the well depth progression. Choosing a suitable bit based on the conditions downhole is a major factor for successful and non-emergency operations.

This study represents drill, bit wear and its specific characteristics. Based on a collected data, an experimental statistical model is calculated. Its goal is to clarify factors, affecting drill bits working process, any suggestions on improvement measures, and last but not least and if possible, well price reduction.

The drill bit dull grading criteria were unified and imported in practice by the International Association of Drilling Contractors (IADC) in the 1980s. They are valid for both roller cone and fixed-cutter bits (PDC – poly diamond crystalline), providing all the information on the active elements, bearing parts, outer gauge diameter, any damage, and reasons for pulling the bit out of hole (Rabia, 2002).

Table 1 represents a short version of the dull grading chart because of its wide popularity in literature.

Table1. *IADC drill bit dull grading*

Cutting structure				Bearing/ Seals	Gauge	Other	Reason pulled
IN	OUT	DULL	LOC				
I	O	D	L	B	G	O	R

The main criteria for examination are eight and they are reviewed one by one after replacing the bit.

A 0÷8 scale is used for the first two characteristics, so when going to a bigger number, the cutting structure condition (steel teeth, inserts or fixed-cutter) gets worse. The third criterion – dull characteristics (D) – consists of a body damage (if observed): broken or missing teeth, metal tracks, damaged roller cones, etc.

The fourth column marks the roller cones condition (roller cone bits) or the active elements (PDC bits). The fifth column is about the bearing unit condition and its isolation (roller cone bits), or simply a mark for a non-existing bearing unit (in PDC bits). The sixth parameter is important as it is based on the total working hours for any drill bit and is evaluated with specific tools. The seventh column is similar to the third one and marks any other dull characteristics. The final one is the reason for pulling the bit out of hole and replacing it. This may be a planned or an emergency type of operation (Rabia, 2002).

Nature of the conducted research

During the research, five drilling parameters were observed for a period of 5-6 years and for 22 different types of drill bits drilling in different lithological and technical environments: nominal OD [D, m], total drilling meters [∑M], total working hours [∑h], average WOB [T, t], and average RPM [min^{-1}] (Table 2).

In order to receive as authoritative results as possible, only new bits were included in the research and calculations with current dull characteristics were performed during the pulling out of the hole.

The percentage column (Dull grade, %) in Table 2 is the outcome of an important transformation operation. This transformation is made based on the bit condition and is viewed as uniting all the eight parameters from the bit dull grading chart.

Table 2. *Drill bits collected data*

Drill bits data		Drilling parameters				Dull grade, [%]
D, [mm]	№	∑ m	∑ drill, hours	WOB, [t]	RPM, [min^{-1}]	
444.5	5251384	350	89.00	9	40	20
444.5	226375	159	55.50	8	65	15
444.5	5215330	161	114.67	18	50	18
444.5	5231059	155	88.33	16	65	15
444.5	226376	303	133.00	21	75	33
444.5	226832	114	79.92	20	85	20
444.5	5199057	129	121.03	21	100	25
444,5	7022334	326	117.80	7	100	35
444.5	5257123	291	371.25	6	85	32
444.5	218786	39	76.75	6	75	8
311.2	5231642	380	137.80	18	60	35
311.2	5231641	463	147.50	18	55	38
311.2	5231636	52	42.25	18	55	30
311.2	E203421	472	239.75	3	95	20
215.9	227404	20	65.33	9	90	8
215.9	5231977	129	99.75	18	55	20
215.9	N/A	269	136.51	12	75	25
215.9	HP5011	148	188.00	12	85	15
215.9	8685B	8	72.75	4	65	8
215.9	123326	174	37.50	6	85	25
152.4	5248491	238	185.75	8	90	20
149.2	5212575	59	82.18	8	100	6

Last but not least, it is important to emphasise that bit dull grading is affected by one unregulated parameter – the rock formations the bit is drilling in. This suggests for an insignificant error in the statistical model, since the formations cannot be chosen, changed, or regulated.

Dull grading models and analyses

Using the STATGRAPHICS software and in accordance with other researchers' work (Durchev & Minin, 2023), experimental models are brought out showing the connection between dull grading [i, %] and the other drilling parameters (Nedyalkov, 2019).

For research purposes, two regression models are viewed (Tables 3 and 4, respectively).

The first regression model (including a constant) is as follows:

$$i = -0.67 + 0.004*D + 0.006*h + 0.05*M + 0.04*RPM + 0.65*T \quad (1)$$

According to Table 3, the multiple correlation coefficient R^2 is 64.0845 %, and the adjusted one R^2 is 52.8609 %, which is relatively low and inappropriate. The ***P-criteria*** is the so-called **trusted probability** and its critical value is **0.05.** Thus, it is below minimum for all parameters except **∑M** and **T**, but is higher for the constant itself, therefore the model is inadequate.

Table 3. *Model parameters including a constant*

Parameters	Value	Standard error	T-statistics Student		P criteria
Constant	-0.67	9.37	-0.07		0.94
D, m	0.004	0.013	0.30		0.77
∑h, hours	0.005	0.025	0.22		0.83
∑M	0.046	0.0129	3.54		0.003
T, t	0.65	0.2603	2.51		0.023
RPM, min^{-1}	0.039	0.0907	0.44		0.67
	Sum of model squares	Freedom degrees	Average model squares	F criteria	P-importance
Model	1233.8	5	246.8	5.71	0.003
Residue	691.5	16	43.2		
Total	1925.3	21			
Multiple correlation coefficient				64.08 %	
Adjusted multiple correlation coefficient				52.86 %	
Standard error				6.57	
Average absolute error				4.32	
Durban-Watson statistics				1.81	
Residual auto-correlation				-	

Table 4 views the non-constant version of the model.

Table 4. *Model parameters excluding a constant*

Parameters	Value	Standard error	T-statistics Student		P criteria
D, m	0.004	0.0117	0.31		0.76
∑h, hours	0.0056	0.0239	0.23		0.82
∑M	0.046	0.0123	3.72		0.002
T, t	0.65	0.228	2.83		0.01
RPM, min^{-1}	0.034	0.0503	0.68		0.51
	Sum of model squares	Freedom degrees	Average model squares	F criteria	P-importance
Model	11317.3	5	2263.5	55.6	0.000
Residue	691.7	17	40.7		
Total	12 009	22			
Multiple correlation coefficient				94.24 %	
Adjusted multiple correlation coefficient				92.89 %	
Standard error				6.38	
Average absolute error				4.32	
Durban-Watson statistics				1.79	
Residual auto-correlation				-	

The result model is as follows:

$$i = 0.0036*D + 0.0056*h + 0.046*M + 0.034*RPM + 0.65*T \quad (2)$$

Similar to the previous case, only ∑M and T are with a trusted probability below 0.05. However, R^2 is higher: 94.2401. Standard and absolute error are close in values. This model can be considered adequate as the adjusted R^2 is a little more than 92%.

Conclusions

The following conclusions are made based on the executed research work:

- Drill bits dull grading is a complexed process, whose numerical value is dependent on several parameters;
- The most important drilling parameters that affect dull grading are total working meters ∑M and average weight-on-bit T;
- The drilled rock formations have significant influence on dull grading, but from both statistical and technological points of view, cannot be controlled or replaced.

References

Durchev, V., Minin, Iv. (2023). Main parameters of cutting marble, granite, limestone, technical stone, ceramics, and porcelain by the use of diamond segmented disks. *Annual of the University of Mining and Geology, 66*. LXVI International Scientific Conference, Sofiya, 208-211.

Nedyalkov P. (2019). *Nadezhdostno modelirane v minno-obogatitelnata tehnika*, Sofiya, Avangard Prima. ISBN: 978-619-239-270-3

Rabia, H. (2002). Well Engineering & Construction, PennWell, USA. https://pdfcoffee.com/qdownload/well-engineering-amp-construction-by-hussain-rabia-pdf-free.html

BOREHOLE TRAJECTORY CONTROL: TECHNOLOGIES AND METHODS FOR ACCURATE ORIENTATION IN EXPLORATION DRILLING

Boris Patchejieff, Dobromir Netsov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: b.patchejieff@mgu.bg, d.netsov@mgu.bg

ABSTRACT. The growth of mineral resources exploration and the fast pace of development of directional drilling technology, along with borehole surveying difficulties, are challenges to the correct execution of the borehole path and the target reach. The subject of analysis in the current paper are the methods used in technical resources of exploration borehole positioning, the following trajectory control and successful reach of the desired target diameter of the engineering task. In particular, the following are discussed: the setup according to a given geodetic datum, and the precise borehole surveying according to a correct reference point, technique and technology. Six methods of curve description are listed. The method chosen for the calculations is the minimum curvature method for intensity and linear extrapolation, and the results are presented in a tabular form.

Key words: directional, deviation, geodesy, extrapolation.

КОНТРОЛ НА ТРАЕКТОРИЯТА НА СОНДАЖИ: ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДИ ЗА ПРАВИЛНО ОРИЕНТИРАНЕ В ПРОУЧВАТЕЛНОТО СОНДИРАНЕ

Борис Пачеджиев, Добромир Нецов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Ускореното проучване за минерални ресурси и бързото развитие на технологията за проучвателно наклонено-насочено сондиране, заедно с трудностите при измерването на пространственото положение на сондажите, се явяват предизвикателства за правилното определяне на траекторията на сондажа и попадането в неговата целева зона. В настоящия доклад са анализирани методите, използвани в техническите средства за позициониране на проучвателния сондаж, последващото проследяване на траекторията и успешното достигане до инженерната цел в планираната целева зона. В частност се разглеждат: точното задаване по конкретен геодезистки модел и прецизното измерване на сондажа според правилната референтна точка, техника и технология. Изброени са 6 метода на описване на криви, като конкретно е избран да се използва методът на минималната крива за описание на интензитет и линейна екстраполация, а резултатите са изобразени таблично.

Ключовидуми: насочено, отклонение, геодезия, екстраполация.

Introduction

Building on a previous study, where a survey interval of 30-50 is sufficient for borehole trajectory monitoring, a proper setup of a borehole and optimal deviation control afterwards, during the actual drilling, is a crucial part of any borehole execution. In many cases, the exact path of the boreholes is not accurately known, making it uncertain whether they follow the intended trajectory.

This is a complex of knowledge about setting up the drilling rig, borehole surveying, and planning. This study continues a previous work of the authors' on borehole survey interval optimisation, extending to an analysis on surveying technique and trajectory evaluation. In this paper, the basics of borehole setup and deviation control will be covered, along with several examples of what impact it makes if technological resources are not used correctly.

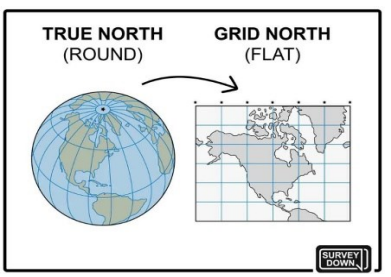


Fig. 1. True North/Grid North
(Source: https://www.surveydown.com/which-ways-north)

The actual shape of the Earth is best approximated by a geoid, which represents an equipotential surface of the Earth's gravity field. For practical calculations, this surface is simplified using a reference ellipsoid, most commonly defined within the World Geodetic System 1984 (WGS84) (Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Given its irregularity, it is too complex to make calculations on it; therefore, a theoretical model is used, called Ellipsoid, to match the actual surface of the Earth in order to make calculations. Therefore, a geodetic datum is used in order to bring the Ellipsoid to the reality as one of the common ones used is the World Geodetic System 84 (WGS 84). Knowing the starting point of reference is crucial for proper borehole planning.

Fig. 2. The Null
(Source: https://mapscaping.com/)

Coordinate systems used in borehole positioning can be classified as geocentric, geographic, and projected systems, each serving a specific role in spatial referencing and mapping (Torge, 2001):

- Geocentric – they use the X, Y, Z from the centre of the Ellipsoid (i.e. The Null, Fig.3);
- Geographical – they use Latitude, Longitude, and Height; Projection – they using Easting Northing and Elevation in meters. (Jamieson, 2012).

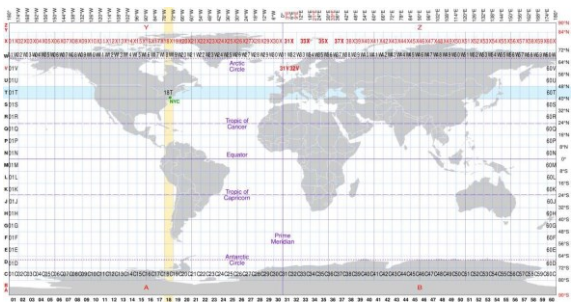


Fig. 3. Universal Transverse Mercator coordinate system

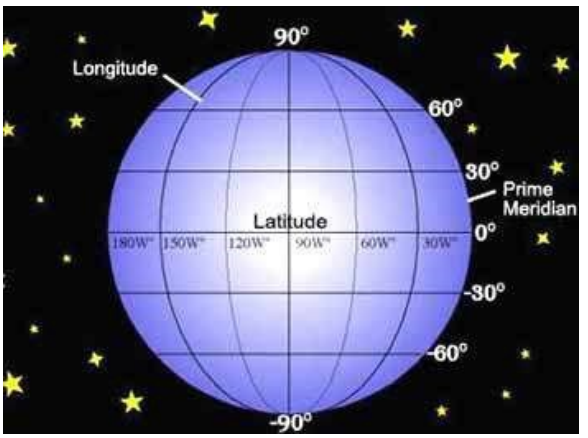


Fig. 4. Grid Coordinate system

Since a reference map is used, several other definitions will be given:

Defining the types of north and their differences is of fundamental importance. As the Earth has a geographic field and magnetic field, both fields have North. True North is the geographic field’s north, and Magnetic North is that of the magnetic field. The difference between True North and Magnetic North varies over time due to changes in the Earth's magnetic field, requiring continuous correction using magnetic declination models (NOAA, 2023). Grid North, on the other hand, is the one on the map we are using. It varies between 0 and 3 degrees, depending of the location of the borehole position (Fig. 5). Hence, this paper will examine how that affects the borehole trajectory.

As the geoid has an irregular form and the map is the Earth stretched in a rectangle, there is a difference between the models. Therefore, the technological resource used in order to set up a survey needs a borehole to be set up into the correct north as it differs related to the location of the hole. Failing to apply that, the trajectory tolerance may result in an unsuccessful engineering task.

The Azimuth gives us the horizontal direction compared to the north. The interpretation of geophysical data is strongly dependent on measurement accuracy and proper spatial referencing, as variations in subsurface properties may lead to misinterpretation of structural conditions (Tomova et al., 2025).

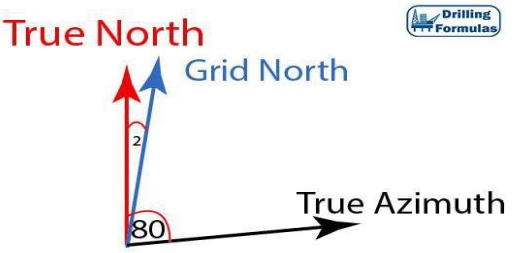


Fig. 5. The three types of North
(Source: drillingformulas.com)

Quality control in borehole surveying

After the correct set up of the borehole, the key part of the successful borehole completion is the correct borehole surveying. Geographic and magnetic methods are used to determine the spatial position and curvature of the borehole at depth, forming the basis for trajectory control and geological interpretation (Dimovski, 2007).

There are two main types of survey tools used depending on the surrounding factors, which have a similar working principle.

1. Gyroscopic tools (Fig. 6) – they use the geographic field as a reference and are subdivided into: North seekers and reference tools, where Azimuth is set up manually. North seekers find their reference themselves, whereas the other type should be manually set according to the data available about the Azimuth value.

Fig. 6. Gyroscopic survey tool

2. Magnetic survey tools, similarly, use the Geomagnetic field as a reference; therefore, the magnetic declination must be added/subtracted. It is set to measure the total magnetic vector in nanoteslas (nT), an amount sensitive enough to note a disturbance in the measurements.

Both methods of surveying (the geographic and the magnetic methods) will give incorrect data if wrong datum is used. Also, the method and interval of the borehole surveying gives a different borehole model regarding the survey interval or method of single-, multishot, and continuous plus survey overlap when multiple. Gyroscopic survey tools reduce the overlap of station, which results in more precise borehole trajectory. The closer the north – which is their reference point – the more the likeliness of incorrect data is.

Linear exploration examples

Six main methods are used to describe the trajectory of a borehole:

- Tangential
- Balanced Tangential
- Minimum Curvature

- Average Angle Method
- Spline Method
- Radius of Curve.

In the linear extrapolation example, the Minimum Curvature Method is used. As Grid North can vary ±3°, the study is set with a 1° step to up to 3° as error factor in the extrapolations. The example of a vertical hole and an inclined hole is to express the function of the effect of the setting and surveying of a borehole with negligible difference in the Azimuth value.

Borehole 1 in Table 1 is 750 meters in depth with setup inclination of -51.1° and Azimuth of South-East 153°. Thus, the further from the vertical, the bigger impact small deviations of the Azimuth will have compared to the situation when they are closer to the vertical holes.

Special cases of experienced significant natural deviation higher than DLS 1-2 will not be discussed. The survey interval is normally set between 30-50 meters. The focus here is more on the correct setup of the drill rig, in order to drill along the correct trajectory and hit within the target diameter. The first step of setting the borehole correctly is crucial for the other steps following, e.g. borehole surveying. Accurate borehole trajectory control contributes both to achieving geological objectives and maintaining safe drilling operation, particularly in areas containing existing or abandoned mine workings. The redevelopment of previously operated mining projects further increases the need of reliable mapping of underground infrastructure and accurate borehole positioning during deposit evaluation and subsequent drilling activities

Borehole 1 has a specification: 750 meters design depth, -51.1° inclination, and 153° azimuth. Target diameter would not be used, as only differences of the trajectory and the target will be calculated through linear extrapolation.

Table 1. *Extrapolation data from hole 1*

Depth (m)	3D distance with linear extrapolation (m)		
	1°	2°	3°
200	2.2	4.4	6.6
350	3.8	7.6	11.5
500	5.4	10.9	16.4
750	7.5	15.2	23.2

Borehole 2 has specifications: 1172 m design depth, -87.43° dip, and 141°. The aim is to investigate the significance of inclination regarding the sensitivity of the Azimuth which affects the trajectory.

Table 2. *Extrapolation data from hole 2*

Depth (m)	3D distance with linear extrapolation (m)		
	1°	2°	3°
200	0.11	0.26	0.41
400	0.30	0.62	0.93
600	0.35	0.78	1.24
1172	2.95	3.18	3.77

The distance between two points is calculated 3-dimensionally (https://unacademy.com/content/nda/study-material/mathematics/analytical-geometry-three-dimensions-distance-between-two-points/).

Both boreholes are examined with 3 different scenarios according to the probability of a faulty orientation and incorrect surveying. In **borehole 1**, the inclination is set to be -51.1° from the horizontal plane of the Earth. The purpose is to express the function of the sensitivity of the Azimuth accuracy related to the Inclination of the boreholes. Using the linear extrapolation from each Measured Depth, an arithmetic progression of the deviation of the planned trajectory is obtained and target diameter with an estimated step the difference in distance of Azimuth deviation of 1°. As normally the target diameter is 10% of the total depth, typically 10-20 meters, this proves that improper setting of the borehole might make it impossible to reach it. Therefore, unknowingly ending up with unreached targets results in possible higher cost per value of the drilling program, hitting mining chambers, or in case of infrastructure geotechnical projects, messing up with pipes, cables, or unwanted areas of crucial significance.

In borehole 2, the lesser significance of the Azimuth accuracy according to the projected borehole path is expressed. The difference calculated with a step of a 1° difference of the Azimuth with three examples expresses an arithmetic progression with an average step of the difference in distance with 1 degree Azimuth. Given the deeper target location, it ends up with a difference of 3.77 m compared to 23.2 m at a depth of 750 m for borehole 1.

Conclusion

The results indicate that survey interval cannot compensate for orientation errors. Deriving from the calculated data from both boreholes, it can be concluded that the correct setup followed by surveying is of high significance in order to execute a borehole program correctly and free of risky events. As for the advancement of technology of all types of drilling, knowledge of multiple disciplines is required in order to advance collaterally.

References

Dimovski, S. (2007). *Rakovodstvo za prakticheski zanyatiya po sondazhna geofizika*. Sofia.

DrillingFormulas. (n.d.). *Minimum curvature method*. Retrieved from: https://www.drillingformulas.com/minimum-curvature-method/

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2001). *GPS Theory and Practice*. Springer.

Jamieson, A. (2012). *Introduction to wellbore positioning.* University of the Highlands and Islands, 247 p.

MapScaping. (n.d.). A podcast for the geospatial community. Retrieved from https://mapscaping.com/

NOAA (2023). *World Magnetic Model (WMM)*. National Oceanic and Atmospheric Administration.

SurveyDown. (n.d.). *Which way is north?* Retrieved from https://www.surveydown.com/which-ways-north

Tomova, M., Kisyov, A., & Tsankov, C. (2025). *Geophysical monitoring of Chelopech tailings storage facility using electrical resistivity tomography*. Review of the Bulgarian Geological Society.

Torge, W. (2001). *Geodesy*. Walter de Gruyter.

APPLICATION OF CLAY-FREE DRILLING FLUIDS IN HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING FOR TRENCHLESS INSTALLATION OF UNDERGROUND INFRASTRUCTURE

Petyo Toshev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: p.toshev@mgu.bg

ABSTRACT. The use of clay-free drilling fluids in the construction of horizontal directional drilling (HDD) for trenchless installation of underground infrastructure represents a modern technology applied in the execution of small- to medium-diameter boreholes (gas pipelines, water pipelines, fiber-optic cables, etc.) in urban environments, as well as in projects located within environmentally sensitive areas. The application of clay-free drilling fluids in the field of horizontal directional drilling ensures high productivity of the drilling process, minimal environmental impact, and the possibility for treatment and recycling of the used drilling fluid. This technology allows for the execution of boreholes in hard, medium, and soft geological formations, while providing reliable stabilisation of the borehole, efficient transport of drilled cuttings (borehole cleaning), reduction of friction between the drill string and the borehole walls, cooling of the drill string, as well as inhibition and stabilisation of water-sensitive formations.

Key words: horizontal directional drilling (HDD), clay-free drilling fluid.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА БЕЗГЛИНЕСТИ ПРОМИВНИ ТЕЧНОСТИ ПРИ ПРОКАРВАНЕ НА ХОРИЗОНТАЛНО НАСОЧЕНИ СОНДАЖИ ЗА БЕЗИЗКОПНО ПОЛАГАНЕ НА ПОДЗЕМНА ИНФРАСТРУКТУРА

Петьо Тошев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Използването на промивни течности на безглинеста основа при прокарването на хоризонтално насочени сондажи за безизкопно полагане на подземна инфраструктура е съвременна технология при прокарването на сондажи с малък до среден диаметър (газопроводи, водопроводи, оптични кабели и др.) в градски условия, както и проекти в рамките на екологично чувствителни райони. Използването на безглинести промивни течности в сферата на хоризонтално насоченото сондиране (ХНС) осигурява висока производителност на сондажния процес, минимално въздействие върху околната среда, както и възможност за очистване и рециклиране на вече използвания сондажен разтвор. Технологията позволява прокарване на сондажи в твърди, средни и меки геоложки формации, като осигурява надеждно укрепване на сондажния ствол, транспортиране на разрушения материал (очистване на сондажа), намаляване на триенето между сондажния инструмент и стените на сондажа, охлаждане на сондажния инструмент, инхибиране и стабилизиране на водочувствителни формации.

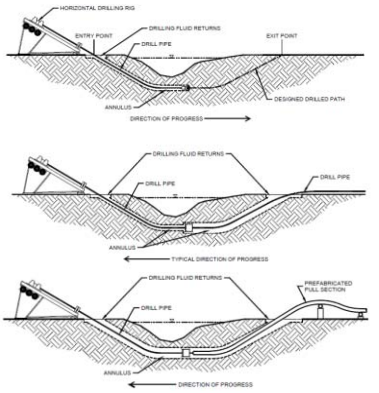
Ключови думи: хоризонтално насочено сондиране (ХНС), безглинести промивни течности.

Въведение

През последното десетилетие безглинестите промивни течности намират все по-широко приложение в сферата на хоризонтално насоченото сондиране (ХНС). Завишените екологични изисквания поставят под въпрос използваните до момента технологии като в същото време се търсят по-ефективни материали и методи за оптимизация на процесите. Използването на безглинести промивни течности в голяма степен отговаря на съвременните изисквания за сондиране в градски условия и по-специално при прокарване на сондажи с малък диаметър. Те осигуряват по-висока производителност на сондажния процес, минимално въздействие върху околната среда, както и възможност за очистване и рециклиране на вече използвания сондажен разтвор. В настоящата статия са разгледани основните принципи за прокарване на хоризонтално насочени сондажи, факторите, влияещи върху избора на промивни течности, основни типове и реагенти, използвани в областта на ХНС, както и основни принципи при рециклирането на използваните разтвори. Разгледани са основните рецептури за приготвяне на разтвори на безглинеста основа, предимствата им спрямо бентонитовите разтвори, както и сферите им на приложение в областта на ХНС.

Хоризонтално насочено сондиране (ХНС), методология и функции

Това е най-разпространеният безизкопен метод за полагане на подземна инфраструктура, като тръбопроводи (газопроводи, ВИК инфраструктура), кабелни трасета и др. Методът дава възможност за минимално нарушаване на земната повърхност, а оттам и намаляване на въздействието върху околната среда и оптимизиране на строително-монтажните разходи. Това прави ХНС един от най-високо ефективните методи за изграждане на подземни инженерни съоръжения. Методът е особено ефективен при прокарване на подземна инфраструктура под пътища, реки, тротоари или гъсто застроени градски райони и др., където изкопните дейности биха причинили сериозни затруднения и неудобства. ХНС включва изпълнение на прецизно контролиран пилотен сондаж по предварително проектирана траектория (посока и наклон), като позволява надеждно управление и преминаване под препятствия, като пътна инфраструктура, водни обекти и съществуващи инженерни мрежи (Bergstrom H, et al., 2024). След изпълнение на пилотния сондаж, посредством разширителни инструменти (разширители), поетапно се увеличава диаметърът на сондажния отвор до достигане на проектния такъв В последващ етап се извършва изтегляне на тръбопровода или съответния елемент през вече проширения сондаж (фиг. 1) (Arumsari P, Tanuwijaya E., 2021).



Фиг. 1. Принципна схема за прокарване на хоризонтален сондаж за полагане на подземна инфраструктура

При необходимост при преминаване под “чувствителна” инфраструктура, като водонаситени зони или пътна инфраструктура, се извършва запълване на образуваното извънтръбно пространство с различни тампонажни смеси. Това се прави с цел предотвратяване на движението на по-горестоящите пластове, както и за чисто хидравлично изолиране (Nachman D. et al., 2021).

Основният фактор за успех на проектите по ХНС е свързан с правилния подбор на промивна течност. При ХНС е налице постоянно натоварване от горележащите пластове, обусловено от теглото на почвата, скалния масив, присъствие на подземни води. В тази връзка параметрите на промивните течности (тип, състав, взаимодействие/реакция с геоложката среда) са от съществено значение за скоростта на сондиране, въздействието върху околната среда и устойчивостта на сондажния отвор по време на изпълнение.

Основните функции на промивната течност при прокарване на ХНС са: очистване на забоя и извънтръбното пространство от просондирания материал или шлам; охлаждане на скалоразрушаващия инструмент; укрепване на стените на сондажа и образуване на тънка, здрава и непроницаема филтрационна кора; изолиране на различни формации една от друга; предотвратяване на загуби, а също и притоци на пластови флуиди в промивна течност при преминаване на нестабилни зони и формации; удържане на шламовите частици; участие в разрушаването на забоя; задвижване на забойни двигатели; намаляване на триенето между сондажния инструмент и стените на сондажа (Аризанов В.П. и Янакиева С.Г, 1986).

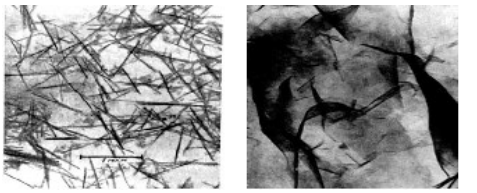
Промивни течности в ХНС, типове и реагенти за приготвяне

Съществуват множество фактори, които влияят върху избора на промивна течност при прокарването на ХНС (Andelman E) . Най-важните от тях са:

- *Параметри на изработката/сондажа (дължина и диаметър*). В повечето случаи, това е един от основните фактори, определящи типа на промивна течност, която ще бъде използвана. При големи диаметри и дължини на изработките използването на полимерни (безглинести) разтвори не е най-правилната технология от гледна точка осигуряване на стабилността на изработката.
- *Екологични ограничения*. Регулаторни органи налагат все повече ограничения върху състава на сондажния разтвор (от екологична гледна точка), изисквайки използването на екологосъобразни компоненти на разтвора.
- *Цена*. От икономическа гледна точка, бентонитът е с по-нисък разход в сравнение с полимерните (безглинести) разтвори, като същевременно осигурява необходимата стабилност на сондажния отвор. В повечето случаи е необходимо добавянето на полимери към бентонитовата суспензия за постигане на определени параметри (носеща способност, инхибиране на водочувствителни формации, контрол на филтрацията, лубрикация и т.н.).
- Биоразградимост. Биополимерите обикновено се разглеждат като по-екологосъобразни продукти, алтернатива на бентонита, поради тяхната биоразградимост.
- *Регенерация*. Почти всички бентонитови разтвори биха могли да бъдат рециклирани (след очистване на твърдата фаза, върнати обратно в циркулационната система). При не всички безглинести/полимерни системи това е напълно възможно.

За разлика от сондирането за нефт и газ в практиката за прокарване на ХНС са намерили приложение основно два типа разтвори – на основата на глина и такива на основата на полимери (безглинести разтвори).

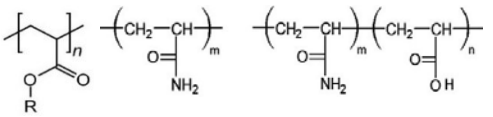
Глинестите разтвори са базирани най-често на основата на монтморилонит, а в някои редки случаи и на атапулгит и много рядко на каолин (фиг.2) (Губанов В.Н., 2006). Промивни течности на основата на бентонитова глина (монтморилонит) са най-разпространени и основно са калциев, натриев и смесен тип в зависимост от преобладаващия тип катиони, което обуславя и съществени разлики в свойствата – набъбване (увеличаване на обема), водосъдържане, пропускливост, пластичност, йонообмен и стабилност. Монтморилонитът има слоеста структура и се характеризира, като “набъбваща глина”. Разтворите на основата на атапулгит са намерили приложение при използване на солена вода за приготвяне на разтвора и при тях се получава т.нар. геолообразна “ненабъбваща” структура поради влакнестият им строеж. В практиката са намерили много ограничено приложение и течности на основата на каолин. По свойства силно наподобяват атапулгитовите глини, с разликата че не образуват геолоподобна структура и следователно без съществено влияние върху вискозитета.



Фиг. 2. Микроскопски снимки монтморилонит (вдясно) и атапулгит (вляво)

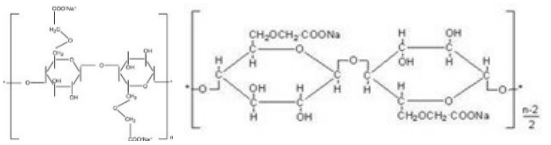
Полимерните разтвори са на синтетична основа (частично хидролизиран полиакриламид, полиакрилат), полусинтетична (полианионна целулоза, карбоксиметил целулоза) и т.нар. биополимери (ксантанова гума, гуар гума, нишесте и т.н.).

Полимерите на синтетична основа (фиг.3) като полиакриламид, частично хидролизиран полиакриламид (PHPA) и полиакрилати се характеризират като нетоксични и слабо до много слабо разложими. Частично хидролизирания акриламид е на основата на модифициран полиакриламид (смес от $–CONH_2$ и $–COO^-$ групи), а полиакрилатите са на основата на акрилова киселина/соли (напълно анионен $–COO^-$). Частично хидролизираният полиакриламид е със смесен заряд (стабилизира и инхибира глини и шисти), докато полиакрилатите са със силно изразен отрицателен такъв (разделя и диспергира глините) (Кистер Е.Г., 1972).



Фиг. 3. Полимерна структура на полиакрилат (вляво), полиакриламид (в средата) и частично хидролизиран полиакриламид (вдясно)

Полусинтетични полимери. Полианионната целулоза (PAC) представлява натурална модифицирана целулоза, с отрицателно заредени групи $–COO^-$. Основно се прилага за контрол на филтрацията, повишаване на вискозитета и стабилизиране на разтворите. Полимерната й структура е представена на фиг. 4.

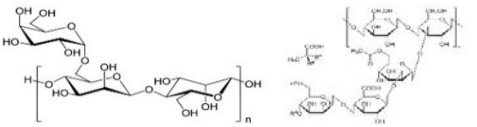


Фиг. 4. Полимерна структура на карбоксиметил целулоза (вляво) полианионна целулоза (вдясно)

Този тип полимери са частично биоразградими (поради химическото модифициране на целулозата, което забавя, но в същото време не отменя процеса на разлагане). Карбоксиметил целулозата (CMC) е друг полусинтетичен полимер, получен чрез химическа модификация на целулоза. Получава се от алкалната обработка на памук или дървесина. Тези полимери контролират филтрацията, но също така и вискозитета. Те са биоразградими (по-бавно разградими от нишестето). С развитието на технологиите през 90-те години на миналия век CMC постепенно загубва позиции спрямо полианионната целулоза, най-вече поради следните недостатъци: слаба разтворимост (в пряка зависимост от температурата), значително по-висока концентрация за постигане на същия ефект и по-малко отрицателни заряди спрямо полианионната целулоза (Fink J.K, 2015) , (Тужиков О.И. и Тужиков О. О., 2016).

Биополимерите са намерили най-широко приложение в ХНС, поради своята биоразложимост, устойчивост в условия на замърсители и способност за подобряване на реологичните свойства на разтворите (Imtiaz A., 2022). Те се произвеждат на основата на растения (целулоза), микроорганизми (бактериална ферментация) и природни захари/ захариди (фиг. 5).

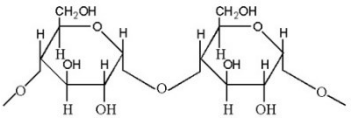
Ксантановата гума е продукт на основата на естествен биополимер – полизахарид, получаван чрез ферментация от бактерията *Xanthomonas campestris*. Произвежда се чрез микробна ферментация. Този полимер позволява да бъде използван, както в комбинация с разтвори на бентонитова основа, така и в чисти полимерни разтвори. Ксантановата гума повишава вискозитета и има псевдопластично поведение и средно до ниско влияние върху филтрацията на разтвора. Тя значително подобрява реологичните свойства на промивната течност (повишава носещата способност) и има висока толерантност към хлориди. Ксантановата гума е напълно биоразградим продукт.



Фиг. 5. Полимерна структура на гуар гума (вляво) и ксантанова гума (вдясно)

Гуар гумата е продукт на основата на естествен биополимер – полизахарид, извлечен от семената на растението *Cyamopsis tetragonoloba*. Получава се при смилане на семената на растението гуар. Също както и ксантановата гума, повишава вискозитета на разтвора (по-слабо спрямо ксантановата гума), както и носещата способност. Този полимер има псевдопластично поведение и няма никакво влияние върху филтрацията на разтворите.

Нишестето е продукт на основата на естествен биополимер - полизахарид, получаван чрез извличане и пречистване на зърна и грудки от пшеница, картофи, тапиока, бобови растения, ориз, царевица и др. Тези полимери обикновено са биоразградими, но понякога се прилагат технологии на модифициране, превръщайки ги в стабилни съединения, устойчиви на температурно и бактериално разлагане (фиг.6). Обикновено се получава т.нар. карбоксиметлирано нишесте или окислено нишесте.



Фиг. 6. Полимерна структура на нишесте

Нишестето влияе основно върху филтрацията на разтвора и има минимално влияние върху вискозитета. То е намерило силно ограничено приложение в сферата на ХНС, като подобно на карбоксиметил целулозата се характеризира със слаба разтворимост, както и с необходимостта от неколкократно по-високите концентрации за постигане на същия ефект върху филтрацията спрямо полианионната целулоза.

Сфери на приложение на безглинести/полимерни разтвори

Безглинестите (полимерни) промивни течности намират все по-широко приложение при ХНС, особено в условия, където традиционните разтвори, базирани върху бентонит, са недостатъчно ефективни или има допълнителни екологични съображения. Те представляват системи, базирани на вода, синтетични полимери,

полусинтетични или естествени биополимери, които осигуряват смазване, охлаждане и транспортиране на сондажния шлам, без да образуват дебела филтрационна кора.

Ключови приложения на безглинестите промивни течности в хоризонтално насоченото сондиране:

- *Сондиране в меки, глинести почви*. Безглинестите течности са силно ефективни при преминаване през реактивни (набъбващи) глини. Полимерите (като PHPA) обвиват глинестите частици, предотвратявайки набъбването и слепването им по сондажния инструмент.
- *Сондиране в здрави и ненарушени формации*. Безглинестите полимерни разтвори осигуряват очистване на разрушения материал, удържане и намаляване на триенето.
- *Екологично чувствителни зони*. Тъй като безглинестите течности често са биоразградими, те се предпочитат при проекти, в които има специално заложени изисквания, свързани с екологични фактори, (напр. сондиране в защитени зони).
- *Сондиране на къси по дължина и относително малки по диаметър сондажи* (напр. за телекомуникации, ВИК инфраструктура и др.). Безглинестите полимери предлагат по-лесно смесване, транспортиране и утилизация, спестявайки време и разходи.

Предимства и недостатъци на полимерните разтвори

Предимства на полимерните разтвори пред бентонитовите разтвори:

- *По-добра смазваща способност*. Полимерите намаляват триенето, което е критично, както при сондиране, така и при издърпване на продуктопроводите.
- *По-малко отпадъци*. При полимерните разтвори се ползва значително по-малко количество продукти, а оттам и съответно се генерират по-малко отпадъци от опаковките спрямо бентонитовите разтвори. В тази връзка има по-ниски логистичните разходи (транспорт, съхранение), както и цялостния обем на отпадъците на обекта.
- *По-ниско работно налягане*. Поради по-добрата си реология в сравнение с бентонита, те често изискват по-ниско налягане на нагнетяване, което намалява риска от аварии (неконтролирано изливане на сондажния разтвор на повърхността - хидроразриви).

Наред с предимствата и удобствата при използването на подобни продукти, следва да се отчита и тяхното приложение само до определени граници. Тези системи са предназначени предимно за ХНС с малък диаметър и относително къса дължина на сондажните изработки. Полимерните (безглинести) разтвори не могат да осигурят образуването на качествена филтрационна кора и тяхното приложение при несвързани и рихли формации е доста въпросително, както от гледна точка стабилност на сондажите, така и загубите на флуид във формациите.

Основни компоненти за приготвяне на безглинестите промивни течности

Полимери за вискозитет и носеща способност – ксантанова гума и гуар гума, в редки случаи се използва и CMC.

Полимери за контрол на филтрацията – полианионна целулоза (PAC) и понякога полимери на основата на нишесте или CMC.

Полимери инхобитори на глини – това са полимери като частично хидролизирания полиакриламид, полиакрилати (PHPA) и др.

Повърхностно активни вещества (ПАВ) – влияят върху прилепване на глини върху сондажния инструмент и по този начин предотвратяват образуването на салнции.

Смазващи агенти – добавки на основата на минерални и синтетични масла и др., които намаляват триенето.

Много често се използват т.нар. “блендове” (предварително смесени продукти, в определени съотношения), които позволяват максимално използване на преимуществата на всеки продукт. Биоразградимите блендове представляват комбинация от ксантанова гума с гуар гума, а в някои случаи и CMC или полианионна целулоза. Небиоразградимите блендове обикновено са на основата на частично хидролизиран полиакриламид (PHPA) в комбинация с полианионна целулоза (PAC) и повърхностно активни вещества. Решението за избор между биополимерни системи или небиоразградима промивна течност зависи от конкретните геоложки условия и екологичните изисквания на обекта. И двата подхода притежават специфични предимства, но също така и ограничения (Duagan G., 2020).

Рециклиране

Процесът на рециклиране представлява очистване на промивните течности, набогатени от просондирания материал/шлам и повторно използване. Това намалява значително разходите, както и отпадъците. Рециклирането зависи от основните съставки, използвани за приготвяне на разтворите. Полианионната целулоза и ксантановата гума (в т.ч. и гуар гума) позволяват рециклиране (до определени граници), както и коригиране на параметрите на разтворите (добавяне на допълнителни реагенти). При частично хидролизирания полиакриламид (PHPA), рециклирането е в пряка зависимост от молекулната маса и дължината на молекулната верига и обикновено рециклиране не е възможно (Anderson M. R., 2013).

При сондиране с биополимери обикновено не се прилага рециклиране, тъй като много често те са обект на разлагане на полимерните вериги под въздействието на биологични, химични и физични фактори, което води до превръщането им в по-прости съединения като вода, въглероден диоксид, биомаса, минерални вещества и др. Факторите, от които зависи процеса на разграждане, са температура, pH на средата, наличие на кислород, микроорганизми, структура на полимера и т.н. Тези процеси биха могли да бъдат забавени посредством добавяване на т.нар. бактерициди, но това прави съединенията частично или не биоразградими. Най-често рециклирането на разтворите преминава през няколко фази – първично отделяне на материал посредством вибросита (очистване на шлам до 74μм), хидроциклони – десандри (очистване на шлам до 44μм) и десилтри (очистване на шлам до 25μм) и в много редки случаи центрофуги (очистване на шлам до около 10μм). Принципна схема на типична система за рециклиране е представена на фиг. 7.

Фиг. 7. Типична система за рециклиране на промивни течности в ХНС

Заключение

Използването на безглинести промивни течности е съвременна технология, която намира все по-голямо приложение в сектора на ХНС. Използването на безглинести промивни течности води до намаляване на количеството продукти за приготвяне на разтворите, по-ниски транспортни разходи за доставката до обекта, по-чиста работна площадка, намаляване на разходите за изхвърляне на отпадъци. Несъмнено има предизвикателства, които са свързани най-вече с рециклирането на промивните течности на безглинеста основа, тяхната устойчивост на биоразграждане по време на сондиране и съответно тяхната утилизация след завършване на проектите. Необходимо е извършването на задълбочен анализ за усъвършенстване на методиката, с увеличаване на ефективността на процесите и нарастващите екологични предизвикателства.

Литература

Аризанов, В., Янакиева, С. (1986). *Промивни течности и циментови разтвори в сондирането*. Техника, София.

Губанов, В., Лопатин, Д., Счев, В. (2006). *Книга инженера по растворам*. Гарусс, Москва.

Кистер, Е. Г. (1972). *Химическая обработка буровых растворов*, Недра, Москва

Тужиков, О. И., Тужиков, О. О. (2016). *Зеленые полимеры*. ВолкГТУ, Волгоград.

Andelman E. Horizontal drilling mud program (https://www.directionaltech.com)

Anderson M. R. (2013). Principles of Solids Control, Trenchless Technologies, Oct 2013

Arumsari, P., Tanuwijaya, E., (2021). Pipeline installation using horizontal direction drilling method (HDD), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021

Bergstrom H., Al-Muhandis N., Abos P. (2024). Fluid Dynamics in HDD: Flow behavior of drilling fluids, Tunneling and Trenchless technology, Taipei 2024

Dugan G. (2020). How to I use bentonite -free polymer HDD Drilling fluids, The driller May 2020 (https://www.thedriller.com/drillingfluids)

Imtiaz, A., Ahmad, M., Arain, H. A., Atashbari, V., Zamir, A. (2022). Drilling engineering and technology- recent advantages new perspectives and applications, Utilization of Biopolymers in Water based drilling muds, Chapter 4, IntechOpen London 2022 1-3

Fink, J. K. (2015). Water based chemicals and technology for drilling completion and workover fluids, Guld Professional publishing Elsevier, Oxford 2015 14-16

Nachman, D., Sousa, R., Xiaoguang, M., Sarkar, D. (2021). Horizontal Directional Drilling, New Jersey Department of Environmental Protection.

INTEGRATION OF LEAK DETECTION SYSTEMS IN HYDROGEN TRANSPORT NETWORKS: TECHNOLOGIES, CHALLENGES, AND PERSPECTIVES

Viliyan Yanakiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: qnakiev91@abv.bg

ABSTRACT. Hydrogen is considered a key energy carrier for a future low-carbon economy. With the growing development of hydrogen infrastructure, there is an increasing need for reliable monitoring systems and early leak detection in transportation networks. This study examines modern technologies for leak detection in long pipeline systems and their applicability to hydrogen transport. Methods, such as mass balance analysis, acoustic sensors, distributed fibre-optic sensing, and intelligent internal inspection devices, are analysed. Particular attention is given to the integration of these technologies into remote control and monitoring systems like SCADA.

Key words: hydrogen, automated control, energy efficiency.

ИНТЕГРИРАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА ОТКРИВАНЕ НА ТЕЧОВЕ ВЪВ ВОДОРОДНИ ТРАНСПОРТНИ МРЕЖИ: ТЕХНОЛОГИИ, ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И ПЕРСПЕКТИВИ

Вилиян Янакиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Водородът се разглежда като ключов енергиен носител за бъдеща нисковъглеродна икономика. С нарастващото развитие на водородна инфраструктура, възниква необходимост от надеждни системи за мониторинг и ранно откриване на течове в транспортните мрежи. Настоящото изследване разглежда съвременни технологии за откриване на течове в дълги тръбопроводни системи и тяхната приложимост при транспортиране на водород. Анализирани са методи като масов баланс, акустични сензори, оптични влакна за разпределено наблюдение и интелигентни вътрешни инспекционни устройства. Специално внимание се отделя на интеграцията на тези технологии в системи за дистанционно управление и мониторинг като SCADA.

Ключови думи: водород, автоматизирано управление, енергийна ефективност.

Въведение

През последните години водородът се утвърждава като един от най-перспективните енергийни носители за постигане на глобалните цели за декарбонизация и устойчиво развитие. В контекста на енергийния преход към нисковъглеродни технологии, водородът предлага значителен потенциал за намаляване на емисиите на парникови газове в сектори като енергетика, транспорт и тежка индустрия. Развитието на водородна икономика изисква изграждането на надеждна инфраструктура за производство, съхранение и транспорт на водород.

Един от ключовите елементи на тази инфраструктура са тръбопроводните системи, които позволяват ефективното транспортиране на големи количества газ на дълги разстояния. Въпреки това, транспортирането на водород поставя специфични технически и експлоатационни предизвикателства. Поради малкия размер на молекулата и високата му дифузионна способност, водородът е по-податлив на изтичане в сравнение с традиционните газове като природният газ. Това налага внедряването на високочувствителни и надеждни системи за мониторинг и ранно откриване на течове.

Съвременните технологии за наблюдение на тръбопроводни системи включват разнообразни методи, като анализ на масов баланс, акустични сензори, системи за разпределено наблюдение чрез оптични влакна и интелигентни вътрешни инспекционни устройства. Интеграцията на тези технологии със системи за дистанционно управление и мониторинг позволява непрекъснат контрол върху състоянието на тръбопровода и бърза реакция при възникване на аномалии.

Настоящото изследване има за цел да анализира съвременните технологии за откриване на течове в тръбопроводни системи и да оцени тяхната приложимост при транспортиране на водород. Специално внимание се отделя на ефективността, точността и възможностите за интеграция на тези технологии в бъдещите водородни енергийни мрежи.

Преглед

Нарастващият интерес към водорода като чист енергиен носител води до засилени научни изследвания в областта на неговото производство, съхранение и транспортиране. Водородът се разглежда като ключов елемент в прехода към нисковъглеродна енергийна система, тъй като има потенциала значително да намали емисиите на парникови газове в сектори като индустрията, транспорта и производството на електроенергия. В резултат на това, развитието на надеждна инфраструктура за транспорт на водород се превръща във важен фокус както на научните изследвания, така и на индустриалните приложения.

Транспортирането на водород чрез тръбопроводи се счита за един от най-ефективните и икономически изгодни методи за пренос на големи количества газ на дълги разстояния. В много случаи съществуващата инфраструктура за природен газ може потенциално да бъде адаптирана за транспортиране на водород, което би могло значително да намали разходите за изграждане на изцяло нови мрежи. Въпреки това, физичните свойства на водорода поставят редица технически предизвикателства. Поради малкия размер на молекулата и високата му

дифузионна способност, водородът има по-голяма склонност към изтичане в сравнение с традиционния природен газ. Освен това водородът може да предизвика процеси като водородна крехкост на материалите, което води до отслабване на металните конструкции и повишава риска от повреди в тръбопроводите.

Поради тези предизвикателства внедряването на надеждни системи за мониторинг и откриване на течове е от съществено значение за безопасната експлоатация на водородните тръбопроводи. Разработени са различни технологии за тази цел. Един от най-широко използваните подходи е методът на масовия баланс, при който течовете се откриват чрез сравнение на количеството газ, което влиза и излиза от тръбопроводната система. Въпреки че този метод е сравнително прост и икономически ефективен, възможностите му за точно локализиране на теча са ограничени.

По-съвременни решения включват акустични системи за мониторинг, които откриват звуковите вълни, генерирани при изтичане на газ от тръбопровода. Друга перспективна технология е разпределеното наблюдение чрез оптични влакна, което позволява непрекъснат контрол върху температурата, вибрациите и акустичните сигнали по цялата дължина на тръбопровода. Освен това широко се използват и вътрешни инспекционни устройства като Smart Pig, които позволяват откриването на корозия, пукнатини и други структурни дефекти в тръбопроводите.

Съвременните системи за мониторинг на тръбопроводи често интегрират няколко метода за откриване на течове в централизирани платформи за управление и наблюдение като SCADA. Тази интеграция позволява наблюдение в реално време, бързо откриване на аномалии и повишаване на оперативната безопасност.

Като цяло съществуващите научни изследвания подчертават значението на комбинирането на различни технологии за мониторинг, за да се осигури надеждно и ефективно откриване на течове във водородните транспортни мрежи. Подобни интегрирани решения се очаква да играят ключова роля в развитието на бъдещата водородна инфраструктура.

Методология

Настоящото изследване използва аналитичен подход за оценка на съвременните технологии за откриване на течове в тръбопроводни системи, предназначени за транспортиране на водород. Методологията се основава на сравнителен анализ на различни методи за мониторинг и детекция на течове, като се разглеждат тяхната ефективност, точност и приложимост при водородни транспортни мрежи.

Метод на масовия баланс

Методът на масовия баланс е един от най-широко използваните подходи за откриване на течове в газопроводни системи. Той се базира на принципа на запазване на масата, според който количеството газ, което влиза в дадена система, трябва да бъде равно на количеството газ, което излиза от нея, като се отчита и промяната на количеството газ в тръбопровода.

Основната формула може да бъде представена по следния начин:

$$Qin - Qout - Delta\ S = L \quad (1)$$

където:

Qin – входящ дебит на газа

$Qout$ – изходящ дебит на газа

$Delta\ S$ – промяна в количеството газ, съхранявано в тръбопровода

L – загуба на газ, която може да бъде индикатор за теч.

Този метод позволява откриването на аномалии в работата на тръбопроводната система чрез непрекъснато наблюдение на параметри като дебит, налягане и температура. Данните се събират чрез измервателни устройства и се обработват от системи за управление и мониторинг.

Акустични методи за откриване на течове

Акустичните системи за детекция на течове се основават на регистрирането на звуковите вълни, които се генерират при изтичане на газ от тръбопровода. При възникване на теч се създават характерни акустични сигнали, които могат да бъдат засечени от специализирани сензори.

Тези системи позволяват бързо откриване на течове и сравнително точно определяне на тяхното местоположение, което ги прави подходящи за използване в дълги тръбопроводни системи.

Наблюдение чрез оптични влакна

Технологиите за наблюдение чрез оптични влакна представляват модерно решение за непрекъснат мониторинг на тръбопроводи. Оптичният кабел се инсталира по протежение на тръбопровода и функционира като разпределен сензор, който може да регистрира промени в температурата, вибрациите и акустичните сигнали.

Този метод позволява наблюдение на цялата дължина на тръбопровода и осигурява висока точност при локализиране на течове.

Вътрешни инспекционни устройства

Друг важен метод за мониторинг на тръбопроводни системи е използването на вътрешни инспекционни устройства като Smart Pig. Тези устройства се движат вътре в тръбопровода и събират информация за неговото техническо състояние.

С помощта на различни сензорни технологии те могат да откриват корозия, пукнатини, деформации и други структурни дефекти, които могат да доведат до бъдещи течове.

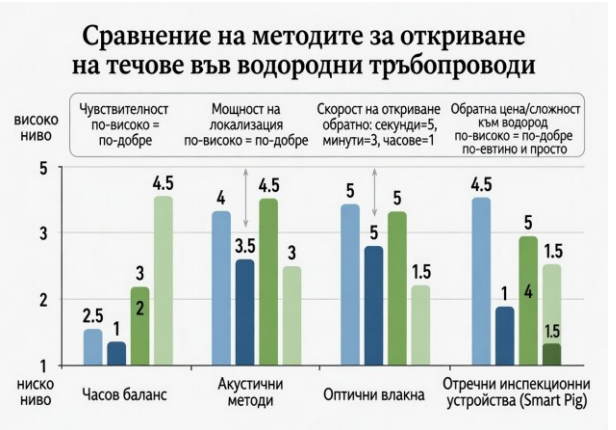
Събраните данни от различните методи могат да бъдат интегрирани в централизирани системи за управление и мониторинг като SCADA, което позволява наблюдение в реално време и по-бърза реакция при възникване на аномалии.

Анализ и сравнение на технологиите

В този раздел се извършва сравнителен анализ на описаните в Методологията методи за откриване на течове във водородни тръбопроводи. Сравнението се базира на ключови показатели за ефективност, които са особено важни за водородните системи:

- Чувствителност (минимален откриваем размер на теча, обикновено в % от номиналния дебит).
- Точност на локализация (разстояние в метри).
- Време за откриване (от момента на възникване на теча до аларма).
- Приложимост към водород (отчитане на ниската плътност, високата дифузия, липсата на цвят/мирис и Joule-Thomson охлаждане при изтичане).
- Податливост към фалшиви аларми.
- Цена и сложност на инсталация/поддръжка.
- Възможност за интеграция в SCADA системи.

Водородът представлява специфично предизвикателство в сравнение с природния газ, тъй като молекулата му е значително по-малка, което води до по-висока скорост на изтичане през малки дефекти, по-голяма проникваемост през уплътнения и по-бързо разсейване в атмосферата. Това изисква методи с висока чувствителност към малки течове (под 1–0.5 %) и бърза реакция.



Фиг. 1. Сравнение на основните методи за откриване на течове във водородни тръбопроводи.

Стойностите са ориентировъчни и зависят от конкретната конфигурация, дължина на тръбопровода, налягане и използване на AI/модели за подобряване.

Специфики при водородни тръбопроводи.

Масов баланс: При водород методът е по-малко ефективен в сравнение с природен газ поради по-ниската плътност и по-високата компресируемост. Транзиентните режими (промени в дебита) генерират по-големи отклонения в \Delta S, което повишава фалшивите аларми. Подобряване се постига чрез Extended Real-Time Transient Modeling (E-RTTM) с pattern recognition.

Акустични методи: Водородът при високо налягане генерира силни турбулентни шумове при изтичане, което улеснява откриването. Въпреки това, бързото разсейване в атмосферата може да намали продължителността на сигнала.

Оптични влакна: Това е една от най-перспективните технологии за водород – Distributed Acoustic Sensing (DAS) открива дори малки течове (под 0.1 %) с точност под 10 m, а Distributed Temperature Sensing (DTS) улавя Joule-Thomson охлаждането при изтичане на H_2. Съвременните системи с машинно обучение значително намаляват фалшивите аларми. Smart Pig: Полезен за превантивен контрол (откриване на водородно индуцирано крехкост/пукнатини), но не замества реално-времевия мониторинг.

Интеграция и хибридни подходи

Най-ефективни са хибридните системи, комбиниращи няколко метода (напр. масов баланс за груб скрининг + DAS за точна локализация + периодични Smart Pig инспекции). Това повишава надеждността, намалява фалшивите аларми и отговаря на строгите изисквания за безопасност при транспортиране на водород.

Резултати и обсъждане

От проведения сравнителен анализ ясно се открояват съществени разлики в ефективността на отделните методи при специфичните условия на водородните тръбопроводи. Както се вижда от колонната диаграма по-горе, оптичните влакна (DAS/DTS) се налагат като най-перспективното решение за непрекъснат мониторинг. Те постигат най-високи стойности по всички ключови показатели – чувствителност под 0,1 %, точност на локализация до 1–10 m и време за реакция от секунди. Това ги прави особено подходящи за новостроящи се водородни магистрали (като European Hydrogen Backbone), където могат да се инсталират още при полагането на тръбопровода. Акустичните методи предлагат отлична алтернатива за съществуващи тръбопроводи, където ретроспективното полагане на оптични кабели е трудно или скъпо. Те осигуряват бързо откриване (секунди) и добра локализация, но страдат от по-висока чувствителност към външен шум, което налага използването на съвременни алгоритми с машинно обучение за филтриране на фалшиви аларми. Методът на масовия баланс остава най-достъпният и евтин вариант, но е недостатъчно чувствителен за малки течове на водород (под 1 %). При водород той е особено уязвим поради високата компресируемост и бързите транзиентни процеси, което води до чести фалшиви аларми. Поради това е препоръчително да се използва само като първи слой в хибридни системи (за груб скрининг). Вътрешните инспекционни устройства (Smart Pig) не са подходящи за реално-времево откриване, но са незаменими за превантивен контрол. Те откриват корозия, водородно-индуцирана крехкост и микропукнатини преди да се превърнат в теч. Идеалното приложение е периодична инспекция (веднъж на 1–3 години) в комбинация с непрекъснат мониторинг.

Общият извод е, че нито един метод самостоятелно не осигурява 100 % надеждност. Най-висока безопасност и минимален риск от неконтролирани емисии на водород се постига при хибридни системи: Масов баланс + акустични сензори за бърза аларма. Оптични влакна за точна локализация и непрекъснат контрол. Периодични Smart Pig инспекции за превантивна поддръжка.

Такава комбинация намалява фалшивите аларми с над 70 % (според данни от пилотни проекти в Германия и САЩ) и отговаря на изискванията на стандарти като ASME B31.12 и EU Regulation on Hydrogen Pipelines.

От гледна точка на приложимост в България, където се планира изграждането на национална водородна мрежа до 2030 г., приоритет трябва да се даде на оптичните технологии при новите трасета, а при съществуващите газопроводи (които ще се конвертират) – на акустични + масов баланс.

Заключение

Настоящото изследване предоставя систематичен преглед и сравнителен анализ на основните технологии за откриване на течове във водородни тръбопроводни системи. От проведения анализ става ясно, че водородът, поради своите уникални физико-химични свойства (висока дифузия, ниска плътност, липса на цвят и мирис, както и Joule-Thomson ефект при изтичане), изисква по-чувствителни, бързи и точни методи за детекция в сравнение с традиционните природен газ. Най-ефективни се оказват оптичните влакна с разпределено акустично и температурно сензиране (DAS/DTS), които постигат висока чувствителност (под 0,1 %), прецизна локализация (1–10 m) и време за реакция от секунди, като същевременно покриват цялата дължина на тръбопровода. Тези технологии са особено подходящи за новите водородни мрежи и се препоръчват като основен метод за непрекъснат мониторинг. Акустичните методи остават добра алтернатива за съществуващи инфраструктури, предлагащи бърза детекция и приемлива локализация, макар и с по-висок риск от фалшиви аларми поради външен шум. Методът на масовия баланс е икономичен и лесен за внедряване, но недостатъчно чувствителен за малки течове на водород и трябва да се използва само като допълнителен слой в хибридни системи. Вътрешните инспекционни устройства (Smart Pig) са критични за превантивна диагностика и откриване на структурни дефекти (корозия, водородно-индуцирана крехкост), но не заместват реално-времевия мониторинг. Ключов извод е, че оптималната безопасност се постига чрез хибридни подходи, комбиниращи няколко метода с интеграция в системи за управление като SCADA и използване на AI за намаляване на фалшивите аларми. Това отговаря на изискванията на международни стандарти (ASME B31.12, EU регулации за водородни инфраструктури) и минимизира рисковете от емисии, пожари и експлозии.

За България, в контекста на националната водородна стратегия и интеграцията в European Hydrogen Backbone, препоръчително е: При новите тръбопроводи – приоритет на оптични влакна; При конвертиране на съществуващи газопроводи – акустични методи + подобрен масов баланс;

Задължителни периодични инспекции с вътрешни устройства; Инвестиции в обучение, AI-базирани системи и пилотни проекти за валидация.

Бъдещите изследвания трябва да се фокусират върху: Разработване на AI/ML модели за по-точна обработка на данни от хибридни системи; Тестване на методите при реални условия с високи концентрации на водород (над 50 % в H2NG смеси); Оценка на дългосрочната надеждност и икономическа ефективност при мащабни мрежи.

С успешното внедряване на тези технологии водородът може да се превърне в безопасен и надежден енергиен носител за декарбонизацията на икономиката.

Литература

БДС 14397-89 – Техника на безопасността съдове, работещи под налягане основни изисквания към конструкцията.

БДС 12961-83 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане. Изисквания към предпазните клапан.

БДС 10271-78 Техника на безопасността. Съдове работещи под налягане. Изисквания към бутилките за транспортиране на сгъстени, втечнени и разтворени под налягане газове.

БДС 9222-82 Вентили за бутилки за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 5 до 80 dm3 10. БДС EN1442 +AC Транспортируеми заварени стоманени бутилки за втечнен въглеводороден газ (LPG) за многократно проектиране и производство.

Закон за техническите изисквания към продуктите, обн. ДВ. бр. 86 от 1 Октомври 1999 г. изм. ДВ. бр. 66 от 26 Юли 2013 г., изм. ДВ. бр. 68 от 2 август 2013 г. 2. Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на газовите съоръжения и инсталации за втечнени въглеводородни газове В сила от 23.10.2004 г. Приета с ПМС № 243 от 10.09.2004 г. Обн. ДВ. бр. 82 от 21 Септември 2004 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г.

Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на съоръжения под налягане, в сила от 19.08.2008 г. Приета с ПМС № 164 от 07.07.2008 г. Обн. ДВ. бр. 64 от18 Юли 2008 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г. 4. БДС 8544-88 Бутилки стоманени за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 0,85 до 5.00 dm3. 5. БДС 14399-89 – Техника на безопасността съдове, работещи под налягане изисквания към измервателните уреди.

Hydrogen can be produced by various process technologies. https://www.entsog.eu/hydrogen

Hydrogen Infrastructure Map https://www.h2inframap.eu/

Oil & Gas Journal, International Petroleum News and Technology. https://www.ogj.com/

Pipeline & Gas Journal, International Pipeline & Gas Utility Operations, Design & Maintenance. https://pgjonline.com/

INFLUENCE OF ELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS ON CATHODICALLY PROTECTED GAS PIPELINES

Viliyan Yanakiev, Martin Boyadzhiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: qnakiev91@abv.bg; martinb@mgu.bg

ABSTRACT. Gas transmission systems represent critical infrastructure whose reliability is directly linked to effective corrosion protection. One of the most widely used methods is cathodic protection, where the metal pipe is cathodically polarised by applying an external direct current. Corrosion is an electrochemical process in which the metal oxidises due to current flow between anodic and cathodic regions in the presence of an electrolyte (soil, water). Cathodic protection aims to eliminate these anodic zones through external polarisation.
Modern gas pipelines are often constructed in shared corridors with power lines and railway systems, leading to interactions between electromagnetic fields and cathodic systems. This interaction can result in complex electrochemical phenomena, including accelerated corrosion.

Key words: natural gas, automated control, metering device, energy efficiency.

ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ И ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ ПОЛЕТА ВЪРХУ ГАЗОПРОВОДИ С КАТОДНА ЗАЩИТА

Вилиян Янакиев, Мартин Бояджиев
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Газопреносните системи представляват критична инфраструктура, чиято надеждност е пряко свързана с ефективната защита от корозия. Един от най-широко използваните методи е катодната защита (Cathodic Protection, CP), при която металната тръба се поляризира катодно чрез подаване на външен постоянен ток. Корозията е електрохимичен процес, при който металът се окислява вследствие на протичане на ток между анодни и катодни области в присъствието на електролит (почва, вода). Катодната защита цели да елиминира тези анодни зони чрез външна поляризация.
Съвременните газопроводи често се изграждат в общи трасета с електропроводи и железопътни линии, което води до взаимодействие между електромагнитните полета и катодните системи. Това взаимодействие може да доведе до сложни електрохимични явления, включително ускорена корозия.

Ключови думи: природен газ, автоматизирано управление, измервателно устройство, енергийна ефективност.

Въведение

Газопреносните системи представляват критична инфраструктура, чиято надеждност е пряко свързана с ефективната защита от корозия. Един от най-широко използваните методи е катодната защита (Cathodic Protection, CP), при която металната тръба се поляризира катодно чрез подаване на външен постоянен ток.

Корозията е електрохимичен процес, при който металът се окислява вследствие на протичане на ток между анодни и катодни области в присъствието на електролит (почва, вода). Катодната защита цели да елиминира тези анодни зони чрез външна поляризация.

Съвременните газопроводи често се изграждат в общи трасета с електропроводи и железопътни линии, което води до взаимодействие между електромагнитните полета и катодните системи. Това взаимодействие може да доведе до сложни електрохимични явления, включително ускорена корозия.

Принцип на катодната защита

Катодната защита се реализира чрез два основни метода: галванична (с жертвени аноди), с външен източник на ток (impressed current). При втория метод се подава постоянен ток (DC), който понижава потенциала на тръбата до стойности около –0.85 V спрямо $Cu/CuSO_4$ електрод, което е стандартен критерий за защита.

Основният ефект е: потискане на анодните реакции (разтваряне на метала), създаване на електрично поле в почвата около тръбата, Това поле е стационарно (DC) и намалява с разстоянието от тръбопровода.

Електромагнитни полета около газопроводите

Собствени полета от катодната защита

Катодните станции генерират: електрически полета в почвата и слаби магнитни полета (поради протичащ ток). Тези полета обикновено са нискоинтензивни, локализирани и постоянни. Влиянието им е предимно контролирано и част от нормалната работа на системата.

Външни електромагнитни полета

По-съществено влияние оказват външни източници: високоволтови електропроводи (50 Hz), електрифицирани железници и подстанции. Променливият ток в тези системи създава електромагнитни полета, които могат да индуцират напрежение в тръбопровода чрез индуктивна връзка или проводима връзка. Този процес се нарича AC интерференция.

Механизъм на взаимодействие между AC полета и катодна защита

При наличие на променливо електромагнитно поле възникват индуцирани токове в тръбата. Това води до:

– *Индуцирано напрежение*. Електропроводите могат да индуцират значителни напрежения в тръбопроводите чрез електромагнитна индукция. Фактори за това са разстоянието между трасетата, дължината на паралелно полагане, проводимостта на почвата.

– *AC корозия*. AC-интерференцията е основен фактор за възникване на ускорена локална корозия, известна като AC corrosion. Възниква при дефекти в покритието, локализирана е и може да пробие стената на тръбата. Механизмът ѝ включва: разрушаване на пасивния слой, промяна на pH в интерфейса, нелинейни

електрохимични реакции. Дори при наличие на катодна защита, AC токовете могат да увеличат скоростта на корозия.

– *Влияние върху ефективността на катодната защита*. AC полетата могат да намалят ефективността на CP, да доведат до нестабилен защитен потенциал, да причинят отлепване на покритието. Това води до необходимост от допълнителен контрол и мониторинг.

Блуждаещи токове и електрическо взаимодействие

Блуждаещите токове възникват, когато част от електрическия ток напуска защитената структура и преминава през почвата към други метални обекти. Последствия: корозия на съседни съоръжения, смущения в комуникационни кабели, неравномерна защита. Този процес е особено опасен в урбанизирани зони с висока плътност на инфраструктура

Основни параметри и критерии за оценка

За оценка на влиянието на електромагнитните полета се използват AC напрежение, плътност на AC ток, DC потенциал, съотношение AC/DC. Стандартите препоръчват AC напрежение под 15 V за безопасна експлоатация.

Основният принцип на метода се базира на контролирано изменение на електрохимичния потенциал на защитаваната метална повърхност, така че тя да се превърне изцяло в катод в електрохимичната система. Корозията на металите е резултат от спонтанни анодни и катодни реакции, които протичат в присъствие на електролит. При стоманени тръбопроводи анодната реакция се изразява в разтваряне на желязото. Катодната защита цели да потисне тази реакция чрез подаване на външни електрони към металната конструкция, като по този начин се елиминират анодните зони или тяхната активност се свежда до минимум.

Основният механизъм на катодната защита е промяна на потенциала на металната повърхност в отрицателна посока. Когато потенциалът на стоманата се понижи достатъчно, анодните процеси се прекратяват или значително се забавят. При идеални условия върху повърхността протичат само катодни реакции, най-често редукция на кислород. Така металът се превръща в електрохимично защитен катод.

Катодната защита се реализира чрез два основни подхода:

– *Галванична (жертвена) защита*. При този метод към защитаваната стоманена конструкция се свързва по-активен метал (например цинк, магнезий или алуминий), който играе ролята на анод. Този метал се окислява вместо стоманата. Предимства: проста конструкция; липса на външен източник на енергия; висока надеждност. Недостатъци: ограничен ток на защита; необходимост от периодична подмяна на анодите.

– *Катодна защита с външен ток (Impressed Current CP)*. При този метод се използва външен източник на постоянен ток (DC), който подава електрони към тръбопровода чрез инертни или полупостоянни аноди (например графит, титанови аноди с MMO покритие). Чрез регулиране на тока потенциалът на тръбопровода се поддържа в защитен диапазон. Предимства: висока ефективност при големи системи; възможност за регулиране; подходяща за дълги газопроводи. Недостатъци: зависимост от електрозахранване; по-сложна поддръжка; риск от свръхполяризация.

Един от основните критерии за ефективна защита е потенциалът на тръбопровода, измерен спрямо мед/меден сулфатен електрод. При стандартно приетият защитен потенциал термодинамично се потиска анодното разтваряне на стоманата. Важно е да се отбележи, че този критерий е валиден при отсъствие на значителни влияния от променливи токове (AC интерференция), които могат да изкривят измерванията и реалната защита.

Методи за защита и ограничаване на влиянието

1. *Технически решения* - заземителни системи, дренажни устройства, AC филтри, поляризационни клетки.
2. *Конструктивни мерки* - увеличаване на разстоянието до електропроводи, използване на изолационни фланци, подобряване на покритията.
3. *Мониторинг* - непрекъснат контрол на потенциала, измерване на AC/DC токове, инспекции на покритието.
4. *Разпределение на електрическото поле в почвата.* При работа на катодната защита около тръбопровода се формира стационарно електрическо поле в почвата. Токът протича от анодната система през електролита към защитаваната конструкция.
5. Характеристики на полето - радиално разпространение около тръбата; интензитет, намаляващ с разстоянието; зависимост от съпротивлението на почвата.
6. Това поле е ключово за равномерното разпределение на защитния ток.
7. *Ограничения и влияния на външни фактори*. Ефективността на катодната защита може да бъде повлияна от: електромагнитни полета от електропроводи (AC интерференция), блуждаещи токове от железопътни системи, дефекти в изолационното покритие, нееднородност на почвата. Тези фактори могат да доведат до локални зони на недостатъчна защита или обратна поляризация.
8. *Контрол и оптимизация*. Съвременните катодни системи се управляват чрез постоянен мониторинг на потенциала, автоматична регулация на изходния ток, използване на референтни електроди по трасето, дистанционни системи за контрол и диагностика. Целта е поддържане на стабилна и равномерна защита при променящи се външни условия.

Катодната защита представлява контролирано електрохимично решение за елиминиране на корозията чрез преместване на металната конструкция в катодно състояние. Въпреки своята ефективност, методът изисква внимателно проектиране и постоянен контрол, особено при наличие на външни електромагнитни влияния, които могат да нарушат електрохимичното равновесие.

Анализ на риска

Основните рискове включват ускорена корозия (особено локална), повреди на тръбопровода, опасност за персонала (индуцирани напрежения), отказ на защитната система. Комбинацията от AC и DC ефекти създава сложна нелинейна система, която изисква мултидисциплинарен подход.

Резултати и обсъждане

Извършеният анализ показва, че индуцираното напрежение в газопроводите намалява експоненциално с увеличаване на разстоянието от източника на електромагнитно поле. При разстояния под 20 m се наблюдават най-високи стойности, което създава значителен риск от AC-индуцирана корозия.

В диапазона 20–60 m се отчита съществено намаляване на индуцираните напрежения, но влиянието остава значимо, особено при дълги паралелни участъци. При разстояния над 60–100 m ефектът от електромагнитната индукция е значително отслабен.

Резултатите показват, че не само разстоянието, но и параметри като съпротивление на почвата и качество на изолационното покритие оказват съществено влияние върху риска от корозия.

Анализът потвърждава, че съвместното действие на AC и DC токове води до нелинейни ефекти, които не могат да бъдат оценени чрез стандартни методи за катодна защита и изискват допълнителен мониторинг.

Влияние на електропровод върху газопровод с катодна защита

Разглежда се участък от подземен стоманен газопровод с катодна защита, разположен паралелно на високоволтов електропровод 110 kV. Параметрите на системата са:

- дължина на паралелното трасе: 2.8 km;
- разстояние между трасетата: 15 – 40 m;
- тип катодна защита: с външен ток (Impressed Current CP);
- работен потенциал: –0.95 V ($Cu/CuSO_4$);
- почва – средна проводимост (≈ 50 Ω·m).

При полеви измервания са установени следните ефекти:

- *индуцирано AC напрежение*: средни стойности 10–18 V; максимално измерено напрежение 22 V, което надвишава препоръчителната граница от 15 V. Това показва реален риск както от корозия, така и за безопасността на персонала.
- *повишена плътност на AC ток*: измерена е плътност на AC ток в дефекти на покритието до 80 A/m², което надвишава критичната стойност от ~30 A/m² , след която започва AC корозия
- *локална корозия.* при инспекция (intelligent pig / изкопни проверки) са установени локални питинг корозионни дефекти с дълбочина до 3.5 mm, концентрирани в зоните с най-малко разстояние до електропровода, както и дефекти в изолационното покритие.

Причината за проблема е комбинация от три фактора: електромагнитна индукция (50 Hz), дефекти в покритието и недостатъчно ефективно заземяване. Катодната защита е налична, но не компенсира AC ефекта и създава смесено AC/DC електрохимично поле. Установено е, че при разстояние < 20 m има най-висок риск. При дълги паралелни участъци ефектът се акумулира и стандартният CP критерий (–0.85 V) не е достатъчен сам по себе си.

След анализа са внедрени следните решения:

- *заземителна система (gradient control wires)* за намаляване на индуцираното напрежение;
- *поляризационни клетки* за отвеждане на AC ток без загуба на DC защита;
- *AC дренажни устройства* за контролирано разсейване на индуцирания ток;
- *подобряване на покритието* за намаляване на точките за локална корозия;

В резултат на мерките, AC напрежението намалява под 10 V; AC токовата плътност намалява под 20 A/m²; стабилизира се CP потенциала и не се наблюдават нови корозионни дефекти.

Настоящият пример показва, че дори при наличие на ефективна катодна защита, външните електромагнитни полета могат да предизвикат ускорена локална корозия. Особено критични са случаите на близко и продължително паралелно разполагане на газопроводи и електропроводи. Ефективното управление на риска изисква интегриран подход, включващ както класически методи за катодна защита, така и специализирани средства за ограничаване на AC интерференцията. Анализът на взаимодействието между електромагнитните полета и газопроводите с катодна защита показва, че съвместното въздействие на постоянни и променливи токове създава сложна електрохимична среда с висок риск от локализирана корозия. Особено критични са условията на близко и продължително паралелно разполагане на газопроводи и високоволтови електропроводи, при които индуцираните напрежения и токове могат да достигнат стойности, надвишаващи нормативно допустимите граници. В тези случаи стандартните критерии за катодна защита не гарантират надеждна защита на съоръжението. Реалният експлоатационен опит показва, че AC-индуцираната корозия може да се развие дори при наличие на ефективно функционираща катодна система, което налага преосмисляне на класическите подходи за защита. Ключовият извод е, че катодната защита сама по себе си не е достатъчна при наличие на външни електромагнитни въздействия.

Необходимо е прилагането на интегрирани инженерни решения, включващи: оценка на електромагнитната съвместимост още на етап проектиране; внедряване на системи за ограничаване на AC интерференцията; непрекъснат мониторинг на AC и DC параметрите; използване на интелигентни диагностични и прогнозни модели.

В контекста на нарастващата инфраструктурна плътност и енергийна интеграция, проблемът с електромагнитното влияние върху газопроводите ще става все по-актуален и изисква мултидисциплинарен подход, съчетаващ електротехника, корозионно инженерство и цифрови технологии.

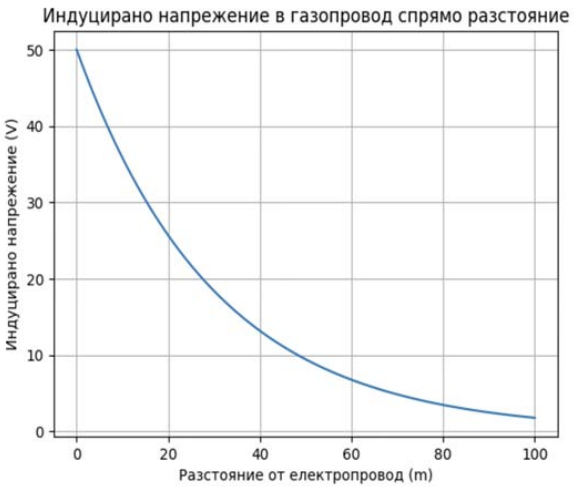
Заключение

Електрическите и електромагнитните полета оказват съществено влияние върху газопроводите с катодна защита. Докато DC полетата от катодните станции имат защитна функция, външните AC полета могат да компрометират тази защита и да доведат до сериозни корозионни процеси.

Най-същественият проблем е AC-индуцираната корозия, която възниква при взаимодействие между електропроводи и тръбопроводи. За нейното ограничаване е необходимо комплексно инженерно решение, включващо проектиране, мониторинг и активна защита.

Развитието на модели за прогнозиране и интелигентни системи за мониторинг е ключово за бъдещото безопасно управление на газопреносните мрежи.

На фиг. 1 е дадена примерна графика, която показва как индуцираното напрежение в газопровод намалява с увеличаване на разстоянието от електропровод. При малко разстояние (0–20 m) индуцираното напрежение е високо, т.е. рискът е най-голям. В диапазона 20–60 m се наблюдава рязък спад, но все още има влияние. Над 60–100 m ефектът става сравнително слаб.



Фиг. 1. Индуцираното напрежение в газопровод

Литература

БДС 10271-78 Техника на безопасността. Съдове работещи под налягане. Изисквания към бутилките за транспортиране на сгъстени, втечнени и разтворени под налягане газове.

БДС 12961-83 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане. Изисквания към предпазните клапан.

БДС 14397-89 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане основни изисквания към конструкцията.

БДС 14399-89 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане изисквания към измервателните уреди.

БДС 9222-82 Вентили за бутилки за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 5 до 80 dm3

БДС EN 1442:2017 Транспортируеми заварени стоманени бутилки за втечнен въглеводороден газ (LPG) за многократно проектиране и производство.

Закон за техническите изисквания към продуктите, обн. ДВ. бр. 86 от 1 Октомври 1999 г. изм. ДВ. бр. 66 от 26 Юли 2013 г., изм. ДВ. бр. 68 от 2 август 2013 г.

Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на газовите съоръжения и инсталации за втечнени въглеводородни газове В сила от 23.10.2004 г. Приета с ПМС № 243 от 10.09.2004 г. Обн. ДВ. бр. 82 от 21 Септември 2004 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г.

Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на съоръжения под налягане, в сила от 19.08.2008 г. Приета с ПМС № 164 от 07.07.2008 г. Обн. ДВ. бр. 64 от18 Юли 2008 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г. 4. БДС 8544-88 Бутилки стоманени за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 0,85 до 5.00 dm^3.

Hydrogen can be produced by various process technologies. https://www.entsog.eu/hydrogen

Hydrogen Infrastructure Map https://www.h2inframap.eu/

Oil & Gas Journal, International Petroleum News and Technology. https://www.ogj.com/

Pipeline & Gas Journal, International Pipeline & Gas Utility Operations, Design & Maintenance. https://pgjonline.com/

СЕКЦИЯ

ДОБИВ И ПРЕРАБОТКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ

SECTION

MINING AND PROCESSING OF MINERALS

A REVIEW OF LANDFILL LEACHATE TREATMENT METHODS

Todor Angelov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: tangelov419@gmail.com

ABSTRACT. Leachate from landfills is a highly polluted liquid generated when atmospheric precipitation and groundwater infiltrate and percolate through municipal solid waste. Its composition varies significantly depending on a number of factors, like the landfill’s age, the nature of the waste disposed of, the region’s climatic conditions, and others. Consequently, leachate often contains high concentrations of organic and inorganic contaminants, heavy metals, ammonium nitrogen, and other potentially harmful substances. This review examines the leachate formation process, its key characteristics, and the types of leachate characteristic of the various stages of operation of landfills. In addition, the environmental impacts associated with leachate pollution are highlighted. Furthermore, major treatment methods, both conventional and advanced, are presented. Finally, recommendations for selecting suitable treatment methods are proposed, taking into account the specific characteristics and type of leachate.

Key words: landfill leachate, treatment methods.

ОБЗОР НА МЕТОДИТЕ ЗА ТРЕТИРАНЕ ИНФИЛТРАТНИ ВОДИ ОТ ДЕПА ЗА ТВЪРДИ БИТОВИ ОТПАДЪЦИ

Тодор Ангелов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Инфилтратът от депата за отпадъци представлява силно замърсена течност, формирана вследствие на просмукването на валежи и подпочвени води през масива от депонирани твърди битови отпадъци. Съставът му варира в значителна степен и зависи от редица фактори, сред които възрастта на депото, типа на отпадъците, климатичните особености на региона, както и от някои други фактори. В резултат на това инфилтратът често съдържа значителни количества органични и неорганични замърсители, тежки метали, амониев азот и други потенциално опасни вещества. Настоящият обзор има за цел да представи анализ на процесите, водещи до образуването на инфилтрат, неговите основни характеристики и типологията на инфилтратите, характерни за различни етапи от експлоатацията на депата за отпадъци. Разгледани са също така екологичните рискове, произтичащи от замърсяването с инфилтрат. Освен това са представени основните методи за третиране на инфилтрат, включващи както конвенционални подходи, така и усъвършенствани технологични решения. Накрая са формулирани препоръки относно избора на най-подходящи методи за третиране, съобразени със специфичните характеристики и типа на инфилтрата.

Ключови думи: инфилтрат от депа за отпадъци, методи за третиране.

Въведение

Депонирането продължава да бъде един от най-често използваните методи за управление на битови отпадъци в световен мащаб, макар че напоследък се полагат все повече усилия за популяризиране на концепцията на кръговата икономика и йерархията на отпадъците включваща ограничаване на образуването им, повторна употреба и рециклиране (Abdel-Shafy & Mansour, 2018; Pires & Martinho, 2019; Yaashikaa et al., 2022).

Трябва да се отбележи обаче, че този метод създава редица екологични проблеми, като сред най-сериозните е генерирането на инфилтратни води (инфилтрат). Инфилтратът представлява течност с комплексен състав, която се образува вследствие на взаимодействието между депонираните твърди отпадъци и атмосферни валежи, повърхностни и подпочвени води, проникващи през тялото на депото. Този състав е доста променлив и се влияе от множество фактори, основните сред които са химичният и морфологичен състав на отпадъците, климатичните условия на района, хидрогеоложките особености на площадката, възрастта, както и методите за експлоатация и управление на депото (Dagwar & Dutta, 2024). Поради тази сложна взаимовръзка инфилтратът съдържа разнообразни органични и неорганични замърсители като летливи органични съединения и феноли, тежки метали, амониев азот, хлориди, сулфати и редица други потенциално опасни вещества (Schwarzbauer et al., 2002; Eggen et al., 2010).

Тези замърсители могат да окажат сериозно въздействие върху околната среда, засягайки най-вече подземните и повърхностните води, почвения слой, флората и фауната, и човешкото здраве (Danthurebandara et al., 2012). Особено тревожно е замърсяването на водните ресурси, тъй като то може да предизвика дълготрайни и трудно обратими ефекти върху качеството на питейната вода и оттам върху екологичното равновесие (Research Clue, 2014).

Освен това, наличието на тежки метали и устойчиви органични замърсители в инфилтрата крие риск от натрупване в живите организми и увеличаване на концентрацията им по хранителната верига. Това е опасно, защото в дългосрочен план може да доведе до хронични здравословни проблеми както при хората, така и при животните.

През годините са разработени редица технологии за третиране на инфилтрат, които включват както конвенционални физикохимични и биологични методи, така и съвременни подходи като мембранни технологии, усъвършенствани окислителни процеси (Advanced Oxidation Processes AOPs), както и различни комбинации от тях (Tu et al., 2020; Xiang et al., 2025). Ефективността на тези методи обаче често зависи от специфичния състав на инфилтрата, нивото на замърсители, pH, температура и дори сезонните колебания.

Всичко това налага необходимостта от дълбоко разбиране на механизмите, които стоят зад образуването и трансформацията на инфилтрата, както и внимателен подбор на подходящ метод за третиране, съобразен с конкретните условия и нормативните изисквания.

Генериране, характеристики и тип на инфилтратните води

Генерирането на инфилтрат в депата за отпадъци представлява сложен процес, който включва едновременното действие на множество физични, химични и биологични механизми (Christensen et al., 1992). В основата на образуването на инфилтрат стоят процесите на биологично разграждане на отпадъците, преминаването на вода през отпадъчния масив и разтварянето на различни химични съединения. В тялото на депото микроорганизмите осъществяват непрекъснато разграждане на органичната материя чрез аеробни и анаеробни процеси (Morling, 2007). В резултат на тяхната метаболитна активност се образуват органични киселини, алкохоли, амоняк и въглероден диоксид.

Тези съединения се разтварят в просмукващата се вода, при което се образува инфилтрат със сложен химичен състав. По време на движението на водата под действието на гравитационните сили и разликите в хидравличния напор, тя разтваря както лесноразтворими вещества, така и съединения, подложени на постепенно разграждане. Образуването на инфилтрат започва, когато влагосъдържанието на отпадъците надвиши тяхната влагоемност, при което излишната течност дренира през отделните слоеве на отпадъчния масив и се натрупва в основата на депото.

От друга страна, хранителните отпадъци, растителните остатъци и други органични материали постъпват в депото с високо съдържание на влага. В процеса на тяхното разграждане се освобождават допълнителни количества вода, които допринасят за генерирането на инфилтрат дори при отсъствие на външни източници на вода. При депа, разположени под нивото на подземните води или в непосредствена близост до него, възходящата инфилтрация на подземни води може да увеличи количеството на образувания инфилтрат.

Освен това биохимичното разграждане на органичната материя води до образуване на вода като метаболитен продукт. Допълнителен принос имат и материалите, използвани за ежедневно запръстяване и рекултивиране на депото, които задържат влага и постепенно я освобождават към инфилтратния поток (Yatoo et al., 2024; Environmental Studies Institute, 2025).

Инфилтратът, образуван в депата за отпадъци, съдържа голямо разнообразие от специфични химични съединения и се характеризира с високи концентрации на разтворени органични вещества (биохимична потребност от кислород - БПК, химична потребност от кислород - ХПК и общ органичен въглерод - ООВ), токсични съединения и метали (El-Saadony et al., 2026).

Освен това той се отличава с интензивно оцветяване, характерен неприятен мирис и повишена мътност, както и с ниски стойности на pH (Wan et al., 2022). Въпреки че съставът на инфилтрата може да варира значително, според възрастта на депонираните отпадъци могат да бъдат разграничени три основни типа инфилтрат (Dong, 2007) (таблица 1).

Таблица 1. *Типове инфилтрат*

Тип инфилтрат	Млад	Междинен	Стабилизиран
Възраст на депото, години	<5	5-10	>10
pH	<6.5	7	>7.5
ХПК, г/л	>20	3-15	<2
БПК/ХПК	>0.3	0.1-0.3	<0.1
ООВ/ХПК	0.3	-	0.4
Органична материя	70-90% Летливи мастни киселини	20-30% Летливи мастни киселини	Високомолекулни съединения
Азот, мг/л ОВ	100-2000		
Метали, г/л	2	<2	<2

Влияние на инфилтратните води върху околната среда

Изтичането и разпространението на инфилтратни води в околната среда може да доведе до замърсяване на почвите, подземните и повърхностните води, като по този начин представлява сериозна заплаха за човешкото здраве и екосистемите (Daniel et al., 2021). Инфилтратът, образуващ се при просмукването на води през отпадъчните маси, се характеризира със сложен химичен състав, включващ тежки метали, органични съединения, антибиотично-резистентни микроорганизми, както и остатъци от фармацевтични продукти и продукти за лична хигиена, които при попадане в хранителната верига или при директна експозиция могат да окажат неблагоприятно въздействие върху човешкото здраве, свързано с токсични, канцерогенни и мутагенни ефекти. Особено сериозен е рискът от замърсяване на водните ресурси вследствие на миграцията на инфилтрат към подземни и повърхностни водоизточници. Наличието на високи концентрации на органични и неорганични замърсители може значително да влоши качеството на водите, включително на източниците за питейно-битово водоснабдяване. Инфилтратът е способен да променя киселинно-алкалния баланс (pH) на водата и да благоприятства образуването на опасни химични съединения, които са с повишен риск за човешкото здраве (Parvin & Tareq, 2021). Продължителната употреба на вода от замърсени водоизточници може да доведе до различни здравословни проблеми, включително нарушения във функциите на черния дроб и бъбреците, както и до повишен риск от развитие на онкологични заболявания. Друг съществен замърсител, често присъстващ в инфилтрататните води е амонякът. Високите концентрации на амониев азот във водните обекти могат да предизвикат процеси на еутрофикация, характеризиращи се с прекомерно развитие на водорасли и други водни растения. Това води до намаляване на концентрацията на разтворен кислород във водата, нарушаване на екологичното равновесие и застрашаване на водните организми. В резултат могат да настъпят масова смъртност на риби, намаляване на биоразнообразието и деградация на водните екосистеми.

Следователно ефективното събиране, контролиране и третиране на инфилтрата от депата за твърди битови отпадъци е от съществено значение за ограничаване на

отрицателните въздействия върху околната среда, опазването на водните ресурси и защитата на човешкото здраве. Прилагането на адекватни методи за третиране на инфилтрат представлява ключов елемент от устойчивото управление на отпадъците и намаляването на екологичните рискове, свързани с тяхното депониране (Bouaouda et al., 2023; Hin et al., 2025).

Конвенционални методи за третиране

Конвенционалните методи за третиране на инфилтрат се основават на утвърдените и широко прилагани физични, химични и биологични техники за пречистване на отпадъчни води (Ahmed et al., 2017; Ahmed et al., 2021; Aziz et al., 2023; Clemente et al., 2024). Физичните техники включват процеси, базирани на механична сепарация или филтрационни механизми, предназначени за отделяне на суспендирани твърди частици и неразтворени вещества. Сред тях най-често се прилагат седиментацията и филтрацията. Седиментацията се основава на гравитационното утаяване на суспендираните частици, което позволява тяхното ефективно отделяне от течната фаза (Bashir et al., 2016). От своя страна, филтрационните техники, използват пореста среда (пясък или активен въглен) за задържане както на суспендираните твърди частици, така и на някои органични съединения. Ефективността на седиментацията по отношение на отстраняването на суспендираните твърди вещества е 50–70%, докато при филтрацията с активен въглен се достигат 85–95% за ХПК и 80–90% за БПК (Wang & Qiao, 2024).

Химичните методи се основават на добавянето на химични реагенти с цел улесняване на процесите на коагулация, флокулация, утаяване, окисление и неутрализация на съдържащите се в инфилтрата замърсители. Тези методи са насочени към повишаване на ефективността на отстраняване на разтворени метали, органични съединения и други замърсители чрез протичане на химични реакции, при които те се трансформират в неразтворими съединения или агрегати, подлежащи на отделяне от течната фаза. Сред най-широко прилаганите химични методи за пречистване са коагулацията и флокулацията, химичното утаяване (преципитация), както и окислително-редукционните процеси. Процесът на коагулация и флокулация включва добавяне на коагуланти, като железен трихлорид или алуминиев сулфат, последвано от въвеждане на флокуланти, предимно полимерни реагенти, с цел стимулиране на агрегацията на суспендираните твърди вещества и колоидните частици в по-едри флокули, които могат лесно да бъдат отделени от инфилтрата (Chen et al., 2024). Чрез коагулация и флокулация могат да бъдат отстранени между 60% и 90% от суспендираните вещества и 50%–70% от ХПК (Wang & Qiao, 2024). Химичното утаяване (преципитацията) се основава на добавянето на реагенти, които взаимодействат с разтворените замърсители и водят до образуване на неразтворими утайки, подлежащи на последващо отстраняване чрез седиментация или филтрация. Този процес е особено ефективен за отстраняване на тежки метали, като се постига степен на отстраняване от 80% до 95% за елементи като олово, кадмий и хром. Окислително-редукционните процеси, включват прилагане на окислители с цел разграждане на органичните замърсители и намаляване на концентрациите на токсични съединения. Например, озонирането може да доведе до намаляване на оцветяването с 80%–90% и до отстраняване на 70%–85% от ХПК (Wang & Qiao, 2024).

Отдухването с въздух (air stripping) е масообменен процес за третирането на инфилтратни води, при който замърсители, като летливи органични съединения (ЛОС) и амоняк, се отстраняват от инфилтрата чрез пропускане на въздух през течността. Процесът се основава на трансфера на замърсители от течната в газовата фаза, като с цел увеличаване на контактната повърхност се използват колони с пълнеж или специални аерационни резервоари. Отдухването с въздух е ефективно, просто за прилагане и предлага висока степен на пречистване (De et al., 2019).

Биологичните методи за пречистване на инфилтрат от депа за отпадъци използват метаболитната активност на микроорганизмите за разграждане на органични замърсители и отстраняване на биогенни елементи. Те включват аеробни и анаеробни процеси, както и изкуствени влажни зони, които осигуряват подходящи условия за микробно разграждане и трансформация на замърсителите.

Аеробните процеси протичат в присъствие на разтворен кислород в резултат на което сложните органични съединения се окисляват до по-прости продукти като въглероден диоксид, вода и нова биомаса. Към най-разпространените аеробни технологии за третиране на инфилтрат се отнасят системите с активна утайка, биофилтрите и мембранните биореактори (Bhambore & Suresh Kumar, 2022; Nuansawan et al., 2023). Освен разграждането на органичната материя, при аеробни условия протичат и процеси на нитрификация, при които амониевият азот се окислява последователно до нитрити и нитрати от специални бактерии.

Анаеробните процеси протичат в безкислородна среда и се осъществяват от различни групи микроорганизми чрез последователни етапи на хидролиза, кисела ферментация и образуване на метан. Крайните продукти от разграждането на органичните вещества са предимно метан и въглероден диоксид, които формират биогаз. Типични примери за анаеробни технологии са UASB-реакторите (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), анаеробните лагуни и анаеробните биореактори с фиксирана биомаса. Тези системи са особено подходящи за третиране на инфилтрати с високи концентрации на органични замърсители, като същевременно позволяват оползотворяване на получения метан като енергиен ресурс. (Beegle & Borole, 2018; Anjum et al., 2023).

Изкуствените влажни зони комбинират растителност, почвен субстрат и микроорганизми за отстраняване на замърсителите чрез физични, химични и биологични механизми. В тях протичат едновременно аеробни и анаеробни процеси в различните слоеве на субстрата, което благоприятства както разграждането на органичните вещества, така и процесите на нитрификация и денитрификация. По този начин се осигурява ефективно намаляване на концентрациите на органични замърсители и азотни съединения (Bakhshoodeh et al., 2020).

По отношение на ефективността, аеробното пречистване достига 70–90% отстраняване на БПК и 60–80% на ХПК, анаеробните системи – 80–90% на БПК и 70–85% на ХПК, а изкуствените влажни зони – 60–80% на БПК,

50–70% на ХПК и 40–60% на амонячен азот (Wang & Qiao, 2024).

Усъвършенствани методи за третираме

Мембранните процеси включват микрофилтрация (MF), ултрафилтрация (UF), нанофилтрация (NF) и обратна осмоза (RO) (Dong, 2007; Yang et al., 2019). При микрофилтрацията и ултрафилтрацията се използва полупропусклива мембрана, която изпълнява ролята на селективна бариера, задържайки разтворени и суспендирани макромолекули, чиито размери не позволяват преминаването им през мембранните пори. Размерът на порите е в диапазона от 0,1 до 10 μm при микрофилтрацията и от 0,005 до 0,1 μm при ултрафилтрацията. Многобройни изследвания потвърждават ефективността на микрофилтрацията и ултрафилтрацията при отстраняването на високомолекулни органични съединения от потоци инфилтрат. Потенциалът за приложение на тези технологии е особено висок при обекти, където инфилтратът се характеризира с наличието на един доминиращ замърсител. Напредъкът в разработването на мембрани с по-висока производителност и повишена химическа устойчивост допринася за утвърждаването на микрофилтрацията и ултрафилтрацията като все по-ефективни и икономически обосновани методи за пречистване.

Обратната осмоза (RO) представлява процес, при който върху инфилтрата се прилага налягане, осигуряващо преминаването му през полупропусклива мембрана. Мембраната пропуска водните молекули, като същевременно задържа по-голямата част от разтворените замърсители. Системите за обратна осмоза могат да постигнат ефективност на отстраняване над 99% за широк спектър от замърсители, което ги прави незаменим елемент в технологични схеми, изискващи високо качество на пречистения изходен поток. Въпреки високата си ефективност, обратната осмоза все още не намира широко приложение при третиране на инфилтрат от депа за отпадъци в голям мащаб. Това се дължи както на чувствителността на мембраните към замърсяване и увреждане, така и на сложния химичен състав и високото замърсяващо натоварване на инфилтрата. Поради тази причина технологията най-често се използва като допълнителен („полиращ“) етап след прилагането на конвенционални методи за пречистване. Обратната осмоза е ефективна при отстраняването на разтворени неорганични вещества, включително метали, метал-цианидни комплекси и други йонни форми, както и на органични съединения с висока молекулна маса, като например пестициди. За осигуряване на надеждна и продължителна експлоатация на мембраните е необходимо предварително третиране на инфилтрата, обикновено чрез комбинация от процеси, включващи филтрация, хлориране, адсорбция върху активен въглен и корекция на pH.

Усъвършенстваните окислителни процеси (AOPs) се характеризират със способността си да генерират силно реактивни частици, най-вече хидроксилни радикали, които разграждат широк спектър от замърсители. Сред най-широко прилаганите AOPs се открояват процесът на Фентън, озонирането и електрохимичното окисление (Wu et al., 2021). Процесът на Фентън се отличава с висока ефективност при разграждането на органични замърсители чрез генериране на хидроксилни радикали в присъствието на железен катализатор и водороден пероксид (Babuponnusami & Muthukumar, 2014). Методът е особено подходящ за третиране на инфилтрат с високо съдържание на трудно разградими органични вещества, като осигурява 75–90% отстраняване на химичната потребност от кислород (ХПК) и 80–95% разграждане на специфични органични съединения (Pliego et al., 2015; El-Saadony et al., 2026). Въпреки високата си ефективност, конвенционалният процес на Фентън е свързан с редица практически ограничения. За оптимално генериране на хидроксилни радикали е необходимо поддържането на киселинна среда (pH 2,5–3,5), което налага корекция на pH както преди, така и след третирането. Това увеличава експлоатационната сложност на процеса и води до по-висок разход на реагенти.

Озонирането използва озон (O_3) като окислител за директно разграждане на замърсителите. Методът е особено ефективен при отстраняването на оцветяване (80–90%), миризми и определени органични съединения. Освен това озонирането повишава биоразградимостта на устойчивите органични вещества, което го прави подходящ предварителен етап преди биологично пречистване. Поради тези предимства технологията намира широко приложение в промишлените инсталации за третиране на инфилтрат, особено като „полиращ“ етап за обезцветяване и дезинфекция (El-Saadony et al., 2026). Основен недостатък на процеса е високата му енергоемкост, тъй като генерирането на озон на място изисква значителни количества електроенергия. Енергийните разходи обикновено са в диапазона 12–20 kWh/kg O_3, което води до експлоатационни разходи от приблизително 1–3 USD/m³ обработен инфилтрат (Tripathi & Hussain, 2022).

Електрохимичното окисление използва електрически ток за окисление на замърсителите върху повърхността на електроди или в обема на разтвора. Чрез механизми на пряко и непряко окисление методът е способен да разгражда широк спектър от замърсители, включително багрила, фармацевтични съединения и сложни органични молекули (da Silva et al., 2021). Процесът е особено ефективен при третирането на инфилтрат от депа за отпадъци с високо съдържание на органични замърсители и амоняк. Прилагането му позволява отстраняване на 75–95% от ХПК и до 90% от амонячния азот, което го определя като перспективна технология за пречистване на силно замърсени отпадъчни води. Допълнителни предимства на метода са неговата оперативна гъвкавост и ограничената необходимост от използване на химически реагенти, въпреки че високата консумация на електроенергия и износването на електродите могат да ограничат икономическата му ефективност при приложение.в по-голям мащаб (Wang & Qiao, 2024).

Заключение

Изборът на подходяща технология за пречистване на инфилтратни води се основава както на възрастта на депото, така и на физикохимичните характеристики на инфилтрата. Инфилтратите от нови депа се отличават с висока биоразградимост и значително органично натоварване, поради което биологичните методи,

включително аеробни и анаеробни процеси, представляват най-ефективното решение. С напредване на възрастта на депото биоразградимостта намалява, а концентрациите на амониев азот и трудноразградими органични съединения се увеличават, което налага прилагането на комбинирани технологии, съчетаващи биологични и физикохимични методи. При стабилизирани инфилтрати от стари депа, характеризиращи се с наличие на трудноразградими органични вещества и устойчиви азотни съединения, водеща роля имат процеси като мембранна филтрация и усъвършенствани окислителни методи. В случаите на наличие на специфични замърсители, като тежки метали и ксенобиотични органични съединения, е необходимо прилагането на специфични техники като адсорбция или йонообмен. Следователно, максимална ефективност на пречистването може да бъде постигната чрез адаптиране на технологичната схема към променящия се състав на инфилтрата през различните етапи от жизнения цикъл на депото.

Литература

Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum, 27*(4), 1275–1290. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003

Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S., & Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials, 323*, 274–298. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.045

Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., et al. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials, 416*, 125912. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912

Anjum, M., Anees, M., Qadeer, S., Khalid, A., Kumar, R., & Barakat, M. A. (2023). A recent progress in the leachate pretreatment methods coupled with anaerobic digestion for enhanced biogas production: Feasibility, trends, and techno-economic evaluation. *International Journal of Molecular Sciences, 24*(1), 763. https://doi.org/10.3390/ijms24010763

Aziz, H. A., Ramli, S. F., & Hung, Y. T. (2023). Physicochemical technique in municipal solid waste (MSW) landfill leachate remediation: A review. *Water, 15*, 1249. https://doi.org/10.3390/w15061249

Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 2*(1), 557–572. https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011

Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., et al. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering, 146*, 105725. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725

Bashir, M. J. K., Ibrahim, N., Ismail, M. N., & Jaya, M. A. (2016). Physical treatment technologies for landfill leachate: Performance and limitation. In H. Aziz & S. Amr (Eds.), *Control and Treatment of Landfill Leachate for Sanitary Waste Disposal* (pp. 250–285). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9610-5.ch011

Beegle, J. R., & Borole, A. P. (2018). Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96*, 343–351. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.057

Bhambore, N., & Suresh Kumar, M. (2022). Municipal solid waste generation, management scenarios, and leachate treatment using sequencing batch biofilter granular reactor. *Process Safety and Environmental Protection, 167*, 454–468. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.027

Bouaouda, S., Souabi, S., Bouyakhsass, R., Taleb, A., Madinzi, A., & Anouzla, A. (2023). Techniques for treating leachate discharges: A critical review. *European Mediterranean Journal for Environmental Integration, 8*, 573–599. https://doi.org/10.1007/s41207-023-00366-2

Chen, H., Xu, H., Zhong, C., Liu, M., Yang, L., He, J., Sun, Y., Zhao, C., & Wang, D. (2024). Treatment of landfill leachate by coagulation: A review. *Science of the Total Environment, 912*, 169294. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169294

Christensen, T. H., Cossu, R., & Stegmann, R. (1992). *Landfilling of waste: Leachate*. Chapman & Hall.

Clemente, E., Domingues, E., Quinta-Ferreira, R. M., Leitão, A., & Martins, R. C. (2024). European and African landfilling practices: An overview on MSW management, leachate characterization and treatment technologies. *Journal of Water Process Engineering, 66*, 105931. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105931

da Silva, S. W., Welter, J. B., Albornoz, L. L., Heberle, A. N. A., Ferreira, J. Z., & Bernardes, A. M. (2021). Advanced electrochemical oxidation processes in the treatment of pharmaceutical-containing water and wastewater: A review. *Current Pollution Reports, 7*, 146–159. https://doi.org/10.1007/s40726-021-00176-6

Dagwar, P. P., & Dutta, D. (2024). Landfill leachate: A potential challenge towards sustainable environmental management. *Science of the Total Environment, 926*, 171668. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171668

Daniel, A. N., Ekeleme, I. K., Onuigbo, C. M., Ikpeazu, V. O., & Obiekezie, S. O. (2021). Review on effect of dumpsite leachate to the environmental and public health implication. *GSC Advanced Research and Reviews, 7*(2), 051–060. https://doi.org/10.30574/gscarr.2021.7.2.0097

Danthurebandara, M., Van Passel, S., Nelen, D., Tielemans, Y., & Van Acker, K. (2012). *Environmental and socio-economic impacts of landfills*. [Publication details unavailable].

De, S., Hazra, T., & Dutta, A. (2019). Sustainable treatment of municipal landfill leachate by combined association of air stripping, Fenton oxidation, and enhanced coagulation. *Environmental Monitoring and Assessment, 191*, 49. https://doi.org/10.1007/s10661-018-7171-8

Dong, Y. (2007). *Landfill leachate treatment case study, SRV Återvinning* (Master's thesis). Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Eggen, T., Moeder, M., & Arukwe, A. (2010). Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants. *Science of the Total Environment, 408*(21), 5147–5157. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.049

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Fahmy, M. A., Mohammed, D. M., Salem, H. M., Abd El-Mageed, T. A., Abu-Elsaoud, A. M., Alsyaad, K. M., Ahmed, A. E., Al-Najjar, M. A. A., El-Tarabily, K. A., & AbuQamar, S. F. (2026). Hazardous landfill leachate: Integrated treatment strategies, regulatory frameworks, and circular economy perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 312*, 119878. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2026.119878

Environmental Studies Institute. (2025, October 30). *Landfill leachate: Generation, characteristics, and sources*. [https://evs.institute/disposal-of-wastes/landfill-leachate-generation-characteristics-sources/]

Hin, S. F. T., Harun, M. H. C., Rasit, N., Yatim, N. I., Hairom, N. H. H., Yusoff, W. M. H. W., Mohammad, A. W., & Hamzah, S. (2025). Characteristics, environmental impacts, and evolution of landfill leachate treatment technologies: A review. *Letters in Applied NanoBioScience, 14*(4), Article 266. https://doi.org/10.33263/LIANBS144.266

Joshi, R., & Pant, D. (2017). Landfill biodegradation process and leachate. In V. C. Kalia (Ed.), *Waste bioremediation* (pp. 233–247). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4

Lakhouit, A. (2026). Landfill emissions and environmental challenges: A comprehensive review. *Fuel, 417*, 138671. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138671

Morling, S. (2007). *Landfill leachate: Generation, composition, and some findings from leachate treatment at Swedish plants*. [Publication details unavailable].

Nuansawan, N., Witthayaphirom, C., Sawasdee, A., Chiemchaisri, C., & Shoda, M. (2023). Removals of endocrine disrupting compounds during landfill leachate treatment in two-stage aerobic sequential batch reactor: Effect of *Alcaligenes faecalis* No. 4 bioaugmentation. *Emerging Contaminants, 9*, 100223. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100223

Parvin, F., & Tareq, S. M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: A systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science, 11*, 1–17. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3

Pires, A., & Martinho, G. (2019). Waste hierarchy index for circular economy in waste management. *Waste Management, 95*, 298–305. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.014

Pliego, G., Zazo, J. A., García-Muñoz, P., Muñoz, M., Casas, J. A., & Rodríguez, J. J. (2015). Trends in the intensification of the Fenton process for wastewater treatment: An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 45*(24), 2611–2692. https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1025646

Research Clue. (2014). *Environmental impact of leachate pollution of ground water supplies*. https://nairaproject.com/projects/1364.html

Schwarzbauer, J., Heim, S., Brinker, S., & Littke, R. (2002). Occurrence and alteration of organic contaminants in seepage and leakage water from a waste deposit landfill. *Water Research, 36*(9), 2275–2287. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00452-3

Tripathi, S., & Hussain, T. (2022). Water and wastewater treatment through ozone-based technologies. In M. Shah, S. Rodriguez-Couto, & J. Biswas (Eds.), *Development in wastewater treatment research and processes* (pp. 139–172). Elsevier.

Tu, A., Zhang, Z., Hao, S., & Li, X. (2020). Review on landfill leachate treatment methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 565*(1), 012038. https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012038

Wan, Y., Chen, X., Liu, Q., Hu, H., Wu, C., & Xue, Q. (2022). Informal landfill contributes to the pollution of microplastics in the surrounding environment. *Environmental Pollution, 293*, 118586. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118586

Wang, J., & Qiao, Z. (2024). A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. *Frontiers in Environmental Science, 12*, 1439128. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128

Wu, C., Chen, W., Gu, Z., & Li, Q. (2021). A review of the characteristics of Fenton and ozonation systems in landfill leachate treatment. *Science of the Total Environment, 762*, 143131. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143131

Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A review on landfill leachate treatment technologies: Comparative analysis of methods and process innovation. *Applied Sciences, 15*(7), 3878. https://doi.org/10.3390/app15073878

Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Nhung, T. C., Hemavathy, R. V., Jawahar, M. J., Neshaanthini, J. P., & Rangasamy, G. (2022). A review on landfill system for municipal solid wastes: Insight into leachate, gas emissions, environmental and economic analysis. *Chemosphere, 309* (Part 1), 136627. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136627

Yang, Z., Zhou, Y., Feng, Z., Rui, X., Zhang, T., & Zhang, Z. (2019). A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification. *Polymers, 11*(8), 1252. https://doi.org/10.3390/polym11081252

Yatoo, A. M., Hamid, B., Sheikh, T. A., Ali, S., Bhat, S. A., Ramola, S., Kumar, S. (2024). Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: Generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies. *Environmental Science and Pollution Research, 31*(16), 23363–23392.

TECHNOLOGIES FOR RECYCLING CRITICAL RAW MATERIALS FROM MINING WASTE

Milka Andreeva-Ivanova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: milka_vasileva@abv.bg

ABSTRACT. Critical raw materials (CRMs) are essential for advanced modern technologies, such as renewable energy, electric vehicles, and the electronics industry. However, their limited availability and reliance on external sources present significant economic and strategic challenges. Mining waste is increasingly recognised as a potential secondary source of valuable materials. The main technological approaches to metal extraction and recycling are studied, including hydrometallurgy, bioleaching, and geopolymerisation, and their advantages, limitations, and applicability are assessed. A comparative analysis of these technologies is presented in terms of their efficiency and environmental impact. The European Union’s regulatory framework, which promotes the recycling and reuse of critical raw materials, is also analysed, along with specific examples from Bulgaria and other European countries.

Keywords: mining waste, critical raw materials (CRMs), recovery.

ТЕХНОЛОГИИ ЗА РЕЦИКЛИРАНЕ НА КРИТИЧНИ СУРОВИНИ ОТ МИННИ ОТПАДЪЦИ

Милка Андреева-Иванова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Критичните суровини играят ключова роля в развитието на съвременните технологии, включително във възобновяемата енергия, електромобилността и електрониката. Ограничената им наличност и зависимостта от външни доставки създават значителни икономически и стратегически предизвикателства, превръщайки минните отпадъци в перспективен вторичен ресурс.
В тази връзка се разглеждат основните технологични подходи за извличане и рециклиране на метали от минни отпадъци, включително хидрометалургия, биоизвличане и геополимеризация. Анализирани са техните предимства, ограничения и области на приложение, като е направен сравнителен анализ по отношение на ефективността и въздействието върху околната среда. Разгледана регулаторната рамка на Европейския съюз, насочена към насърчаване на рециклирането и повторното използване на критични суровини, като са представени и конкретни примери от България и други европейски държави.

Ключови думи: минни отпадъци, критични суровини, рециклиране.

Introduction

Critical raw materials (CRMs) are a group of materials of high economic importance that are also highly vulnerable to global supply disruptions (European Commission, 2023). They are indispensable to high-tech industries, including electronics manufacturing, renewable energy systems, electric vehicles, and defense applications (Gunn, 2014; Blengini et al., 2020). Several rare metals and metalloids, such as rare-earth elements (REEs), lithium, cobalt, antimony, tungsten, and graphite, are characterised by limited geographic distribution, technically demanding extraction processes, and significant environmental challenges associated with their production and waste management (Ali et al., 2017; European Commission, 2023).

Mining operations generate significant amounts of mining waste, including tailings ponds, slag, waste dumps, and landfills, which are traditionally viewed as environmental and economic problems (Lottermoser, 2010). At the same time, these wastes contain residual amounts of valuable elements, making them a potential secondary resource when recycling and reuse technologies are applied (Binnemans et al., 2018). The European Union promotes circular economy and sustainable resource management strategies through policies that balance economic efficiency, environmental security, and social responsibility (Korhonen et al., 2018; European Commission, 2019, 2020).

This article aims to provide a scientific and technological analysis of the possibilities for integrating mining waste into the circular economy through innovative methods for recovering valuable elements, with a particular focus on hydrometallurgical, biotechnological, and geopolymerisation approaches, taking into account EU regulatory frameworks and their applicability.

Mining Waste and Potential for Secondary Utilisation

Mining waste represents complex multi-component systems characterised by high heterogeneity in mineralogical composition, particle size distribution, and physicochemical properties (Lottermoser, 2010; Kossoff et al., 2014). This heterogeneity results from both the primary geological characteristics of the ore bodies and from the technological processes used in the extraction and beneficiation of minerals.

Depending on their origin and mode of formation, mining wastes can be classified into several main categories:

1. Tailings – these are finely dispersed residues generated during the flotation process and other ore enrichment methods. They are characterised by a high specific surface area, which increases reactivity and the potential for secondary metal recovery. Tailings often contain residual concentrations of base and precious metals (Cu, Zn, Pb, Ag), as well as critical raw materials, including rare earth elements, whose extraction was not economically viable during the initial processing. Additionally, they may contain sulphide minerals (e.g., pyrite and chalcopyrite), which are susceptible to intense oxidation and provide a suitable environment for biotechnological extraction methods.

2. Slags – formed as a byproduct of pyrometallurgical processes, they are characterised by a relatively stable amorphous or crystalline structure rich in silicate and aluminosilicate phases (SiO_2, Al_2O_3, CaO). Although initially considered inert waste, modern research shows that slags may contain residual amounts of metals and can be used as a raw material for the synthesis of geopolymer materials. Their application in the construction industry and in the stabilisation of

contaminated sites reduces the need for primary raw materials and limits landfilling.

3. Waste rock dumps – coarse-grained waste materials generated during open-pit or underground mining that contain low but often economically significant concentrations of metals. Due to their large volume and relatively low degree of processing, these materials represent a long-term potential resource for secondary extraction through combined technologies, including hydrometallurgical and biotechnological approaches. Furthermore, sulphide minerals can be a source of acid mine drainage, necessitating their controlled management. Geochemical and mineralogical studies conducted in several regions of Bulgaria—including Kardzhali, Madan, Panagyurishte, and Zlatitsa—confirm the presence of significant quantities of residual metals and critical raw materials in mining waste. Similar results have been reported in other European regions, highlighting the pan-European potential for the secondary utilisation of such resources. From a resource efficiency perspective, mining waste should be viewed not as end products of mining operations, but as secondary raw material streams that can be integrated into production cycles through the application of appropriate technological solutions. Their recycling reduces the need to exploit primary deposits, optimises the use of natural resources, and limits the environmental impact. In addition, implementing integrated approaches to mining waste management creates opportunities to reclaim and reuse affected sites, thereby improving the ecological condition of areas with a history of mining activity. In this context, the transformation of mining waste into a secondary resource is becoming a key element of modern strategies for the circular economy and the sustainable management of mineral resources.

Technological Approaches for the Recovery of Critical Raw Materials

Modern approaches for extracting critical raw materials (CRMs) from mining waste are based on a combination of physicochemical, chemical, and biotechnological processes. The primary goal is to achieve maximum recovery while simultaneously minimising resource and energy costs. The choice of a specific technology depends on several factors, including the mineralogical composition, particle morphology, degree of mineral oxidation, and the presence of associated elements that may inhibit or catalyse the extraction processes (Lottermoser, 2010; Vera et al., 2022).

Hydrometallurgy

Hydrometallurgy is a set of processes for extracting metals using aqueous solutions containing acids, bases, or complexing agents. This approach is particularly effective when processing finely dispersed materials, such as tailings, where the high specific surface area facilitates mass transfer processes (Free, 2013).

The hydrometallurgical process flow involves several sequential stages:

1) Leaching – the main stage in which metals transition from the solid phase to a soluble form. Depending on the mineral composition, different reagents are used:
   - Acid leaching (H_2SO_4, HCl) of sulphide and oxide ores;
   - Alkaline leaching (NaOH, Na_2CO_3) of aluminium and certain rare metals;
   - complexing agents (e.g., cyanides or thiosulphates) for precious metals.

The kinetics of the process are determined by factors that influence the dissolution rate and mass transport, such as temperature, pH, leaching-agent concentration, and other parameters.

2) Purification and separation of the solution involves techniques, such as solvent extraction (SX), ion exchange, and membrane processes. These methods enable selective separation of target metals (e.g., Co, Li, REE) from accompanying impurities.
3) Extraction – it is carried out by electrolysis, chemical precipitation, or crystallisation, yielding pure metal or salt forms.

A significant advantage of hydrometallurgy is its high selectivity and the ability to recover metals from low-grade ores and low-concentration secondary resources (Habashi, 1999; Free, 2013). However, its limitations include the generation and management of secondary waste streams, as well as the use of chemical reagents that may require subsequent treatment, recycling, and environmental control (Botz et al., 2006; Binnemans et al., 2013).

Bioleaching

Bioleaching is a biochemical process in which microorganisms catalyse redox reactions that promote the dissolution of metals from the mineral matrix. This approach is based on the metabolic activity of acidophilic chemolithotrophic microorganisms, which use inorganic compounds as energy sources (Rendón-Castrillón, et al., 2023; Oziegbe et al., 2026). Among the most commonly used microorganisms are *Acidithiobacillus ferrooxidans, Leptospirillum ferrooxidans*, and *Acidithiobacillus thiooxidans*. These microorganisms oxidise ferrous iron and reduced sulphur compounds, forming ferric iron (Fe^{3+}) and sulphuric acid (H_2SO_4), which play a crucial role in the dissolution of sulphide minerals. The main mechanisms include:

1) Direct mechanism – microorganisms attach to the mineral surface and promote the direct oxidation of sulphide minerals;
2) Indirect mechanism – microorganisms oxidise Fe^{2+} to Fe^{3+}, which subsequently acts as an oxidising agent and chemically dissolves the sulphide minerals.

Bioleaching is successfully applied in the extraction of copper, nickel, cobalt, gold, and uranium from low-grade ores and waste. The process can be implemented in various configurations, including heap leaching, bioreactors, or *in situ* technologies. The advantages of the method include low energy consumption, the ability to process large volumes of waste, and relatively low environmental impact. Limitations include slow kinetics, dependence on optimal conditions (pH ~1.5–3.0, temperature 20–45°C), and the need to control microbiological activity (Kara et al., 2023; Roberto et al., 2022; Vera et al., 2022).

Geopolymerisation

Geopolymerisation represents an innovative approach for transforming aluminosilicate waste materials into stable inorganic polymers through alkaline activation. The process proceeds through the dissolution of the amorphous phases and

subsequent polycondensation, resulting in a three-dimensional Si–O–Al structure (Tian et al., 2020).

The main stages include:

- Alkaline activation – addition of strong alkaline solutions (NaOH, KOH, Na_2SiO_3) that dissolve the silicate and aluminosilicate components;
- Gel formation and polycondensation – formation of a geopolymer gel, which subsequently cures into a stable structure;
- Solidification and structuring – development of the material's mechanical properties and durability.

Geopolymerisation is not aimed at the direct extraction of metals, but rather at stabilising and encapsulating potentially hazardous elements, such as Pb, As, and Cd, within a stable matrix. It makes it particularly suitable for managing waste with elevated environmental risk. Additionally, the resulting geopolymer materials can be used in construction as an alternative to traditional cement products, thereby reducing the carbon footprint and enabling the efficient use of secondary raw materials (Lazorenko, et al., 2021).

To sum up, the technological approaches discussed demonstrate a high degree of complementarity and can be combined into integrated technological schemes. Such approaches enable the simultaneous extraction of valuable components and the stabilisation of residual materials, aligning with modern principles of resource efficiency and the circular economy.

Comparative analysis of technologies

Technologies are analysed in a tabular form below:

Technology	Efficiency, %	Applicability	Advantages	Limitations
Hydro-metallurgy	70–90	Tailings ponds, finely ground ores	High selectivity, extraction of multiple metals	Hazardous chemicals, wastewater treatment
Bioleaching	50–75	Sulphide ores and waste	Low energy consumption, environmentally friendly process	Slow kinetics, sensitivity to pH and tempera-ture
Geopoly-merisation	30–50	Slag, silicates, waste materials with high Al/Si	Production of construction products, waste stabilisation	Does not result in direct metal extraction

This comparative analysis shows that the choice of technology must take into account not only the waste's chemical composition but also environmental and economic efficiency.

Regulation and policies in the European Union

The European Union's (EU) policy on critical raw materials (CRMs) is based on an integrated approach combining the principles of resource efficiency, strategic autonomy, and sustainable development. The development of low-carbon technologies, digitalisation, and the defence industry drives the growing global demand for critical raw materials. The EU is developing a comprehensive regulatory and strategic framework to diversify supplies, increase domestic production, and promote recycling and the reuse of resources.

Critical Raw Materials Act

The Critical Raw Materials Act (CRMA) is a key instrument in the EU's policy to ensure security of supply and reduce dependence on external suppliers (European Commission 2023). It introduces specific quantitative targets by 2030, including:

- at least 10% of annual CR consumption to be met through domestic production;
- at least 40% of processing to take place within the EU;
- at least 15% of consumption is to be covered through recycling.

The regulation also provides for the creation of strategic projects that receive expedited administrative procedures and priority access to funding. Particular attention is given to projects for extracting CRMs from secondary sources, including mining waste, tailings ponds, and industrial residues. In this context, the CRMA encourages the application of innovative technological solutions, such as hydrometallurgy and bioleaching, to enable cost-effective recovery of metals from low-grade materials.

Directive 2006/21/EC on the management of waste from the extractive industries

Directive 2006/21/EC establishes the legal framework for the management of waste from the extractive industries, with the primary objective of preventing or minimizing adverse effects on the environment and human health (European Parliament & Council of the European Union, 2006). It introduces requirements for:

- the development of waste management plans;
- the classification of waste facilities (including high-risk Category A facilities);
- the monitoring and control of facilities such as tailings ponds;
- preventing incidents and accidents, including through the application of best available techniques (BAT).

Of particular importance is that the directive encourages the reuse of mining waste when technically and economically feasible. In recent years, there has been a trend toward integrating the principles of the circular economy into its implementation, including by promoting the recovery of residual metals from landfilled materials.

The European Green Deal

The European Green Deal is a strategic framework for transforming the EU economy towards climate neutrality by 2050 (European Commission, 2019). It focuses on increasing resource efficiency, reducing the carbon footprint of production processes, and closing material loops through recycling and reuse. The Green Deal is closely aligned with the Circular Economy Action Plan, which identifies the circular economy as a key policy priority. Within this framework, mining waste is increasingly regarded as a potential secondary resource, the valorisation of which can help reduce environmental pressures and enhance the security of supply of strategic raw materials.

Funding and Research Initiatives – Horizon Europe

The Horizon Europe program is the EU's main instrument for funding research and innovation for the period 2021–2027,

with a significant portion of resources directed toward the sustainable management of CRs and the development of innovative technologies for their extraction (European Commission, 2021). The EU's regulatory framework on critical raw materials is characterised by a high degree of integration between legislative instruments, strategic policies, and financial mechanisms. This multidisciplinary approach creates a favorable environment for the development of innovative technologies to extract CRs from mining waste and supports the transition to a sustainable, resource-efficient economy. In this context, the secondary utilisation of mining waste is emerging as a key element of the European strategy to ensure raw material independence and achieve climate goals.

Conclusion

The integration of mining waste and critical raw materials into the circular economy is a necessary strategic approach amid global resource scarcity and growing industrial demand. Hydrometallurgical and biotechnological processes, combined with geopolymerisation, offer the opportunity to extract valuable metals while minimising environmental impact. The long-term implementation of these technologies requires clear regulatory guidelines, institutional support, and active participation from research organisations and the industry. Implementing integrated approaches will help build a sustainable, self-sufficient, and competitive industry in Bulgaria and the EU, reducing dependence on external supplies and strengthening resource security.

References

Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid mine drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production, 14*(12–13), 1139–1145. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006

Ali, S. H., Giurco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A., Durrheim, R., Enriquez, M. A., Kinnaird, J., Littleboy, A., Meinert, L. D., Oberhänsli, R., Salem, J., Schodde, R., Schneider, G., Vidal, O., & Yakovleva, N. (2017). Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature, 543*(7645), 367–372. https://doi.org/10.1038/nature21359

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 51*, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Blengini, G. A., El Latunussa, C., Eynard, U., de Matos, C. T., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F., & Pennington, D. (2020). Study on the EU’s list of critical raw materials (2020). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2873/11619

Botz, M. M., Mudder, T. I., & Akcil, A. (2006). Cyanide treatment: Physical, chemical and biological processes. In: M. D. Adams (Ed.), *Advances in gold ore processing,* 672–700.

European Commission. (2019). The European Green Deal. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri= CELEX:52019DC0640

European Commission. (2020). A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098

European Commission. (2023). *Proposal for a regulation establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials (Critical Raw Materials Act).* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0160

European Parliament & Council of the European Union. (2006). Directive 2006/21/EC on the management of waste from extractive industries. *Official Journal of the European Union, L102,* 15–34. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006L0021

Free, M. L. (2013). *Hydrometallurgy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.

Gunn, G. (Ed.). (2014). *Critical metals handbook*. Wiley.

Habashi, F. (1999). *Textbook of hydrometallurgy* (2nd ed.). Métallurgie Extractive Québec.

Johnson, D. B. (2014). Biomining—Biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology, 30*, 24–31.

Kara, I. T., Kremser, K., Wagland S. T. & Coulon F. (2023). Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review. *Environ Chem Lett 21*, 3329–3350. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01611-4

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics, 143*, 37–46.

Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry, 51*, 229–245. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., Shaikh, F., Krishna, R. S., & Mishra, J. (2021). Utilisation potential of mine tailings in geopolymers: Physicochemical and environmental aspects. *Process Safety and Environmental Protection, 147*, 559–577. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.028

Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterisation, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer

Mabroum, S., Moukannaa, S., El Machi A., Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R.,(2020) Mine wastes based geopolymers: A critical review, *Cleaner Engineering and Technology, 1*, 100014, ISSN 2666-7908, https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100014.

Oziegbe, E. J. & Oziegbe, O. (2026). Biomining: A sustainable approach for metal recovery in low-grade ores. *Biomass Futures, 2*, 100041. https://doi.org/10.1016/j.bmf.2026.100041

Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., Ocampo-López, C., & Gómez-Arroyave, L. (2023). Bioleaching Techniques for Sustainable Recovery of Metals from Solid Matrices. *Sustainability, 15*(13), 10222. https://doi.org/10.3390/su151310222

Roberto, F. F., & Schippers, A. (2022). Progress in bioleaching: Applications of microbial processes – Part B. *Applied Microbiology and Biotechnology, 106*, 6953–6974

Schippers, A., & Sand, W. (1999). Bacterial leaching of metals. *Applied Microbiology and Biotechnology, 52*(3), 301–308.

Tian, L., et al. (2020). Utilisation of mine tailings for the production of geopolymers: A review. *Science of the Total Environment, 745*, 141097.

Vera, M., Schippers, A., & Sand, W. (2022). Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation – Part A. *Applied Microbiology and Biotechnology, 106*, 6933–6952.

OPTIMISATION OF FRAGMENTATION IN A HORNFELS SCHIST ROCK MASS THROUGH MODELLING OF INDUSTRIAL DRILLING AND BLASTING OPERATIONS USING SPECIALISED SOFTWARE: *PARADIGM* (AUSTIN POWDER)

Radoslav Asenov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia
”Ellatzite-Med” AD, 2086 Mirkovo; E-mail: r.asenov@ellatzite-med.com

ABSTRACT. The report examines the possibilities for improving fragmentation in drilling and blasting operations in heterogeneous rock masses composed of hornfelsed shales and hornfels. The influence of key parameters is analysed, such as the drilling pattern and borehole diameter, blasting material charges, initiation intervals, and blast configuration. The strong variability of the physico-mechanical properties of the rocks is taken into account, which makes it difficult to achieve uniform fragmentation. Optimisation approaches are proposed using specialised software, *Paradigm*, through adaptive design and control of blasting operations, with the aim of increasing efficiency and improving subsequent technological processes.
Key words: hornfels, drilling and blasting, *Paradigm* software, Kuz-Ram model, fragmentation.

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ФРАГМЕНТАЦИЯТА В МАСИВ ОТ ХОРНФЕЛЗУВАНИ ШИСТИ ЧРЕЗ МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОМИШЛЕНИ ПРОБИВНО-ВЗРИВНИ РАБОТИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА СПЕЦИАЛИЗИРАН СОФТУЕР – PARADIGM (AUSTIN POWDER)

Радослав Асенов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
“Елаците-Мед“ АД, 2086 Мирково

РЕЗЮМЕ. Докладът разглежда възможностите за подобряване на фрагментацията при пробивно-взривни работи в хетерогенни скални масиви от хорнфелзувани шисти и хорнфелзи. Анализира се влиянието на ключови параметри, като сондажна мрежа и диаметър на сондажите, заряди от ВВ, интервали на инициране и конфигурация на взрива. Отчита се силната изменчивост на физико-механичните свойства на скалите, която затруднява постигането на равномерно натрошаване. Предлагат се оптимизационни подходи с помощта на специализираният софтуер - *Paradigm* (Austin Powder), чрез адаптивно проектиране и контрол на взривяването, с цел повишаване на ефективността и подобряване на последващите технологични процеси.

Ключови думи: хорнфелзи, ПВР, *Paradigm* - софтуер, Куз-Рам модел, фрагментация.

1. Въведение

Ефективността на пробивно-взривните работи играе ключова роля в находища, характеризиращи се със сложна геоложка структура. В тези условия качеството на фрагментацията е от съществено значение за оптимизиране на последващите технологични процеси и повишаване на общата ефективност на минното производство. Настоящото изследване е насочено към анализ на целенасочена оптимизация на параметрите на пробивно-взривните работи в условията на хетерогенни масиви от хорнфелзувани шисти/хорнфелзи.

2. Влияние на хорнфелзуваните шисти върху процеса на фрагментация при прилагане на ПВР

Скалните масиви, изградени от хорнфелзувани шисти и хорнфелзи, представляват особен инженерно-геоложки интерес поради тяхната променлива структура, механични свойства и степен на метаморфизъм. Тази хетерогенност води до различно поведение при въздействие от взривни заряди, което затруднява постигането на равномерна и контролирана фрагментация.

Фиг. 1. Образци на метаморфна скала- хорнфелзувани шисти

Физико-механичните показатели на скалите оказват съществено влияние върху ефективността и начина на провеждане на промишлените пробивно-взривни работи тъй като определят както съпротивлението на скалния масив при разрушаване, така и необходимите технологични параметри. По-високата якост на скалите налага използването на по-големи количества взривно вещество и по-гъста сондажна мрежа.

Таблица 1. *Основни физико-механични показатели, характеризиращи якостта и устойчивостта на хорнфелзуваните шисти*

№	Показател	Димензия	Минимална стойност	Максимална стойност	Средна стойност
1	Плътност	kg/m³	2600	3200	2900
2	Якост на едноосов натиск UCS	MPa	80	250	150
3	Якост на опън	MPa	5	25	12
4	Модул на еластичност E	GPa	20	80	45
5	Коефициент на Поасон	-	0,15	0,3	0,22
6	Порьозност	%	0,5	5	2,5
7	Индекс на якост PLI (Point Load Index)	MPa	2	10	6
8	Трайност SDI (Slake Durability Index)	%	85	98	92
9	Скорост на разпространение на надлъжни вълни- Vp	m/s	4500	6500	5500
10	Скорост на разпространение на напречни вълни- Vs	m/s	2500	3700	3100

2.1. PLI (Point Load Index) или индекс на якост при точково натоварване

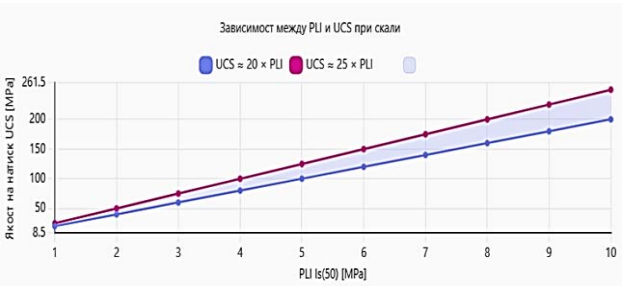
Индексът на якост при точково натоварване (Point Load Index) представлява емпиричен показател за якостта на скалния материал, определян чрез разрушаването му под въздействие на концентрирано натоварване между два твърди накрайника.

Таблица 2. Класификацията на скалите според индекса на трайност SDI (Slake Durability Index) и съответното им поведение при овлажняване и механично въздействие.

SDI (%)	Класификация	Поведение
> 95%	Много устойчива	много здрава скала
85 – 95%	Устойчива	добра механична устойчивост
60 – 85%	Средна	частично се разрушава
30 – 60%	Слаба	значително разпадане
< 30%	Много слаба	бързо разрушаване

2.2. Зависимост между PLI и UCS

Връзката между индекса на якост при точково натоварване и едноосовата якост на натиск показва линейна зависимост, при която UCS нараства пропорционално с увеличаването на PLI.



Фиг. 2. Емпирична зависимост между PLI и UCS

Оцветената зона е реалният диапазон на възможните стойности. Графиката на фиг.2. доказва, че при високи стойности на PLI има високи стойности и при UCS, което води до незадоволителна фрагментация и висок разход на взривно вещество.

3. Теоретична основа на фрагментацията

Теоретичната основа на този процес се базира на взаимодействието между енергията на взривното вещество и физико-механичните свойства на скалния масив. При детонацията на взривното вещество се генерират ударни вълни с високо налягане и температура, които се разпространяват радиално от заряда в скалата. Тези вълни предизвикват интензивни напрежения, водещи до разрушаване на скалата.

Един от моделите за изчисляване на фрагментация е моделът на „Kuz-Ram“. Той е един от най-предпочитаните методи, тъй като се отличава с простота при въвеждане на данни и осигурява пряка връзка между параметрите на взривното проектиране и резултатите от разрушаването на скалата.

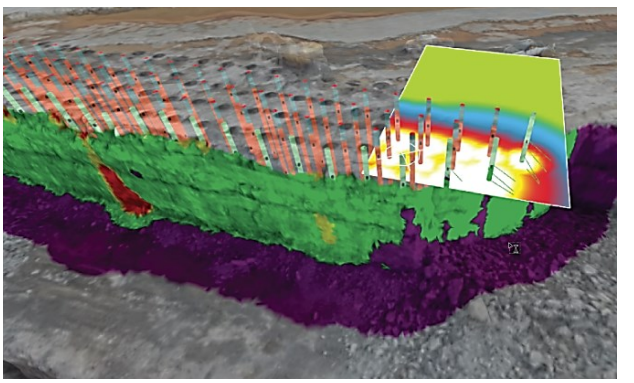
$$X_{50} = A \cdot \left(\frac{V}{Q}\right)^{0.8} \cdot Q^{0.167} \cdot (115/RWS)^{0.3} \quad (1)$$

където:

X_{50}– среден размер на късовете, mm
A– коефициент на скалата (rock factor)
V– обем на разрушената скална маса, m³
Q– маса на заряда, kg
RWS– относителна работоспособност на ВВ

4. Специализиран софтуер- “Paradigm” за оптимизация на пробивно-взривни работи“

„Paradigm“ е специализиран софтуер по лиценз на “Austin Powder” за проектиране, анализ и оптимизация на пробивно-взривни работи (ПВР) в открити и подземни минни обекти. Той позволява моделиране на сондажно-взривни схеми, изчисляване на основни параметри на взрива и прогнозиране на фрагментацията на скалната маса.



Фиг. 3. 3D модел на взривно поле в „Paradigm“ (по лиценз на Austin Powder) с визуализация на зарядите от ВВ и зони на въздействие

5. Вариант №1 за ПВР в масив, представен от хорнфелзувани шисти

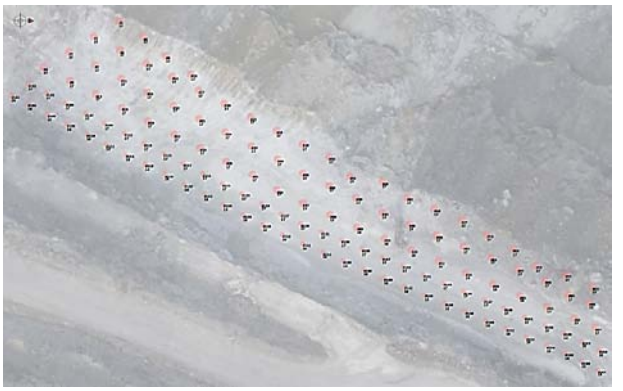
Приложените пробивно-взривни работи са изпълнени в шахматна сондажна мрежа с цел постигане на равномерно

раздробяване и оптимално използване на енергията на взрива.

- при сондажи с диаметър 165 mm се използва мрежа 6 × 5 m
- при сондажи с диаметър 250 mm се прилага мрежа 8 × 7 m

Таблица 3. *Геометрични и технологични параметри на сондажите и сондажната мрежа, използвани при проектиране на пробивно-взривни работи във Вариант№1*

Вид сондажи	Количество, бр.	Проектна дълбочина, m	Проектен ъгъл, °	Преудъл-баване, m	Сондажна мрежа, m	
					a	b
Сондажи с d = 165 mm	30	17	90	2	6	5
Буферни сондажи (d = 165 mm)	31	16	90	1	6	-
Сондажи с d = 250 mm	67	17	90	2	8	7



Фиг. 4. “Paradigm”- План при проектиране на сондажно-взривна схема, изпълнена в шахматна конфигурация. Вариант №1 за ПВР

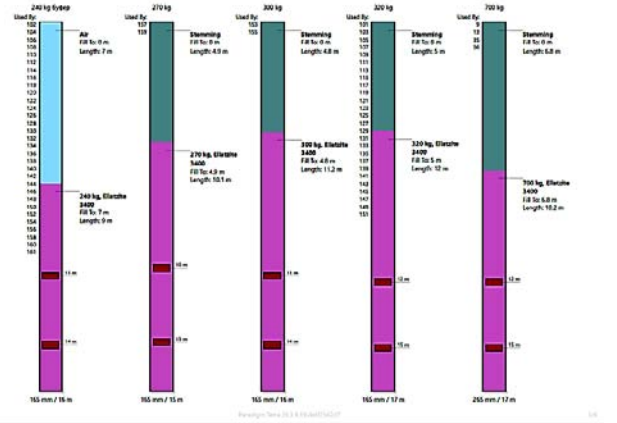
Зареждането на сондажите се извършва механизирано с емулсионно взривно вещество.

Таблица 4. *Параметри на зареждане на сондажите – вид взривни вещества, конструкция и количествени характеристики на зарядите*

Тип сондажи	Диаметър, mm	Проектен ъгъл, °	Дълбочина, m	Донорни заряди, бр.	Количество ВВ в 1 сондаж, kg	Конструкция на заряда	Дължина на заряда, m	Забивка, m
буферни	165	90	16	2	240	непре-късната	9	-
производ-ствени	165	90	17	2	320		12	5
	250	90	17	2	760		11	6

Таблица №4, характеризира енергийното осигуряване на взрива, което в комбинация със сондажната мрежа определя качеството на фрагментацията на скалния масив.

Приложена е неразсредоточена конструкция на зарядите с цел осигуряване на по-голямо количество енергия за раздробяване на скалния масив. Забивката се изпълнява също механизирано, чрез използване на инертен материал (обикновено трошена фракция), като буферните сондажи нямат забивка.

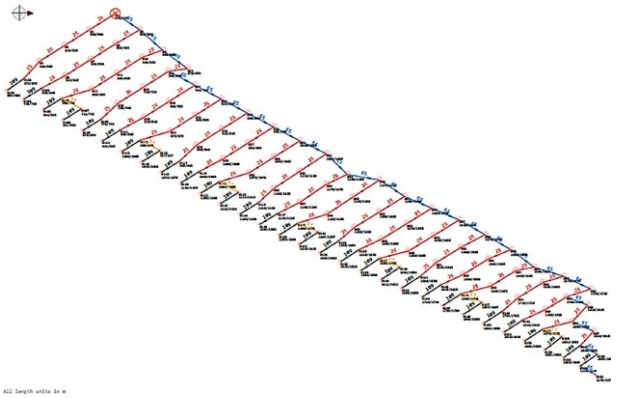


Фиг. 5. „Paradigm” – Конструкция на зарядите от взривно вещество при приложените по диаметър и вид взривни сондажи

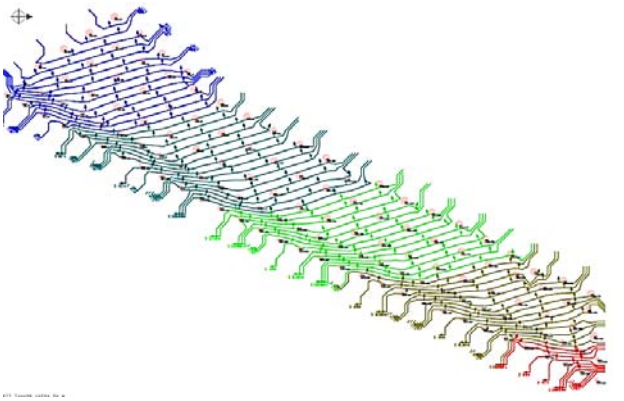
При взривните работи се прилага неелектрическа (NONEL) инициираща система с капсул-детонатори с основно закъснение- 475 ms.

За формиране на оптимална последователност на взривяване са приложени повърхностни релета със закъснения:

- 65 ms - между редовете
- 25 ms - между отделните сондажи в ред



Фиг. 6. „Paradigm” – Схематично представяне на повърхностната взривна мрежа и времевата последователност на взривяване на отделните заряди от ВВ



Фиг. 7. “Paradigm” – Схема на детонационната мрежа при пробивно-взривни работи във Вариант №1, показваща групиране на сондажите в зони и поетапно взривяване чрез милисекундни закъснения

В предбуферния ред са използвани допълнително релета със закъснение 17 ms с цел намаляване на вибрациите, контрол върху фронта на разрушение и подобряване на откъртването в челната зона.

Гранулометричният състав на взривената скална маса в хорнфелзувани шисти е оценен чрез анализ по модела „Kuz-Ram“, представен на фиг. 8. Получените резултати показват равномерна и контролирана фрагментация, характеризираща се със среден размер X50 ≈ 199 mm и характерен размер X80 ≈ 369 mm.

Analysis		
Oversize Definition	(mm)	750
Rock Factor (A50)		5.22
Rock Volume	(m^3)	71 245.40
Explosive Weight	(kg)	67 580.0
Powder Factor	(kg/m^3)	0.95
Powder Factor (Rec.)	(kg/m^3)	1.07
Optimum I.H. Timing	(ms/m)	2.42
Actual I.H. Timing	(ms/m)	3.45
10% Size	(mm)	50
50% Size	(mm)	199
80% Size	(mm)	369
Max Size	(mm)	799

Фиг. 8. „Paradigm”- Резултат от анализ на фрагментацията на скалния масив при Вариант №1 за ПВР

6. Вариант №2 за ПВР в масив представен от хорнфелзувани шисти

Приложените пробивно-взривни работи се изпълняват отново в шахматна сондажна мрежа с цел постигане на равномерно раздробяване и оптимално използване на енергията на взрива.

Таблица 5. *Геометрични и технологични параметри на сондажите и сондажната мрежа, използвани при проектиране на пробивно-взривни работи във Вариант№2*

Вид сондажи	Количество, бр.	Проектна дълбочина, m	Проектен ъгъл, °	Преудъл-баване, m	Сондажна мрежа, m	
					a	b
Сондажи с d = 165 mm	35	17	90	2	5	4
Буферни сондажи (d = 165 mm)	36	16	90	1	5	-
Сондажи с d = 250 mm	95	17,3	90	2,3	6,8	5,9

Коригиране на разстоянието м/у сондажите от 1-ви ред:

$$a_k = \frac{Q_{\max}}{c.H.W}, m \quad (2)$$

където:

$Q_{\max}$ – максимално количество ВВ за един сондаж, kg

c –специфичен разход на ВВ, kg/m^3

H – височина на стъпалото, m

W – линията на най-малко съпротивление в основата на стъпалото, m

$a_k = \frac{780}{1.15.7,6}$ = 6,8 m

Разстояние м/у сондажните редове при шахматна сондажна мрежа:

b=0,866.a, m (3)

където *a* е разстояние между сондажите в реда, m.

b=0,866.6,8 = 5,9 m

В този вариант преудълбаването на сондажите с d= 250 mm е коригирано предвид физико-механичните показатели на хорнфелзуваните шисти.

$\ell_{пр.}$ = p.W, m (4)

където:

p – коефициент на преудълбаване на взривните сондажи

W – линията на най-малко съпротивление в основата на стъпалото, m

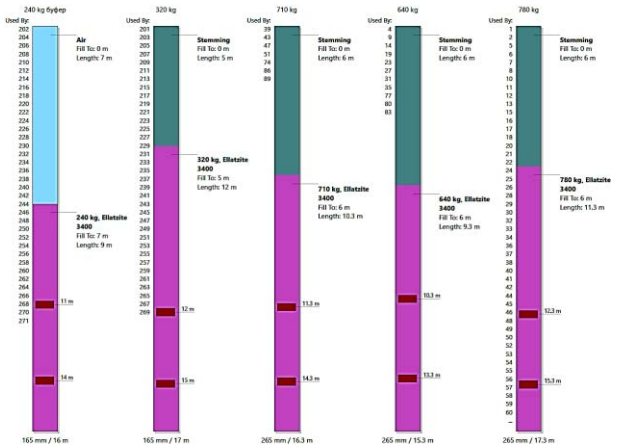
$\ell_{пр.}$ = 0,3.7,6 = 2,28 m ≈ 2,3 m

Фиг. 9. “Paradigm”- План при проектиране на сондажно-взривна схема, изпълнена в шахматна конфигурация. Вариант №2 за ПВР

Таблица 6. Параметри на зареждане на сондажите – вид взривни вещества, конструкция и количествени характеристики на зарядите

Тип сондажи	Диаметър, mm	Проектен ъгъл, °	Дълбочина, m	Донорни заряди, бр.	Количество ВВ в 1 сондаж, kg	Конструкция на заряда	Дължина на заряда, m	Забивка, m
буферни	165	90	16	2	240	непре-късната	9	-
производ-ствени	165	90	17	2	320		12	5
	250	90	17,3	2	780		11,3	6

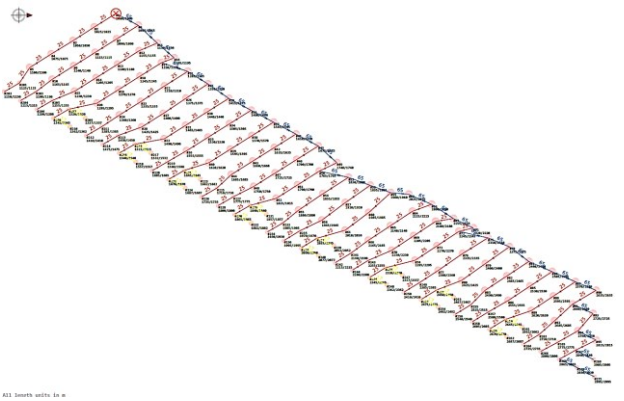
Както при Вариант №1 и тук при взривяването се използва неелектрическа (NONEL) инициираща система с капсул-детонатори с основно закъснение- 475 ms.



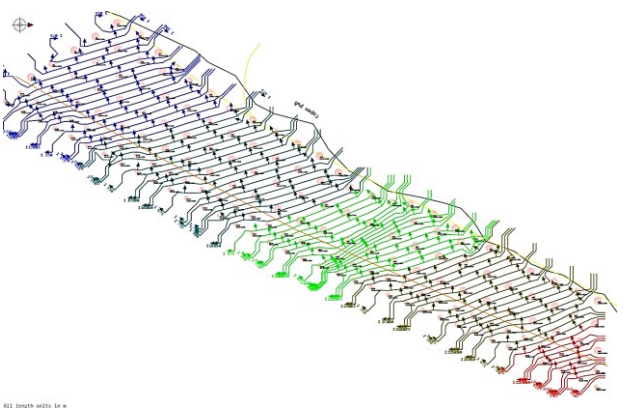
Фиг. 10. „Paradigm”- Конструкция на зарядите от взривно вещество при приложените по диаметър и вид взривни сондажи

За формиране на оптимална последователност на взривяване са приложени повърхностни релета със закъснения:

- 65 ms - между редовете,
- 25 ms - между отделните сондажи в реда.



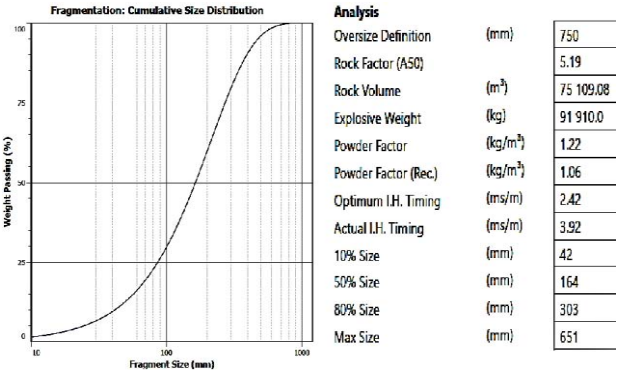
Фиг. 11. „Paradigm”- Схематично представяне на повърхностната взривна мрежа и времевата последователност на взривяване на отделните заряди от ВВ



Фиг. 12. “Paradigm”- Схема на детонационната мрежа при пробивно-взривни работи във Вариант №2, показваща групиране на сондажите в зони и поетапно взривяване чрез милисекундни закъснения

Анализът на гранулометричния състав, представен на фиг. 13., показва равномерно оформена S-образна крива, характерна за контролирано раздробяване. Основните параметри на гранулометричния състав са: X10 ≈ 42 mm, X50 ≈ 164 mm и X80 ≈ 303 mm. Максималният размер на късовете достига около 651 mm.

Полученото раздробяване се характеризира с добра равномерност и сравнително ниско съдържание на прекомерно едри фракции. Общата оценка е, че взривните работи са проведени ефективно при условия на твърда скална маса, с постигане на стабилно и предвидимо гранулометрично разпределение.



Фиг. 13. „Paradigm”- Резултат от анализ на фрагментацията на скалния масив при Вариант №2 за ПВР

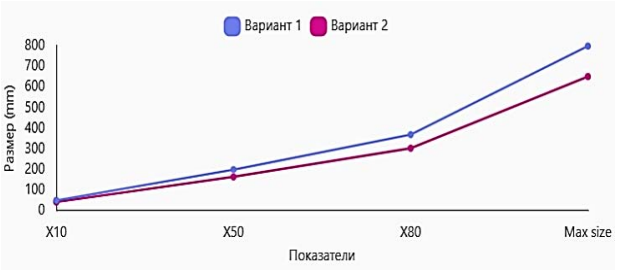
7. Сравнителен анализ на фрагментацията от Вариант №1 и Вариант №2 за ПВР в хорнфелзувани шисти

Сравнителният анализ на резултатите от моделирането на пробивно-взривните работи с „Paradigm” е проведен с цел количествена оценка на влиянието на оптимизираните параметри върху гранулометричния състав на взривената скална маса.

Таблица 7. *Сравнителна оценка на основните гранулометрични показатели, характеризиращи качеството на фрагментацията при двата анализирани варианта на пробивно-взривни работи*

Показател	Вариант 1	Вариант 2
X10	≈ 50 mm	≈ 42 mm
X50	≈ 199 mm	≈ 164 mm
X80	≈ 369 mm	≈ 303 mm
Максимален размер	≈ 799 mm	≈ 651 mm
Oversize (>750 mm)	наличен	значително ограничен
Характер на кривата	S-образна	S-образна

Резултатите показват, че и при двата варианта е постигната устойчива S-образна крива на гранулометричното разпределение. Независимо от това, между двата варианта се наблюдават съществени количествени различия.



Фиг. 14. Сравнителна оценка на гранулометричните показатели при Вариант №1 и Вариант №2

Вариант №2 се характеризира със системно по-ниски стойности на всички основни гранулометрични показатели. Тези резултати свидетелстват за по-висока степен на раздробяване и по-добро усвояване на взривната енергия.

8. Икономически ефект

За оценка на икономическата ефективност на двата варианта е извършен сравнителен анализ на основните разходообразуващи елементи при пробивно-взривните работи

8.1. Сондажни работи

При Вариант №2 се прилага по-оптимизирана сондажна мрежа с редуцирани разстояния между сондажите (a ≈ 6.8 m; b ≈ 5.9 m), което води до увеличаване на броя сондажите на единица площ. При Вариант №2 увеличението на сондажните разходи е с 30%.

8.2. Взривни вещества

По-големият брой сондажи при Вариант №2 води до по-добро разпределение на енергията, но в резултат на това специфичният разход на ВВ се повишава с 38 %.

8.3. Вторични взривни работи

Това е ключовият икономически фактор. При Вариант №2 се реализира намаление на максималния размер с ~18%. В резултат на това ще има намаление на вторичното раздробяване с ≈ 10–20%.

8.4. Товаро-транспортни разходи

По-добрата фрагментация води до по-добро запълване на кофите на товарачната техника, по-бързо товарене, по-малко престои на техниката в изчакване за товарене и повишена производителност с 5 до 15%.

Таблица 8. *Сравнение на технологично-икономическите показатели при прилагане на двата варианта на ПВР*

Показател	Мярка	Вариант №1	Вариант №2	Разлика, %
Взривен обем минна маса,	m³	85297	85297	0
Сондажи 165 mm	брой	61	71	+16
Сондажи 250 mm	брой	67	95	+41
Сондажни работи	m	2129	2785,5	+30
ВВ (специфичен разход),	kg/m³	0,796	1,101	+38
Иницииращи средства	брой	129	167	+30
Вторично раздробяване	%	10-15	4-8	-53
Производителност на товарачно-транспортна техника	%	- 5 до -10	+8 до +15	+25

Намалението на разходите за вторично раздробяване (≈10–20%) и повишената производителност на товаро-транспортните процеси (≈ 5–15%) водят до съвкупно намаляване на оперативните разходи на тон добита скална маса.

9. Заключение

Въпреки увеличението на преките разходи за сондажни работи и иницииращи средства при Вариант №2, постигнатото значително подобрение на фрагментацията води до съществени икономии в последващите технологични процеси. Намаляването на вторичното раздробяване, оптимизираният разход на взривни вещества и повишената производителност на товаро-транспортната техника компенсират първо-началните разходи и водят до по-ниска себестойност на добитата скална маса.

Литература

Камбурова, Г. (2007). *Взривни явления и експлозиви*. София.

Митков, В. (2020). *Взривна техника и технология*. София.

Паунов, Н., Барбулов, Б. (1989). *В помощ на взривника*. София

Шишков, П. (2019). *Справочник на взривника*. София.

Cunningham, C.V.B. (1983). *The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting*.

Hoek, E., Brown, E.T. (1997). *Practical Estimates of Rock Mass Strength*.

Stig O Olofsson. *Applied explosives technology for construction and mining*. Sweden.

INFLUENCE OF MINERAL BINDING ADDITIVES ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS AND CONSOLIDATION BEHAVIOUR OF TECHNOLOGICAL MINE WASTE

Veselin Balev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: veselinbalev@mgu.bg

ABSTRACT. An applied geotechnical assessment is presented of the potential for accelerated dewatering, development of structural bonding, and modification of the shear behaviour of mining process waste through the combined use of geosynthetic drainage elements and mineral binding additives. The analysis includes results from static sedimentation tests, observations of filtration through geotextile and a three-dimensional drainage element, a field experimental cell, and direct shear tests. Natural sedimentation provides only limited dewatering and does not result in the rapid formation of a load-bearing structure. For the mixture containing 1.58% cement + 0.5% PowerCem, a substantial increase in the cohesive component of shear strength is observed, accompanied by a decrease in the angle of internal friction. This indicates a transition towards more pronounced structurally cohesive behaviour rather than a universal increase in shear strength under all normal stress conditions.

Key words: mine tailings; dewatering; consolidation; geosynthetic drainage; cement stabilisation/PowerCem.

ВЛИЯНИЕ НА МИНЕРАЛНИ СВЪРЗВАЩИ ДОБАВКИ ВЪРХУ ЯКОСТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСОЛИДАЦИОННОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ МИННИ ОТПАДЪЦИ

Веселин Балев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София E-mail: veselinbalev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Представена е приложна геотехническа оценка на възможността за ускорено водоотделяне, формиране на структурна свързаност и изменение на срязващото поведение на технологичен минен отпадък чрез комбинирано използване на геосинтетични дренажни елементи и минерални свързващи добавки. Анализирани са резултати от утаяване в неподвижна среда, наблюдения върху филтрация през геотекстил и пространствен дренажен елемент, полева експериментална клетка и изпитвания на директно срязване. Естественото утаяване осигурява ограничено водоотделяне и не води до бързо формиране на носеща структура. При състава 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem се установява съществено нарастване на кохезионната компонента на срязващата устойчивост при едновременно понижаване на ъгъла на вътрешно триене. Това показва преход към по-изразено структурно-кохезионно поведение, а не универсално повишаване на срязващата якост във всички условия на нормално натоварване.

Ключови думи: технологични минни отпадъци; водоотделяне; консолидация; геосинтетичен дренаж; циментова стабилизация/PowerCem.

1. Въведение

Управлението на технологичните минни отпадъци е съществен елемент от геотехническата безопасност на хвостохранилищата и съоръженията за клетъчно депониране. При фино-дисперсни хвостови материали инженерното поведение се определя от взаимосвързани процеси на утаяване, отделяне на свободна вода и такава от порите, консолидация и развитие на срязваща устойчивост. Поради това устойчивостта на системата не зависи единствено от геометрията на депониране, а и от скоростта, с която материалът преминава от суспензионно към по-устойчиво структурирано състояние (Blight, 2010; Jewell & Fourie, 2015; Global Tailings Review, 2020; International Commission on Large Dams, 2022).

При клетъчно депониране естественото водоотделяне често протича бавно. Това удължава технологичния цикъл, затруднява последващото надграждане и може да доведе до локални деформации при недостатъчно дрениране. В практиката се използват различни решения: геосинтетични дренажни елементи, контролирана коагулация, циментова стабилизация, както и комбинация между дренаж и минерални добавки (Benzaazoua et al., 2004; Fall et al., 2008; Koerner, 2012; Tariq & Yanful, 2013; Yilmaz & Fall, 2017; Wilson et al., 2018; Cui & Fall, 2019; Islam & Shang, 2019).

Целта на настоящата работа е да даде оценка на комбинираното приложение на дренажни елементи и минерални свързващи добавки влияе върху водоотделянето, консолидационното поведение и интерпретираните параметри на срязваща якост на технологичен минен отпадък. Основният акцент е поставен върху разграничаването между фрикционно поведение и нарастване на кохезионната компонента в резултат на създаване на структурни връзки след период от време.

2. Теоретична рамка

Първичното утаяване на отделни частици в разредена суспензия може ориентировъчно да се опише чрез закона на Стокс:

$$v_s = \frac{(\rho_s - \rho_w) g d^2}{18\mu} \quad (1)$$

където:

v_s е скоростта на утаяване, m/s;
ρ_s – плътност на частиците, kg/m³;
ρ_w – плътност на водата, kg/m³;
g – земно ускорение, m/s²;
d – еквивалентен диаметър на частицата, m;
μ – динамичен вискозитет, Pa·s.

При концентрирани хвостови суспензии този модел има само ориентировъчно значение, тъй като се проявява стеснено утаяване, взаимодействие между частиците и промяна в ефективната порьозност. (Mitchell & Soga, 2005).

Филтрацията през дренажни и геосинтетични елементи може да се разглежда чрез закона на Darcy:

$$q = kiA \quad (2)$$

където:

q е дебитът, m³/s;

k – коефициент на филтрация, m/s;

i – хидравличен градиент;

A – филтрационна площ, m².

В реална среда ефективната филтрационна способност намалява поради колматаж, формиране на филтърна кора и локално запушване на контактната повърхност между фино-дисперсния отпадък и геосинтетичния материал (Palmeira & Gardoni, 2002; Koerner, 2012; International Organization for Standardization [ISO], 2019; Du et al., 2022).

Времевото развитие на едномерната консолидация може да се представи чрез безразмерния времеви фактор:

$$T_v = \frac{c_v t}{H_d^2} \quad (3)$$

където:

T_v е времевият фактор;

c_v – коефициент на консолидация, m²/s;

– време, s; H_d – дренажен път, m.

Намаляването на H_d чрез дренажни елементи е основна предпоставка за ускорено отвеждане на поровата вода (Ahmed, 2018).

Интерпретацията на срязващата якост е извършена чрез критерия на Mohr–Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan\varphi' \quad (4)$$

където:

τ_f е якостта на срязване, kPa или MPa;

c' – ефективна или интерпретирана кохезионна компонента;

σ'_n – ефективно нормално напрежение;

φ' – ефективен или интерпретиран ъгъл на вътрешно триене.

При стабилизирани фини материали изменението на c' и φ' трябва да се разглежда отделно, защото минералните добавки могат да увеличат структурното свързване, без непременно да повишат фрикционната компонента (ъгъла на вътрешно триене) (Consoli et al., 2007; Peng et al., 2021).

3. Материал и методика

Изследваният материал е технологичен минен отпадък, разглеждан като концентрирана суспензия със съдържание на твърда фаза около 60–65 %. Експерименталната програма обхваща: утаяване в неподвижна среда; наблюдение върху филтрацията през геотекстилна повърхност; наблюдение на поведението при пространствен дренажен елемент; полеви експеримент в клетка с приблизителен обем 1 m³; и директно срязване за три състава: контролен МТО, МТО + 1.58 % цимент и МТО + 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem.

Добавката PowerCem е разгледана като минерална добавка към циментова стабилизация. В техническата литература за продуктите от системата PowerCem тя се описва като прахообразна добавка на база синтетични зеолити и алкални/алкалоземни компоненти, която се използва съвместно с хидравлично свързващо вещество (цимент) за подобряване на механичните параметри, водоплътността, структурната свързаност и други на циментосвързани материали (Holmes, 2015; Wu, 2015; Eyo et al., 2021). Поради търговския характер на продукта в статията не се приема скрит химичен състав, а се интерпретира само установеният инженерен геотехнически ефект.

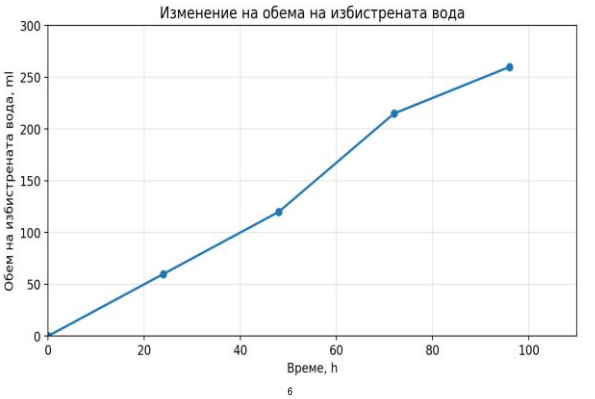
Таблица 1. *Обобщение на експерименталната програма*

Изследване	Основна цел	Интерпретиран резултат
Утаяване	Оценка на първичното водоотделяне	Обем и височина на избистрената вода
Геотекстилна филтрация	Оценка на взаимо-действието МТО – геотекстил	Колматаж и намаляване на ефективната филтрация
Пространствен дренаж	Оценка на отвеждането на водата от порите	По-устойчив дренажен път
Полева клетка	Наблюдение на консистенция и форма във времето	Поведение на модифицирания материал на 28-ия ден
Директно срязване	Определяне на параметри по Mohr–Coulomb	c' и φ' за трите състава

Таблица 2. *Изследвани състави при директно срязване*

Състав	Цимент	PowerCem	Инженерна цел
Контролен МТО	0 %	0 %	Изходно поведение на немодифициран материал
МТО + цимент	1.58 %	0 %	Самостоятелен ефект с цимент
МТО + цимент + PowerCem	1.58 %	0.5 %	Комбиниран ефект на цимент и минерална добавка

Методиката има приложен характер. Поради ограничената налична първична информация резултатите от директното срязване се разглеждат като интерпретационни, а не като окончателни проектни стойности. За проектно използване е необходимо допълване с повторяемост, контрол на водното съдържание, плътност, време на зреене, скорост на срязване и дълговременна устойчивост.



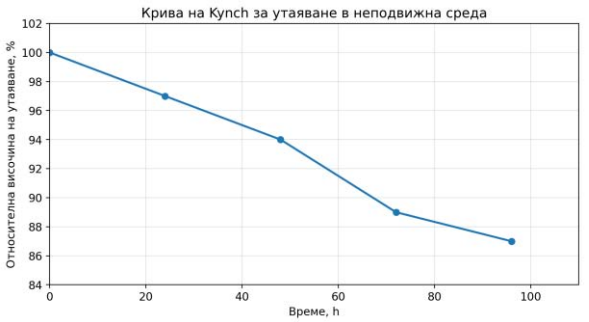
Фиг. 1. Изменение на обема на избистрената вода при утаяване в неподвижна среда.

4. Резултати

Резултатите от утаяването показват постепенно отделяне на избистрена вода в рамките на 96 h. При първоначален обем на пулпа 2000 ml и съдържание на твърда фаза 62.4 % обемът на избистрената вода достига 260 ml. Това съответства на около 13 % от началния обем и показва, че материалът отделя свободна вода, но без да формира бързо стабилна носеща структура.

Таблица 3. *Резултати от утаяване в неподвижна среда*

Време, h	Обем избистрена вода, ml	Дял спрямо началния обем, %
0	0	0.0
24	60	3.0
48	120	6.0
72	215	10.8
96	260	13.0

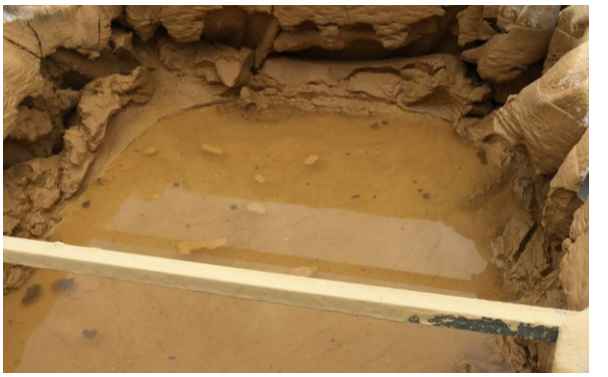


Фиг. 2. Крива на Kynch, представяща изменението на височината на утайката във времето.

Наблюденията върху геотекстилната повърхност показват, че класическата филтрационна повърхност е чувствителна към колматаж при контакт с фино-дисперсен отпадък. Формирането на филтърна кора ограничава активната филтрационна площ и намалява ефективния коефициент на филтрация. За разлика от това пространственият дренажен елемент осигурява по-устойчив път за отвеждане на поровата вода и намалява влиянието на локалното запушване.

Фиг. 3. Опитна постановка с пространствен дренажен елемент и модифициран технологичен минен отпадък

Полевата клетка потвърждава приложното значение на комбинираното дрениране и стабилизиране. На 28-ия ден модифицираният материал показва значително по-добра формоустойчивост в сравнение с очакваното поведение на нестабилизиран концентриран пулп. Наблюдаваните пукнатини се интерпретират като резултат от водоотделяне, обемни изменения и развитие на крехко структурирана повърхностна зона, а не като доказателство за равномерно подобрение в целия обем.



Фиг. 4. Полеви експеримент: състояние на не модифицирания материал в опитна клетка на 28-ия ден

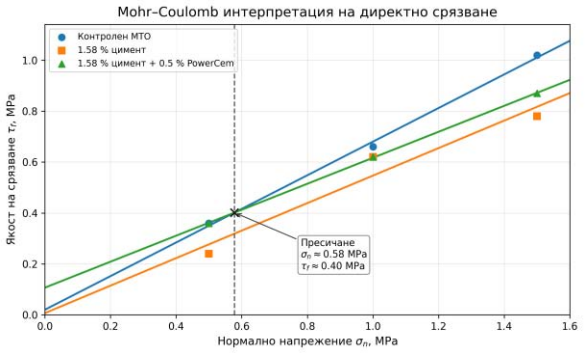
Фиг. 5. Полеви експеримент: състояние на модифицирания материал в опитна клетка на 28-ия ден

Най-съществена информация за механизма на подобряване дават резултатите от директното срязване. За контролния МТО е определена интерпретирана кохезионна компонента $c' \approx 20.0$ kPa и ъгъл на вътрешно триене $\varphi' \approx 33.4°$. При състава с 1.58 % цимент са получени $c' \approx 6.7$ kPa и $\varphi' \approx 28.4°$, което не показва положителен самостоятелен ефект на цимента при тази дозировка и условия. При състава 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem е определена стойност $c' \approx 106.7$kPa при $\varphi' \approx 27.0°$.

Таблица 4. *Интерпретирани параметри по Mohr–Coulomb от директно срязване*

Материал	Нормални напрежения, MPa	Якост на срязване, MPa	c', kPa	φ', °
Контролен МТО	0.5; 1.0; 1.5	0.36; 0.66; 1.02	20.0	33.4
1.58 % цимент	0.5; 1.0; 1.5	0.24; 0.62; 0.78	6.7	28.4
1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem	0.5; 1.0; 1.5	0.36; 0.62; 0.87	106.7	27.0

На фиг. 6 е показана е пресечната точка между зависимостите за контролния МТО и комбинирания състав при $\sigma_n \approx 0.58$ MPa.



Фиг. 6. Линейна интерпретация по Mohr–Coulomb на резултатите от директно срязване за контролен МТО, МТО с 1.58 % цимент и МТО с 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem

Таблица 5. *Линейна интерпретация на резултатите от директно срязване по Mohr–Coulomb*

Състав	Зависимост $\tau f–\sigma_n$	c', kPa	φ', °	R^2	Инженерна интерпретация
Контролен МТО	$\tau f = 0.020 + 0.660\sigma_n$	20.0	33.4	0.997	Преобладаващо фрикционно поведение
МТО + 1.58 % цимент	$\tau f = 0.0067 + 0.540\sigma_n$	6.7	28.4	0.948	Не се установява положителен самостоятелен ефект
МТО + 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem	$\tau f = 0.1067 + 0.510\sigma_n$	106.7	27.0	0.999	Повишена кохезионна компонента и структурно свързване

Забележка: Зависимостите са изведени чрез линейна регресия на резултатите от директно срязване при нормални напрежения 0.5, 1.0 и 1.5 MPa.

Линейната интерпретация на получените резултати може да се представи чрез следните зависимости, където τ и σ_n са в MPa:

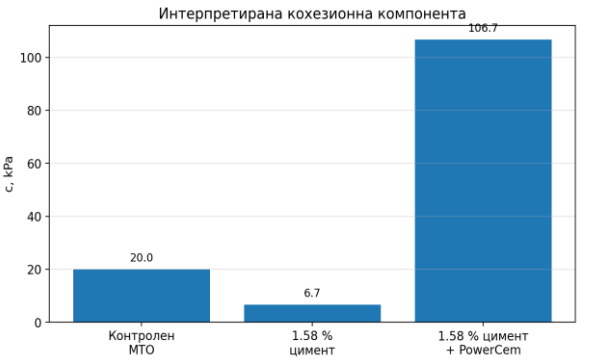
$$\tau_1 = 0.020 + 0.660\sigma_n \qquad \tau_1 \text{ контролен МТО} \qquad (5)$$

$$\tau_2 = 0.0067 + 0.540\sigma_n \qquad \tau_2 \text{ МТО + 1.58 % цимент} \qquad (6)$$

$$\tau_3 = 0.1067 + 0.510\sigma_n \qquad (7)$$

τ_3 МТО + 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem

От тези зависимости следва, че комбинираната добавка води до многократно нарастване на кохезионната компонента, но не и до нарастване на ъгъла на вътрешно триене. Напротив, φ' остава по-нисък от този на контролния материал. Пресечната точка между зависимостите за контролния МТО и състава с 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem е при $\sigma_n \approx 0.58$ MPa и $\tau f \approx 0.40$ MPa. Следователно при нормални напрежения под тази стойност комбинираният състав показва по-благоприятна изчислителна срязваща устойчивост, докато при по-високи нормални напрежения контролният МТО може да покаже по-висока срязваща якост поради по-голямата фрикционна компонента. Правилната инженерна интерпретация е, че подобряването се реализира основно чрез структурно свързване и формиране на привидна/ефективна кохезия, особено при ниски до умерени нормални напрежения.



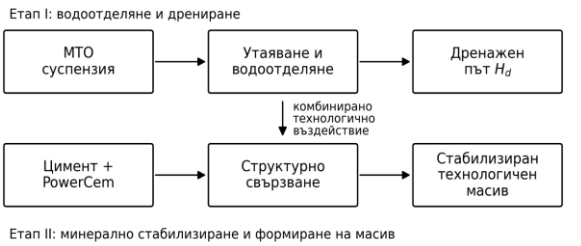
Фиг. 7. Съпоставка на интерпретираната кохезионна компонента c' за трите състава

5. Дискусия

Получените резултати очертават три различни механизма на поведение. Първият е гравитационно утаяване, при което се отделя част от свободната вода, но процесът остава бавен и сам по себе си не е достатъчен за бързо преминаване към устойчиво състояние. Вторият механизъм е дрениране, при което ефективността зависи от устойчивостта на дренажния път и от чувствителността към колматаж. Третият механизъм е минерално-свързана стабилизация, при която циментът и добавката от системата PowerCem променят структурата на материала чрез развитие на свързващи продукти и контакти между частиците.

Важно е да се подчертае, че увеличението на c' не означава автоматично повишаване на срязващата якост във всички диапазони на нормално напрежение. Поради по-ниската стойност на tanφ' правата за стабилизирания състав се пресича с правата на контролния материал. Това налага резултатите да се използват само след проверка на реалния диапазон на нормалните напрежения в конкретната клетка или депонирано тяло.

Допълнително внимание изисква диапазонът на нормалните напрежения 0.5–1.5 MPa. Ако тези стойности са лабораторно зададени и реални, следва да се обоснове тяхното съответствие с напрегнатото състояние в депонирания МТО. Ако в първичната документация е използвана различна единица, например 50–150 kPa, таблицата и интерпретацията трябва да бъдат коригирани. Това е съществен контролен пункт преди окончателно подаване на статията.



Фиг. 8. Концептуална схема на взаимодействието между утаяване, дрениране, стабилизация и развитие на срязваща устойчивост

6. Ограничения на изследването

Настоящата статия има характер на приложна интерпретация върху от експериментални данни. Не са налични достатъчно подробни данни за зърнометричен състав, минерален състав, специфична плътност, начално водно съдържание, порьозност, повторяемост на изпитванията, време и условия на зреене, както и скорост на срязване. Поради това параметрите c' и φ' трябва да се разглеждат като интерпретирани лабораторни стойности, а не като директни проектни параметри.

За проектно приложение са необходими допълнителни изпитвания: определяне на водно съдържание и плътност преди срязване; повторяемост за всеки състав; изпитвания на 7, 14, 28 и 56 дни; едномерна консолидация; филтрационни изпитвания при натоварване; и проверка на дълговременна якост при цикли на намокряне и изсъхване. Само след такава калибрация може да се премине към проектни параметри за конкретна технология на депониране.

7. Заключение

При разглеждания технологичен минен отпадък естественото утаяване води до ограничено водоотделяне – около 260 ml избистрена вода от 2000 ml първоначален пулп за 96 h. Този процес е недостатъчен като самостоятелна мярка за бързо формиране на устойчиво състояние при клетъчно депониране.

Геотекстилните филтрационни повърхности показват риск от колматаж при контакт с фино-дисперсен МТО. Пространствените дренажни елементи са по-подходящи, защото осигуряват по-устойчив път за отвеждане на поровата вода и ограничават влиянието на локалното запушване.

При комбинираното приложение на 1.58 % цимент и 0.5 % PowerCem се установява съществено нарастване на кохезионната компонента на срязващата устойчивост — от c' ≈ 20.0 kPa при контролния МТО до c' ≈ 106.7 kPa. Едновременно с това ъгълът на вътрешно триене намалява от φ' ≈ 33.4° до φ' ≈ 27.0°. Следователно ефектът от добавката следва да се тълкува като формиране на структурно-кохезионно поведение и подобряване на формоустойчивостта на материала, а не като универсално повишаване на срязващата якост в целия диапазон на нормални напрежения.

Получените резултати са приложими като основа за технологична оценка и избор на посока за оптимизация, но не са достатъчни за директно проектиране. Преди практическо използване е необходима допълнителна лабораторна програма, обвързана с реалните напрежения, воден режим, геометрия на клетките и изискваната дълговременна устойчивост.

Литература

Ahmed, S. I. (2018). Development of a model to predict consolidation of tailings. *Environmental Geotechnics, 5*(5), 271–284. https://doi.org/10.1680/jenge.15.00013

Benzaazoua, M., Fall, M., & Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering, 17*(2), 141–152. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.022

Blight, G. E. (2010). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC Press.

Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., & Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133*(2), 197–205. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197)

Cui, L., & Fall, M. (2019). Mathematical modelling of cemented tailings backfill: A review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33*(6), 389–408. https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1453320

Du, C., Xu, C., Yang, Y., & Wang, J. (2022). Filtration performance of nonwoven geotextile filtering fine-grained soil under normal compressive stresses. *Applied Sciences, 12*(24), Article 12638. https://doi.org/10.3390/app122412638

Eyo, E. U., Ng'ambi, S., & Abbey, S. J. (2021). Inclusion of RoadCem additive in cementitious materials for soil stabilization. In *IFCEE 2021* (pp. 166–176). American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784483411.016

Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. G. (2008). Mix proportioning of underground cemented tailings backfill. *Tunnelling and Underground Space Technology, 23*(1), 80–90. https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.08.005

Global Tailings Review. (2020). *Global industry standard on tailings management*. International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme, & Principles for Responsible Investment.

Holmes, N. (2015). Structural properties of concrete materials containing RoadCem. *Journal of Construction Engineering, 2015*, Article 795080. https://doi.org/10.1155/2015/795080

International Commission on Large Dams. (2022). *Tailings dam safety* (Bulletin No. 194).

International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing—Laboratory testing of soil—Part 10: Direct shear tests (ISO 17892-10:2018)*.

International Organization for Standardization. (2019). *Geotextiles and geotextile-related products—Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load (ISO 11058:2019)*.

Islam, S., & Shang, J. Q. (2019). Coagulation enhanced electrokinetic settling of mature fine oil sands tailings. *International Journal of Mining Science and Technology, 29*(2), 199–208. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.04.012

Jewell, R. J., & Fourie, A. B. (2015). *Paste and thickened tailings: A guide* (3rd ed.). Australian Centre for Geomechanics.

Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Palmeira, E. M., & Gardoni, M. G. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes, 20*(2), 97–115. https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00004-3

Peng, X., Guo, L., Liu, G., Yang, X., & Chen, X. (2021). Experimental study on factors influencing the strength distribution of in situ cemented tailings backfill. *Metals, 11*(12), Article 2059. https://doi.org/10.3390/met11122059

Tariq, A., & Yanful, E. K. (2013). A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices. *Journal of Environmental Management, 131*, 138–149. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.039

Wilson, G. W., Kabwe, L. K., Beier, N. A., & Scott, J. D. (2018). Effect of various treatments on consolidation of oil sands fluid fine tailings. *Canadian Geotechnical Journal, 55*(8), 1059–1066. https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0268

Wu, P. (2015). *Cement stabilized materials with use of RoadCem additive* [Doctoral dissertation, Delft University of Technology]. ISBN 978-94-6203-866-0.

Yilmaz, E., & Fall, M. (Eds.). (2017). *Paste tailings management*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8

COMPARATIVE EVALUATION OF FEATURE CLASSIFICATION IN MINING REGIONS VIA MULTI-MODAL SENSOR DATA

Martin Berdankov, Natalia Aleksandrova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: m.berdankov@mgu.bg, nataliya.aleksandrova@mgu.bg

ABSTRACT. This report explores the possibilities of remote monitoring of mining areas by fusing sensor data from radar and optical satellite systems. The study is based on a feature-based machine learning method applied to the classification of an open-pit mine. A classification is performed using the Maximum Likelihood algorithm on a multiband dataset of structural, radiometric, and spectral information. This dataset is formed by the multispectral bands of Sentinel-2 and the polarimetric SAR parameters (Entropy, Anisotropy, and Alpha angle) derived from Sentinel-1 data. The spectral characteristics and polarimetric parameters are used as fused input features, with the latter providing additional information on scattering mechanisms and the structural characteristics of the investigated objects. In the processing of the radar signal, emphasis is placed on physical scattering from artificial targets within the mine, whereas the optical data relies on spectral resolution to identify different land cover types. The results of the comparative analysis indicate that the polarimetric characteristics of Sentinel-1 provide more stable information for determining object geometry. On the other hand, the Sentinel-2 classification delivers a more detailed class separation but remains highly dependent on the meteorological conditions characteristic of the study period, which in this case is early spring. The study confirms the necessity of applying a combined approach for monthly monitoring of mining territories with rugged terrain.

Key words: pixel-based classification, multi-sensor data fusion, dual-polarimetric SAR, multispectral imagery, open pit mining areas.

СРАВНИТЕЛНА ОЦЕНКА ПРИ КЛАСИФИКАЦИЯТА НА ОБЕКТИ В МИННИ РАЙОНИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДАННИ ОТ РАЗЛИЧНИ ТИПОВЕ СЕНЗОРИ

Мартин Берданков, Наталия Александрова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящия доклад се разглеждат възможностите за дистанционен мониторинг на минни райони чрез обединяване на данни от сензори на радарни и оптични спътникови системи. Изследването е базирано на метод за машинно обучение, основан на признаци, при класификацията на открит рудник. Прилага се класификация въз основа на алгоритъма Maximum Likelihood върху многоканален набор от структурна, радиометрична и спектрална информация. Той се формира от мултиспектралните канали на Sentinel-2 и поляриметричните SAR параметри (Entropy, Anisotropy и Alpha angle), получени от данните на Sentinel-1. Спектралните характеристики и поляриметричните параметри се използват като обединени входни признаци, като последните предоставят допълнителна информация за механизмите на разсейване и структурните характеристики на изследваните обекти. При обработката на радарния сигнал акцентът се поставя върху физическото разсейване от изкуствени структури в рудника, докато при оптичните данни се разчита на спектралната разделителна способност за определяне на различните типове земно покритие. Резултатите от сравнителния анализ показват, че поляриметричните характеристики на Sentinel-1 предоставят по-стабилна информация за определяне на геометрията на обектите. От друга страна, класификацията на Sentinel-2 осигурява по-подробно разграничаване на класовете, но остава силно зависима от метеорологичните условия, характерни за периода на изследването, който в случая е началото на пролетта. Изследването потвърждава необходимостта от прилагането на комбиниран подход при ежемесечен мониторинг на минни територии с пресечен релеф.

Ключови думи: пикселно-базирана класификация, обединяване на данни от различни сензори, двойно поляризиран SAR, мултиспектрални изображения, минни райони.

Introduction

Monitoring areas with intensive industrial activity, such as open-pit mines, is of critical importance for safety and environmental management. Environmental changes are dynamic and complex, requiring precise mapping and assessment methods. Ensuring reliable methods for year-round remote observation of these sites is partially limited by meteorological conditions (cloud cover) and complex terrain geometry.

Remote sensing via satellite platforms offers a cost-effective solution for operational monitoring of such facilities, as discussed by Joshi et al. (2016) and Tavares et al. (2019).

The traditional use of optical sensors, such as those on the Sentinel-2 satellite, represents a primary tool in Earth observation remote sensing due to the rich spectral information they provide. However, in many regions, their effectiveness is limited by frequent cloud cover and atmospheric disturbances. Synthetic Aperture Radar (SAR) data, such as from the Sentinel-1 satellite, can be applied as an alternative and complement, providing information on the structural and physical characteristics of the Earth's surface regardless of atmospheric conditions. Scientific research and analysis show that integrating optical and radar data leads to a significant increase in classification accuracy compared to using a single data source alone (Joshi et al., 2016).

The development of polarimetric SAR analysis has further expanded the potential of radar data for characterising the physical properties and scattering behaviour of surface targets. Cloude and Pottier (1996a, 1996b, 1997) introduced entropy- and anisotropy-based polarimetric classification concepts, demonstrating the potential of these parameters as informative features for the interpretation and classification of polarimetric SAR imagery. The Cloude–Pottier framework provides physically interpretable parameters, including entropy (H), anisotropy (A), and the alpha angle (α), which describe the randomness and relative contribution of scattering mechanisms and the dominant scattering behaviour of observed targets. These parameters can therefore provide complementary structural information to the spectral information obtained from optical sensors.

Although the original Cloude–Pottier framework was developed for fully polarimetric SAR data, its principles can also be adapted for dual-polarisation observations. In this study, this approach is applied to Sentinel-1 dual-pol SLC data through

eigenvalue analysis of the C2 covariance matrix, which allows for the derivation of physically interpretable polarimetric features despite the reduced polarimetric information available from the sensor.

Mining sites, including open-pit mines, tailing ponds, and processing plants, represent complex industrial systems with high technological loads and significant potential risk to personnel safety and the environment. This requires continuous monitoring and safety assessment (Kostadinova and Vladkova, 2025). Effective monitoring of such sites is essential for the timely identification of changes, risk assessment, and support of safety management processes. Satellite remote sensing methods provide an opportunity for regular, objective, and comprehensive spatial monitoring of mining territories and their infrastructure.

Reliable monthly monitoring of mining territories cannot be effectively achieved using only one type of satellite data—optical or radar—but requires an integrated approach that combines the advantages of both sensor types. It is therefore expected that incorporating polarimetric features derived from Sentinel-1, particularly Entropy (H), Anisotropy (A), and Alpha angle (α), as additional input features to Sentinel-2 multispectral data will improve the discrimination and classification of land cover classes within open-pit mining environments.

Data and methods

“Ada Tepe” is an open-pit mine for the extraction of gold-bearing ore. Located 3 km south of the town of Krumovgrad (Fig. 1), it is the first modern, newly developed mine in the country in the past 40 years.

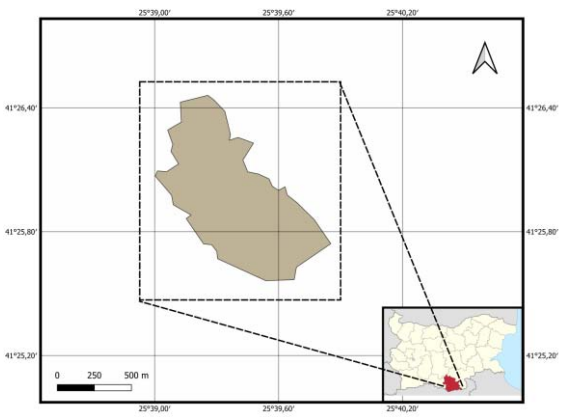


Fig. 1. A map showing the location of the “Ada Tepe” open pit mine

Ore mining and processing operations began in August 2019. The site utilises open-pit mining technology for gold-bearing ores and processing into a gold-silver concentrate through mechanical excavation, drilling and blasting, extraction, crushing, grinding, and flotation (DPM Ada Tepe, n.d.). After 8 years of operation, mining production ended in mid-2026. For the mine, which was constructed entirely within the “Natura 2000” protected area, active land reclamation is planned for 2028, followed by a mandatory 10-year environmental monitoring period. The entire process—from mine construction and operation to subsequent land reclamation and future site development—can be tracked over time using satellite remote sensing methods.

Data Sources

For the purposes of the study, satellite data from the period prior to the start of ore extraction and processing were used. The Single Look Complex (SLC) radar data from Sentinel-1, operating in dual-polarisation mode (VV and VH), are from February 2019. The multispectral data from Sentinel-2 are from March 2019, with the spectral bands offering the highest informative value for land cover determination selected for processing. These include the visible, the near-infrared (NIR), and the short-wave infrared (SWIR) bands. These data provide detailed spectral separation of natural and anthropogenic features on the Earth's surface.

The processing and analysis workflow was implemented using the SNAP and QGIS software products and involved strictly defined pre-processing steps for both optical and radar data. The primary processing was conducted in SNAP, while additional analyses and accuracy assessment were performed in QGIS. A key advantage for selecting the QGIS geographic information software is its rich ecosystem of plugins, which allow for expanding its functionality according to user needs—ranging from terrain analysis and remote sensing to modelling and automation (Slavova, 2025).

Methodological Framework

In data fusion classification, two approaches are applied:

- pre-classification fusion – combining features prior to classification;
- post-classification fusion – combining two separate classifications performed on satellite data obtained from different sensors.

In the first approach, classification within the workflow is performed on the combined information obtained from different sensor types. The resulting output is based on a single joint matrix of input features containing spectral and structural information simultaneously available for each sample. In the second approach, optical and SAR data are classified independently, and the resulting maps are combined using rules, statistical methods, logical operators, or by selecting the most probable class predicted by both models. To illustrate the physical interpretation of the considered parameters, fig. 2 (European Space Agency, n.d.) presents the $H-\alpha$ plane, which describes the primary scattering mechanisms—surface scattering, volume scattering, double-bounce scattering—as well as an assessment of the degree of randomness of the scattering process.

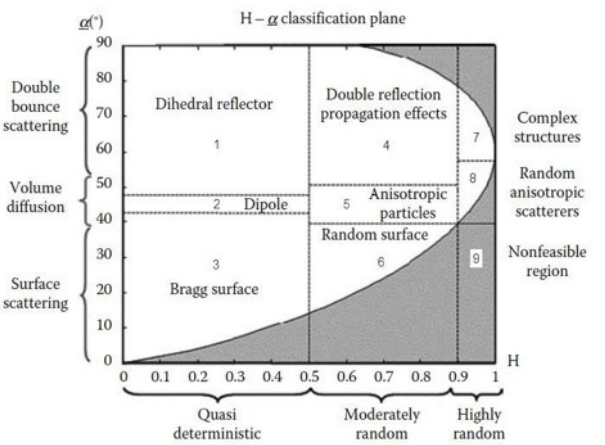


Fig. 2. H / Alpha plane (adapted from Cloude & Pottier, 1997/ESA)

The defined $H{-}\alpha$ plane (Fig. 2) enables quantitative analysis of POL-SAR images within the ranges 0 ≤ H ≤ 1 and 0 ≤ α ≤ 90°. In the two-dimensional $H{-}\alpha$ classification space, all possible random and deterministic scattering mechanisms can be represented. At H = 0, all values of 0 ≤ α ≤ 90° can be obtained, whereas at H = 1, only a single value of α = 60° exists. This reflects the increasing inability to distinguish between different scattering mechanisms as entropy increases.

The two boundary curves, I and II, define the region in which partially polarised scattering mechanisms can be identified, intersecting at H = 1 and α = 60°. As shown by Cloude and Pottier (1997), all experimental results, regardless of the method used to measure the full polarimetric matrix (such as the Kennaugh matrix or others), must fall within the admissible region (between curves I and II) of the $H{-}\alpha$ plane.

Due to the lack of full polarimetric coverage, an adapted Cloude–Pottier dual-polarisation decomposition is utilised. This approach is based on the eigenvalue analysis of the covariance matrix (C2) (Mascolo et al., 2021). Entropy (H) reflects the degree of randomness of the scattering process. A value of 0 indicates pure surface scattering, whereas a value of 1 indicates fully random scattering (characteristic of dense vegetation). Alpha angle is a parameter describing the dominant scattering mechanism type. Small angles (α≈0°) represent dominant surface scattering from a smooth terrain. Intermediate values (α≈45°) correspond to volume scattering from vegetation, while high values (α≈90°) indicate double-bounce scattering, typical of metallic mining structures and steep pit walls (Wang et al., 2024).

Data Processing and Experimental Results

Two independent supervised classifications were performed using the Maximum Likelihood Classifier algorithm: the first utilised solely the multispectral bands of Sentinel-2, while the second is based on the fusion of optical and radar data.

Preprocessing of the Sentinel-2 optical image was performed for subsequent fusion with Sentinel-1 data. Spatial resampling of the optical data was applied to bring the Sentinel-2 bands to a uniform spatial resolution. To optimise the computational process, a subset was performed, retaining only the spectral bands relevant for mapping the mine. Reprojection of the image into the UTM coordinate system was executed, ensuring the necessary geometric alignment with the radar data required for subsequent processing stages.

Six regions of interest (ROIs) were defined for the mining complex and its surrounding territory: Forest, Urban Land, Agriculture Land, Open Pit Mine, Water, and Barren Land. Following the application of the Maximum Likelihood Classifier, a classified index image of the mine and its surrounding area was generated (Fig. 3).

To execute the second classification, data from Sentinel-1 and Sentinel-2 were integrated via data fusion. Six land cover classes were established within the mining complex and its surrounding area. The Maximum Likelihood Classifier algorithm was applied, following methodologies also utilised in similar classification studies by other authors (Sim et al., 2013; Kumar et al., 2017).

For the purpose of this classification, the parameters Entropy (H), Anisotropy (A), and Alpha angle (α), derived via the Cloude–Pottier dual-pol decomposition of Sentinel-1 SLC data, were used as input features in the pre-classification fusion process.

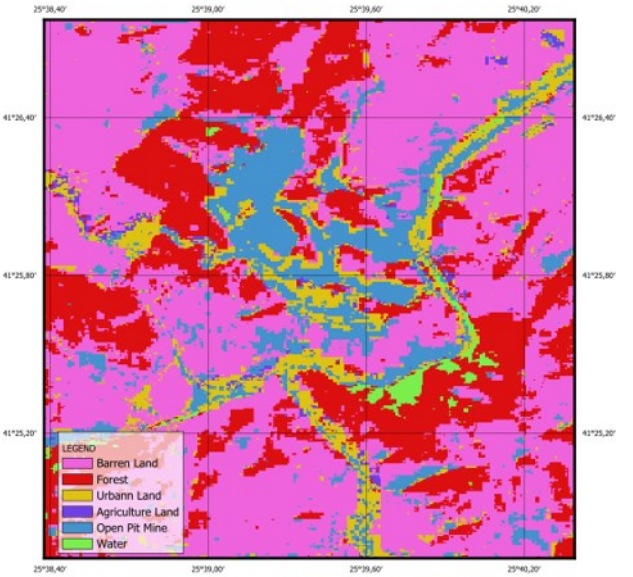


Fig. 3. A classified land cover index image derived from Sentinel - 2 data

In the data processing graph presented in fig. 4, H and α were not used for direct classification within the $H{-}\alpha$ space, but rather as additional bands within the Maximum Likelihood Classifier alongside the Sentinel-2 optical bands.

The Sentinel-1 data provide partial polarimetric information from which a set of informative features was defined for subsequent classification by calculating σ^0_{VV}, σ^0_{VH}, the VV/VH ratio, GLCM texture features, and the polarimetric attributes H, A, and α derived from the Cloude–Pottier dual-pol decomposition.

This partial polarimetric information includes $H/A/\alpha$ derived from the decomposition of the *C2* covariance matrix, where *C2* represents reduced polarimetry containing only VV, VH, and their mutual coherence.

Although Sentinel-1 SLC data do not provide the complete structural information available from full-pol SAR satellites, the extracted parameters contain sufficient physically interpretable features for effective classification when performing multi-sensor fusion.

A flowchart of the second classification process is presented in fig. 4.

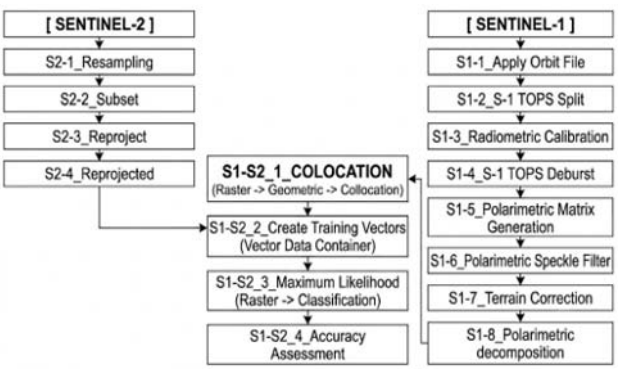


Fig. 4. Data fusion of radar data as additional variables to the optical data

Preprocessing of the Sentinel-1 SLC radar data is carried out to convert the complex radar signal values into indicators of terrain structure, extract polarimetric information, and apply geometric corrections. The processing is executed in several sequential stages, including covariance matrix extraction (*C2*), filtering and decomposition, and geocoding with terrain correction. The extraction of the covariance matrix (*C2*) involves applying precise satellite orbit files to the product (Apply Orbit File), thermal noise removal (S-1 Thermal Noise Removal), signal calibration to complex values (Calibration), followed by merging into a single image by removing inter-burst boundaries (S-1 TOPS Deburst). In the subsequent stage, polarimetric speckle filtering (Speckle Filtering) and polarimetric decomposition (Polarimetric H-A-Alpha Decomposition) are performed. To mitigate radar-specific speckle noise, a specialised filter (Refined Lee) is applied, which allows, for example, the preservation of sharp quarry contours. This is followed by Cloude–Pottier decomposition, through which the physical scattering parameters of the radar signal are computed—Entropy (H), Anisotropy (A), and Alpha angle (α). The third stage of radar data preprocessing involves geocoding and terrain correction (Terrain Correction). Utilising a Digital Elevation Model, geometric distortions—such as those occurring on steep mine slopes—are corrected, and the radar data are reprojected into the UTM coordinate system. The next step in the data processing of the second classification process presented in fig. 4. consists of performing supervised classification on the fused data from both satellite images, using the predefined training regions of interest (ROIs) from the first classification. For the classification, the Maximum Likelihood statistical algorithm was applied, which jointly analyses both the spectral channels of the optical image and the radar polarimetric features. This statistical algorithm was selected for its ability to account not only for the mean reflectance values of the pixels, but also for the variances and correlations between individual spectral channels (Lillesand et al., 2015). As a final result, a thematic map of the mine site and its surrounding area is generated (Fig. 5).

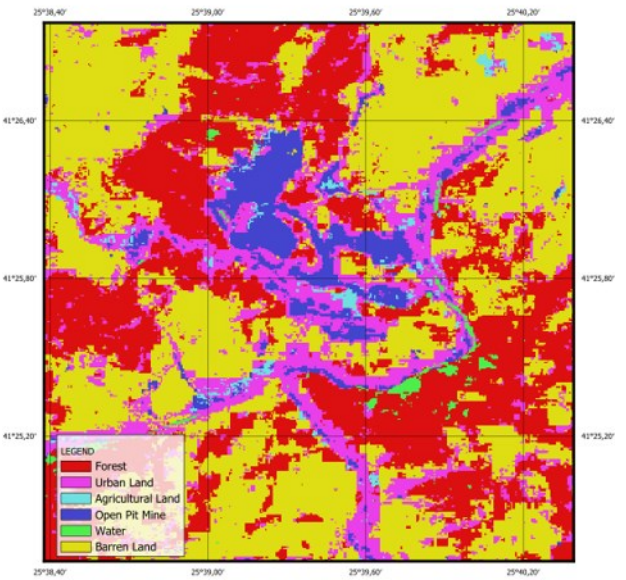


Fig. 5. A classified index image of land cover derived from an integrated set of optical and SAR data

In addition to the two aforementioned classifications, a polarimetric unsupervised classification (Cloude–Pottier Dual Pol) was performed for the Ada Tepe mine area using Sentinel-1 SLC data (Fig. 6).

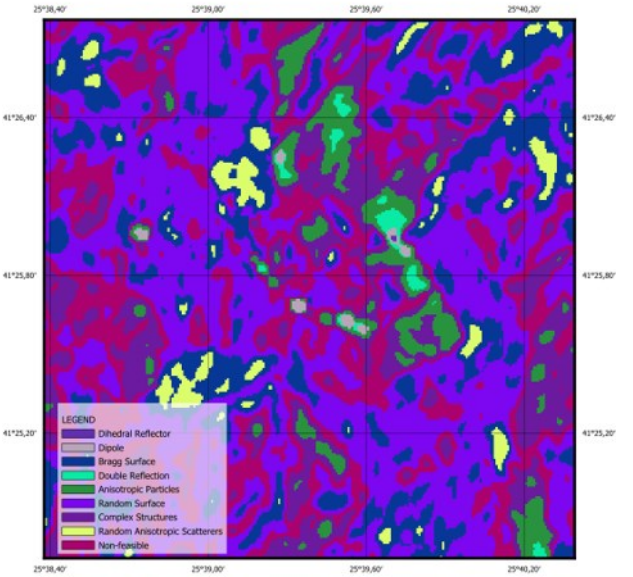


Fig. 6. Polarimetric land cover classification in the Ada Tepe mine area derived from Sentinel-1 data

Despite the overall low model accuracy, the polarimetric classification of Sentinel-1 data illustrates a high discriminative capability in identifying features with distinct physical properties in the Ada Tepe mine area. Water bodies are classified with high precision due to strong surface scattering and low entropy of the radar signal, as previously described by Cloude and Pottier (1997). A similar conclusion can be drawn from analysing the spatial distribution of classes across the two approaches, as presented in Table 1. While all other feature classes are redistributed among different object categories relative to their percentage proportions in the provided table, water areas maintain identical values and are identified with equal reliability by both approaches.

Table 1. *Spatial class distribution for both approaches*

Class name	Sentinel 2		
	Pixel count	Percentage(%)	Area(m²)
Forest	1375527	31,70%	137552700
Urban Land	678924	15,60%	67892400
Agricutural Land	64692	1,50%	6469200
Open Pit Mine	183464	4,20%	18346400
Water	12413	0,30%	1241300
Barren Land	2025586	46,70%	202558600
Class name	**Sentinel 1+Sentinel 2**		
	Pixel count	**Percentage(%)**	**Area(m²)**
Forest	956587	25,60%	95658700
Urban Land	41748	9,70%	4174800
Agricutural Land	78492	1,80%	7849200
Open Pit Mine	430388	9,90%	43038800
Water	13751	0,30%	1375100
Barren Land	2289425	52,70%	228942500

The metallic buildings and industrial facilities of the processing plant (represented in yellow in fig. 6) stand out distinctly due to the double-bounce scattering mechanism. This

mechanism is highly characteristic of man-made structures and metallic corner reflectors, which generate stable and unique classification features in the radar image, even when overall classification of the surrounding terrain is challenging (Cloude & Pottier, 1997). Table 1 also shows a percentage increase in mapped Open Pit Mine areas (from 4.2% to 9.9%) and Barren Land (from 46.7% to 52.7%), accompanied by a reduction in areas classified as Forest and Urban Land. This indicates a more detailed discrimination of complex mining territories and contributes to more reliable mapping; however, for certain feature classes, there remains a need to optimise classification features or the classification model used.

Analyses and comparison

The overall accuracy assessment results derived from Sentinel-2 data show an Overall Accuracy (OA) of 82.5% (95% CI: 70.6%–90.2%) and a Kappa coefficient of 0.78 (95% CI: 0.6612–0.9052), indicating high accuracy and good agreement between the classification and reference data.

The accuracy assessment obtained from the joint processing of active and passive sensor data (Sentinel-1 + Sentinel-2) demonstrates an increase in overall accuracy to 87.7% (95% CI: 76.8%–93.9%) and a Kappa coefficient of 0.85 (95% CI: 0.7428–0.9535). This represents a 5.2% accuracy improvement, confirming the enhanced effectiveness of combining Sentinel-1 and Sentinel-2 data compared to utilising optical imagery alone.

The obtained results align with the conclusions reported by Clerici et al. (2017), who achieved an accuracy of 88.75% for land cover mapping in Colombia using a similar data fusion approach of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery. Furthermore, Hu et al. (2021) reported that during the classification of agricultural and industrial areas, using Sentinel-1 satellite data alone yielded an accuracy of approximately 60%, whereas applying data fusion with Sentinel-2 satellite data increased this performance metric to over 95%.

This demonstrates that phase information, along with conventional magnitude data, can be used to study scattering mechanisms and resolve ambiguities regarding the source of scattering from vegetation and soil components of the target area. Polarimetric classifiers can utilise polarimetric contrast classification, scattering mechanism classification, or more conventional approaches (such as Maximum Likelihood Classification), where phase information provides additional channels to the classifier (Boerner et al., 1998).

Conclusion

The results obtained from applying supervised classification to the fused data from both approaches, as well as unsupervised classification based on Sentinel-1 data, provide complementary spectral and structural information, thereby enhancing the quality of thematic classification in mining areas. By integrating polarimetric features - such as Entropy (H), Anisotropy (A), and Alpha angle (α) - along with spectral and textural characteristics, the Overall Accuracy increased from 82.5% to 87.7%, and the Kappa coefficient rose from 0.78 to 0.85, confirming the efficacy of the multi-sensor data fusion approach. The supplementary polarimetric classification of Sentinel-1 imagery demonstrated a strong ability to discriminate features with distinct scattering mechanisms, such as water bodies and industrial facilities, offering a viable means to complement the information derived from multispectral imagery. The proposed data processing approach can be applied to operational monitoring of open-pit mines, tracking land cover changes, and supporting reclamation and management activities in mining territories. This research can be expanded by using time series of Sentinel-1 and Sentinel-2 data, alongside the implementation of advanced machine learning algorithms and the evaluation of additional polarimetric parameters to further enhance classification accuracy.

References

Boerner, W.-M., Mott, H., van Zyl, J., & Zebker, H. (1998). Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts. In: F. M. Henderson & A. J. Lewis (Eds.), *Principles & Applications of Imaging Radar* (Manual of Remote Sensing, 3rd ed., Vol. 2, pp. 271–357). John Wiley & Sons.

Clerici, N., Valbuena Calderón, C. A., & Posada, J. M. (2017). Fusion of Sentinel-1A and Sentinel-2A data for land cover mapping: a case study in the lower Magdalena region, Colombia. *Journal of Maps*, 13(2), 718–726. https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1372316

Cloude, S. R., & Pottier, E. (1996a). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34*(2), 498–518.

Cloude, S. R., & Pottier, E. (1996b). The concept of polarimetric entropy in optical scattering. *Optical Engineering, 35*(6), 1599–1610.

Cloude, S. R., & Pottier, E. (1997). An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35*(1), 68–78. https://doi.org/10.1109/36.551935

DPM Ada Tepe. (n.d.). *Home*. https://www.dpmmetals-adatepe.com/bg

European Space Agency. (n.d.). *Polarimetric classification operator*. STEP Documentation. https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/9.0.0/snap-toolboxes/org.csa.rstb.rstb.op.classification.ui/operators/PolarimetricClassificationOp.html

Hu, B., Xu, Y., Huang, X., Cheng, Q., Ding, Q., Bai, L., & Li, Y. (2021). Improving urban land cover classification with combined use of Sentinel-2 and Sentinel-1 imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 10*(8), Article 533. https://doi.org/10.3390/ijgi10080533

Joshi, N., Baumann, M., Ehammer, A., Fensholt, R., Grogan, K., Hostert, P., Jepsen, M. R., Kuemmerle, T., Meyfroidt, P., Mitchard, E. T. A., Reiche, J., Ryan, C. M., & Waske, B. (2016). A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring. *Remote Sensing, 8*(1), 70. https://doi.org/10.3390/rs8010070

Kostadinova, N., & Vladkova, B. (2025). Key assessment indicators for safety in mineral processing plant. *Proceedings of the International Conference on Research in Engineering, Technology and Science* (Peja, Kosovo, July 10–13, 2025, pp. 63–71). https://doi.org/10.55549/epstem.1803822

Kumar, V., Bhardwaj, A., & Haldar, A. L. (2017). Land use land cover (LULC) classification using fusion of multi-sensor optical and microwave data from Sentinel mission. *Proceedings of the 38th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2017)*. New Delhi, India.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.

Mascolo, L., Cloude, S. R., & Lopez-Sanchez, J. M. (2021). Model-based decomposition of dual-pol SAR data: application to Sentinel-1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–19. IEEE. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3137588

Sim, C. K., Abdullah, K., Mat Jafri, M. Z., & Lim, H. S. (2013). Combination of radar and optical remote sensing data for land cover/use mapping. *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace 2013)* (pp. 231–235). IEEE. https://doi.org/10.1109/IconSpace.2013.6599469

Slavova, T. (2025). *Vizualiziray sveta: Patevoditel v geoprostranstvenite tehnologii*. IK “Sv. Ivan Rilski”. ISBN: 978-954-353-502-6

Tavares, P. A., Beltrão, N. E. S., Guimarães, U. S., & Teodoro, A. C. (2019). Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 for classification and land use and land cover mapping in the urban area of Belém, Eastern Brazilian Amazon. *Sensors, 19*(5), Article 1140. https://doi.org/10.3390/s19051140

Wang, M., Wang, L., Guo, Y., Cui, Y., Liu, J., Chen, L., Wang, T., & Li, H. (2024). A comprehensive evaluation of dual-polarimetric Sentinel-1 SAR data for monitoring key phenological stages of winter wheat. *Remote Sensing, 16*(10), Article 1659. https://doi.org/10.3390/rs16101659

COMPETENCY PROFILE AND INTERNATIONAL POSITIONING OF UNDERGROUND CONSTRUCTION ENGINEERS FROM UMG “ST. IVAN RILSKI”

Borislav Borisov, Pavel Pavlov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia. E-mail: b.borisov@mgu.bg; p.pavlov@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents an analysis of the professional competency profile and labour market positioning of the holders of a degree in *Underground Construction* from the University of Mining and Geology (UMG) “St. Ivan Rilski”. The programme’s hybrid academic profile, integrating civil, geotechnical, and mining engineering with a focus on underground structures, is examined within the context of both Bulgarian and international underground construction labour markets. The study draws on a documentary analysis of the current bachelor’s and master’s curricula combined with a comparative review of the national and international professional framework. Key national infrastructure developments, including Sofia Metro Line 3, TEN-T railway tunnel projects, and the mining sector, are analysed as drivers of domestic demand for underground construction engineers. The paper proposes concrete institutional measures to enhance international recognition, including EUR-ACE® accreditation via a transnational procedure and an updated professional licensing framework within the Chamber of Engineers in Investment Design (KIIP).

Key words: underground construction, tunnelling engineering, professional recognition, professional mobility, mining engineering.

КОМПЕТЕНТНОСТЕН ПРОФИЛ И МЕЖДУНАРОДНО ПОЗИЦИОНИРАНЕ НА ИНЖЕНЕРИТЕ ПО „ПОДЗЕМНО СТРОИТЕЛСТВО“ ОТ МГУ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“

Борислав Борисов, Павел Павлов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

Резюме. Докладът представя анализ на компетентностния профил и възможностите за професионална реализация на инженерите, завършили специалност „Подземно строителство“ в МГУ „Св. Иван Рилски“. Хибридният учебен профил, съчетаващ строително, геотехническо и минно инженерство с фокус върху подземните съоръжения, е разгледан в контекста на националния и международния пазар на труда в областта на подземното строителство. Изследването се основава на документален анализ на действащите бакалавърски и магистърски учебни планове и на съпоставителен преглед на националната и международната професионална рамка. Ключови национални инфраструктурни проекти – Софийското метро (Линия 3), железопътните тунели по коридорите на Трансевропейската транспортна мрежа (TEN-T) и минният сектор – са анализирани като двигатели на вътрешното търсене на инженери по подземно строителство. Формулирани са конкретни институционални мерки за подобряване на международното признаване, включително акредитация EUR-ACE® (Европейска акредитация на инженерни програми) чрез транснационална процедура и актуализиране на рамката на проектантската правоспособност в Камарата на инженерите в инвестиционното проектиране (КИИП).

Ключови думи: подземно строителство, тунелно инженерство, професионално признаване, професионална мобилност, минно инженерство.

Въведение

В съвременния пазар за подземна инфраструктура професионалната реализация на инженерите зависи както от придобитите технически компетенции, така и от способността тези компетенции да бъдат разпознати и признати от работодатели и лицензионни органи. Специалност „Подземно строителство“ в Минно-геоложкия университет (МГУ) „Св. Иван Рилски“ подготвя инженери с хибриден образователен профил, който обединява строително, геотехническо и минно инженерство в единна програма, насочена към проектирането, строителството и поддръжката на подземни, както и специфични наземни и надземни съоръжения.

Програмата обхваща широк кръг от професионални приложения – от гражданска инфраструктура (метростанции, пътни и железопътни тунели, хидротехнически подземни съоръжения, укрепване на свлачища, дълбоко фундиране) до минни изработки и геотехнически съоръжения. Именно тази комбинация от строително-конструктивна, геотехническа и минно-технологична подготовка обуславя обхвата на потенциалната реализация на завършилите специалисти.

Развитието на метрополитените, транспортните и другите видове тунели и специализираните геотехнически обекти в редица държави очертава устойчиво търсене на инженери със задълбочени комбинирани подземно-технологични, геотехнически и конструктивни компетентности. Според различни пазарни анализи с илюстративен характер, основани на различно дефинирани пазарни обхвати и търговски методологии (Research and Markets, 2026; Fairfield Market Research, 2025), поради което имат само контекстен характер. Налични са индикации за засилена потребност от подобни специалисти в редица международни инфраструктурни програми (ITA-AITES, 2024; UTS, 2024), което допълнително повишава значението и ценността на квалификацията.

Настоящата статия систематизира компетентностният профил на специалността, цели да анализира търсенето на националния и международния пазар и да предложи конкретни мерки за по-ефективно институционално и индивидуално позициониране на инженерите по подземно строителство.

Методологически проучването се основава на анализ на действащите учебни планове на бакалавърската и магистърските програми на специалността (Протокол № 8/22.05.2024 г.), съпоставителен преглед на компетентностния профил и интерпретация на професионалната им значимост в национален и международен контекст.

Компетентностен профил

Образователна рамка

Специалността „Подземно строителство“ е акредитирана от Националната агенция за оценяване и

акредитация (НАОА) в професионално направление 5.7 „Архитектура, строителство и геодезия“ (НАОА, 2024; конкретното решение, датата и срокът на акредитацията са публикувани в регистъра на агенцията), което я позиционира в категорията на строителното инженерство. Докторантските програми на катедрата подготвят специалисти в областта на „underground civil and mining engineering“ (МГУ, 2024) – формулировка, която отразява обединяващия характер на образователната програма.

Бакалавърската програма (4 години) надхвърля минималния нормативен обем от 240 ECTS (Европейска система за трансфер и натрупване на кредити), като действащите учебни планове от 2024 г. включват 255 ECTS в редовна и 252 ECTS в задочна форма на обучение. Тя изгражда последователна траектория от фундаментални инженерни дисциплини (линейна алгебра, математически анализ, физика, теоретична механика, съпротивление на материалите и т. н.), през общоинженерни курсове (маркшайдерство, геодезия, електротехника, механика на флуидите, CAD (компютърно проектиране) системи и др.), базови строителни дисциплини (строителни материали, строителна механика на подземните съоръжения, земна и скална механика, стоманобетон и др.) до профилиращи дисциплини (подземно строителство, подземна градска инфраструктура, тунелно минно строителство, взривна техника и технологии, надземни руднични конструкции и съоръжения, вентилация на подземни обекти, корозия и защита от корозия, специални методи за подземно строителство, инжекционни работи, техническа безопасност и др.). Учебният план предлага значителна сумарна учебна заетост, при ясно изразен дял на курсови проекти и учебни практики, което подчертава приложния характер на подготовката (учебен план, Протокол № 8/22.05.2024 г. на Академичния съвет на МГУ).

Магистърската програма по „Подземно строителство“ (73 ECTS, 1 година) надгражда бакалавърската основа чрез дисциплини като „Динамика и устойчивост на подземни съоръжения, Сеизмика“, „Специални методи за подземно строителство“ и „Консервация, ликвидация и рекултивация на рудници и подземни съоръжения“, „Подземни депа за отпадъци“. Паралелно магистърската програма по „Геотехника“ (71 ECTS, МГУ, 2024d) разширява профила към геотехническо проектиране и подобряване на земната основа, което очертава свързана образователна среда от две самостоятелни магистърски специалности.

Интердисциплинарен характер

Учебният план е уместно да се разглежда не като списък от дисциплини, а като система от взаимосвързани групи компетентности. Въз основа на действащите планове от 2024 г. те могат да бъдат документално обособени в седем групи: математико-аналитична, геоложко-геотехническа, конструктивна, подземно-строителна, изпълнителска с техническа безопасност, свързана с дълготрайността на съоръженията и практическа подготовка чрез курсови проекти и учебни практики (Таблица 1).

Таблица 1. *Матрица на групите компетентности с основни дисциплини и ECTS кредити по действащите учебни планове от 2024 г. на специалност „Подземно строителство“ (бакалавърска и магистърска степен). Кредитите са посочени по учебния план за редовна форма на обучение, като при задочната форма общият обем е 252 ECTS. ECTS кредитите измерват общата студентска натовареност и не могат да бъдат директно преобразувани в семестриални кредитни часове (semester credit hours). Международната оценка се извършва въз основа на академичната справка, хорариума и официалните описания на дисциплините.*

Група компетентности	Основни дисциплини (ECTS)	Документално доказуем резултат	Потенциални области на професионална реализация
Математико-аналитична	Линейна алгебра и аналитична геометрия (6), Математически анализ (6), Многомерен анализ и диференциални уравнения (6), Приложна статистика (6), CAD системи (5)	Количествено моделиране и инженерни изчисления	Изчислителни и аналитични задачи във всички фази на проектирането
Геоложка и геотехническа	Обща геология (5), Хидрогеология и инженерна геология (7), Земна и скална механика (7), Земна механика и фундиране (9, курсов проект 2)	Оценка на земната основа и скалния масив, геотехническо проектиране	Геотехническо проектиране, фундиране и укрепване при съответната проектантска правоспособност
Конструктивна	Физика I и II (6+6), Теоретична механика (6), Съпротивление на материалите (6), Строителна механика на подземните съоръжения (7), Стоманобетон (6, курсов проект 2)	Анализ и оразмеряване на носещи конструкции	Дейности по конструктивен анализ и оразмеряване
Подземно строителство	Подземно строителство (7, курсов проект 2, практика 4), Подземна градска инфраструктура (7, курсов проект 2, практика 5), тунелно минно строителство и метрополитени	Проектиране и технология на тунели и подземни съоръжения	Проектиране и технология на подземни съоръжения при съответната правоспособност
Изпълнение и безопасност	Минни технологии (5), Минни и строителни машини (5), Взривна техника и технологии (7, практика 2), Вентилация на подземни обекти (6, курсов проект 2), техническа безопасност	Организация и контрол на строителното изпълнение	Техническо ръководство и управление на строителното изпълнение
Дълготрайност на съоръженията	Строителни материали (8), корозия и защита от корозия, хидроизолационни материали (магистърска степен)	Защита и експлоатационна надеждност на конструкциите	Технологичен контрол на материалите и осигуряване на дълготрайността
Практическа подготовка	Курсови проекти и учебни практики по геодезия и маркшайдерство, взривна техника, подземно строителство и подземна градска инфраструктура	Прилагане на знанията в реални инженерни задачи	Учебно-проектна и практическа подготовка по време на обучението
Магистърско надграждане (ПС, 73 ECTS)	Строителни конструкции (с курсов проект), геотехника, динамика, устойчивост и сеизмика, технология за изграждане на подземни съоръжения, подземно градско строителство (с курсов проект), специални методи, хидроизолационни материали, взривни технологични процеси, консервация, ликвидация и рекултивация	Напреднало проектиране и специализирани технологии	Напреднало проектиране, експертна и научноизследователска дейност

Математико-аналитичната и конструктивната група изграждат прехода от абстрактни модели към инженерна интерпретация и оразмеряване. Геоложко-геотехническата група формира способността за концептуализиране на

взаимодействието между земна основа, скален масив и конструкция. Подземно-строителната и изпълнителската група насочват подготовката към проектирането, технологиите и реалното изпълнение, а групата за дълготрайност и практическата подготовка осигуряват експлоатационната надеждност и прилагането на знанията в инженерни задачи. Магистърската програма по „Подземно строителство“ (73 ECTS) надгражда тези групи с дисциплини по строителни конструкции, геотехника, динамика, устойчивост и сеизмика на подземни съоръжения, технология за изграждане, специални методи, хидроизолационни материали и консервация, ликвидация и рекултивация на подземни съоръжения.

Изброените групи формират профил на инженер, способен да работи по обекти с различен мащаб – от транспортни тунели и метростанции до геотехнически съоръжения, минно-добивни изработки и дейности по рекултивация. Връзката между групите, основните дисциплини и документално доказуемите резултати е систематизирана в Таблица 1, с посочени ECTS кредити по действащите учебни планове от 2024 г. (МГУ, 2024a; 2024b; 2024c). Съпоставянето с международни програми следва да се прави на равнище функционален профил, а не на равнище единични дисциплини. В този смисъл програмата показва функционална съпоставимост с международни модели в областта на подземното и тунелното строителство, като същевременно запазва собствен институционален контекст.

Цифрови компетентности и съвременни методи

Цифровизацията на подземното строителство поставя все по-високи изисквания за работа в среда на моделиране, интегрирани данни и междудисциплинарна координация. В действащите учебни планове тази линия е видима най-вече чрез CAD подготовката, геодезическата и маркшайдерска основа и цялостната аналитична ориентация на програмата. Оттук може да се заключи, че инженерната подготовка създава добра база за последващо надграждане в области като числено моделиране, BIM (информационно моделиране в строителството), конструктивен и геотехнически мониторинг.

В международната практика все по-голямо значение придобиват работата със споделени цифрови модели, интегрирането на данни от наблюдения (поведението на съоръженията и вместващия масив) и адаптивният подход към геотехническата неопределеност. Тези рамки обаче не следва да се интерпретират като изрично покрити в действащия учебен план, а като професионална среда и познания, към която профилът на програмата е съответстващ (ITA-AITES, 2024). По-подходящо е цифровите компетентности да се разглеждат като разширение на фундаментално-аналитичния и геотехническо-конструктивния профил на специалността към изискванията на съвременната инженерна практика.

Национален пазар на труда

Транспортна инфраструктура

Националният пазар в областта на подземното строителство се формира предимно от развитието на метрото, железопътните тунелни участъци и свързаните с тях градски и геотехнически дейности. Разширението на столичното метро и тунелните компоненти на проектите по TEN-T (Трансевропейската транспортна мрежа) показват, че българската практика все по-често изисква инженери, способни да съчетават геотехническо разбиране, конструктивно мислене, технологична компетентност и работа в сложна градска среда (TYLin, 2024; Railway Pro, 2025).

Комплексните геоложки и градоустройствени условия при изграждането на подземна инфраструктура в София – висок водоносен хоризонт, урбанизирана среда и необходимост от прецизен контрол на деформациите показват, че реалната проектна практика поставя едновременно геотехнически, конструктивни, технологични и координационни изисквания. В такъв тип среда интердисциплинарният профил на инженерите по подземно строителство се оказва особено приложим (TYLin, 2024). Железопътните тунели по коридорите на TEN-T представляват допълнителен пазарен сегмент с нарастващо значение.

Минен сектор и допълнителни приложения

Добивната промишленост остава съществено поле за реализация на специалистите. Подземните рудници в Родопите и Средногорието, въгледобивните обекти и разработването на нови находища изискват постоянен приток на специалисти, запознати с минните изработки, укрепителните системи, водоотлива, проветряването и взривните работи. При новия добивен цикъл, свързан с търсенето на критични суровини (литий, медни руди, злато, редкоземни елементи и др.), тези компетенции придобиват допълнителна стойност.

Обхватът на приложение на придобиваните компетентности надхвърля тунелите и рудниците. Той включва хидротехнически подземни съоръжения, укрепване на свлачища и дълбоки изкопи, инжекционни дейности, подземни депа, подобряване на земната основа, както и консервация и рекултивация на подземни обекти. Тъкмо тази широта на профила обуславя устойчивата професионална приложимост на специалността в различни сегменти на инженерната строителна практика.

Международно позициониране

Глобален пазар

Световният пазар в областта на тунелното строителство нараства устойчиво, движен от урбанизацията, мегапроектите за метро в Азия и Близкия изток и мащабните инфраструктурни инвестиции в Европа. Пазарът на тунелнопробивни машини се оценява на около 7,6 млрд. USD през 2025 г. с прогнозен ръст до 12,9 млрд. USD до 2034 г. (Fortune Business Insights, 2026). Пазарните оценки в този раздел са с различен обхват – общо тунелно строителство, по-широка инфраструктурна дейност и пазар на тунелнопробивни машини – поради което имат илюстративен характер и не следва да се разглеждат като взаимно потвърждаващи се стойности.

В литературата и академично-индустриалните инициативи се открояват индикации за нарастваща потребност от подготвени кадри в Австралийско-Тихоокеанския регион, Сингапур, Индия и Персийския залив и редица други места, където темповете на разширяване на метро системите изпреварват подготовката на национални

специалисти (ITA-AITES, 2024; UTS, 2024). Международната практика изпитва необходимост от инженери, които могат да свързват геотехническото разбиране на масива, конструктивните анализи и технологичното умение на изпълнението. Профилът на програмата в МГУ създава съответната основа за развитие в областта на конвенционалното и механизираното тунелостроене, строителния контрол и управлението на геотехническата неопределеност.

Предимството на завършилите е във фокусираната в подземните съоръжения интердисциплинарна подготовка. Участието в международни работни групи на ITA-AITES (Международна асоциация по тунелно строителство и подземно пространство) и в изследователски консорциуми по рамковата програма „Хоризонт Европа“ (Horizon Europe) представлява допълнителен път за изграждане на международна репутация на специалността.

Институционален потенциал за международна видимост

Потенциалът на програмата за международна видимост следва да се развива чрез ясно институционално и академично представяне на нейния профил. При наличие на адекватно англоезично описание на резултатите от обучението и ясно терминологично позициониране, специалността би могла да се идентифицира като специфична европейска програма с фокус върху подземни съоръжения, геотехника и приложни строителни технологии. В официалния списък на ITA-CET (Комитет по образование и обучение към ITA-AITES), актуализиран през юни 2026 г., МГУ „Св. Иван Рилски“ е включен като U-31 в университетската мрежа (ITA-CET, 2026). Членството създава предпоставки за по-висока международна видимост, а участието в програмите „Еразъм+“ (Erasmus+) допълнително улеснява студентската мобилност.

Национална правоспособност и сертификации

Проектантска правоспособност в КИИП

Завършилите придобиват право, след необходимия практически стаж, да кандидатстват за проектантска правоспособност в Камарата на инженерите в инвестиционното проектиране (КИИП). Ограничената проектантска правоспособност (ОПП) и пълната проектантска правоспособност (ППП) се придобиват след нормативно определен професионален и проектантски стаж при условията на чл. 7 от ЗКАИИП (Закон за камарите на архитектите и инженерите в инвестиционното проектиране), диференцирани според категориите обекти по чл. 137 от ЗУТ (Закон за устройство на територията) (ЗКАИИП, 2003).

Наличната секционна и административна практика изглежда свързва квалификацията предимно с част „Минна“ (КИИП, Наредба № 2), което отразява частично реалния спектър от придобивани знания и следва да бъде потвърдено чрез официален институционален анализ на регистрите и практиката по признаване. Учебните планове показват, че профилът включва значим строително-конструктивен и геотехнически компонент, който трудно може да бъде изчерпан единствено чрез горното административно-професионално позициониране. Налице са основания да се подходи към по-адекватно позициониране на инженерите в системата на КИИП. Възможностите за разширяване или прецизиране на професионалния обхват следва да бъдат предмет на институционален и правен анализ съвместно с КИИП, включително по отношение на Наредба № 2, вътрешните методики и приложимите проектантски части.

Европейски и международни сертификации

На европейско ниво FEANI (Европейска федерация на националните инженерни асоциации) предлага титлата „европейски инженер“ (Eur Ing), достъпна за инженери с акредитирана степен и документиран опит (FEANI, 2024). Във Великобритания статутът „правоспособен инженер“ (Chartered Engineer, CEng) чрез Института на строителните инженери (Institution of Civil Engineers, ICE) обичайно се постига при наличие на акредитирана степен, документиран запис за начално професионално развитие (Initial Professional Development, IPD) и успешно интервю, като Инженерният съвет (Engineering Council) допуска и индивидуален път на оценяване за кандидати без акредитирана степен (ICE, 2024). В САЩ лицензът „професионален инженер“ (Professional Engineer, PE) се издава от съответния щатски борд, като NCEES (Национален съвет на изпитните органи по инженерство и геодезия, САЩ) извършва оценка на образованието по свой стандарт и администрира изпитите по основи на инженерството (Fundamentals of Engineering, FE) и PE, а изискванията включват и практически опит (NCEES, 2025).

За целите на международното лицензиране е съществено квалификацията да бъде класифицирана като инженерна (Engineering), а не като само технологична. Вашингтонският акорд признава акредитационните системи за програми, подготвящи за професионалния профил „професионален инженер“ (Professional Engineer), докато Сиднискиятакорд се отнася до програми за „инженерни технолози“ (Engineering Technologist), като акордите не присъждат пряко индивидуални професионални титли (Engineers Australia, 2024). Адекватното англоезично обозначаване не замества процедурите по признаване, но има съществено значение за първоначалната интерпретация на профила. Формулировка от типа „Underground Construction and Tunnel Engineering“ (по модела на Висшето минно училище в Колорадо – Colorado School of Mines) би подобрила международната разпознаваемост и би намалила риска от класифициране като „construction management“, като официалното приемане на единно английско наименование изисква институционално решение (Борисов & Павлов, 2026).

Препоръки

EUR-ACE® акредитация

Към момента НАОА не притежава делегирани правомощия от ENAEE (Европейска мрежа за акредитация на инженерното образование) за присъждане на етикета EUR-ACE®, което прави транснационалната акредитация чрез оправомощена агенция – например германската акредитационна агенция ASIIN, чиято оторизация е подновена до 2028 г., една от реалистичните възможности за МГУ (ENAEE, 2024). Процедурата изисква самооценъчен доклад по рамковите стандарти и насоки на EUR-ACE

(EAFSG), последван от визита на международен екип. След предварителна оценка на необходимия административен, организационен и финансов ресурс (такси, самооценъчен доклад, превод и актуализиране на документацията) потенциалният ефект от EUR-ACE® акредитацията може да бъде съществен, като етикетът подобрява международната разпознаваемост на програмата и би създал благоприятни предпоставки за професионалната мобилност на завършилите.

Позициониране в КИИП

Целесъобразно е да се инициира взаимодействие с управителните органи на КИИП за актуализиране на категориите проектантска правоспособност. Подходящо решение би било разширяване на признатите части или въвеждане на категория „Подземни съоръжения и геотехника“. Конкретният нормативен път следва да се определи съвместно с КИИП след правен анализ на Наредба № 2 и приложимите проектантски части.

Терминологично и компетентностно документиране

МГУ издава двуезично Европейско приложение към дипломата (Europass Diploma Supplement), в което специалността е обозначена като „Underground Construction“. С оглед на семантичната асиметрия на термина „Construction“ в англоезичен контекст, би било целесъобразно при следващата актуализация на този документ обозначението да бъде прецизирано до „Underground Construction and Tunnel Engineering“. Наред с това, МГУ има възможност да въведе стандартно досие на компетентностите (Competency Portfolio) по модела на ICE за начално професионално развитие (IPD), водено от студентската практика нататък.

Представената в Таблица 1 матрица на компетентностите следва да бъде официално приета от университета и поддържана в двуезичен формат (български и английски) като част от институционалната документация на специалността – под формата на отделно двуезично институционално приложение и компетентностно досие, съпътстващо Европейското приложение към дипломата, чиято структура е стандартизирана. Така профилът на специалността става непосредствено разбираем и проверим както за националните професионални организации, така и за международните работодатели и академични партньори.

Заключение

Инженерите по „Подземно строителство“ от МГУ „Св. Иван Рилски“ се подготвят в рамките на интердисциплинарен профил, който съчетава строително, геотехническо и минно инженерство. Груповият (модулен) анализ на учебния план показва, че програмата обхваща седем документално проследими групи компетентности – от математико-аналитичната подготовка до практическото обучение – надградени в магистърската степен, което създава добра основа за реализация в различни сегменти на подземното строителство.

Националната инфраструктурна програма и свързаните с нея подземни, геотехнически и хидротехнически дейности очертават реална среда за професионална реализация. Паралелно международният пазар създава допълнителни възможности за мобилни специалисти, при условие че квалификацията бъде ясно документирана и институционално разпознаваема. Привлекателността на специалността следва да се извежда не от декларативни оценки, а от действителния интердисциплинарен и приложим профил на подготовката.

Стъпките за по-ефективно позициониране включват: актуализиране на проектантските категории в КИИП, стартиране на процедура за EUR-ACE® акредитация, систематично терминологично и компетентностно документиране, включително официално приемане на матрицата на компетентностите в двуезичен формат. Тези мерки изискват предварително оценен административен, организационен и финансов ресурс и имат потенциал съществено да подобрят международната видимост на квалификацията и цялостното академично позициониране на програмата.

Литература

Борисов, Б. & Павлов, П. (2026). Еквивалентност на специалност „Подземно строителство“ в контекста на международното инженерно образование и англоезичната номенклатура. Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, т. 69 (представена за публикуване).

ENAEE. (2024). EUR-ACE framework standards and guidelines. European Network for Accreditation of Engineering Education. https://www.enaee.eu/eur-ace-system/standards-and-guidelines/

Engineers Australia. (2024). International engineering agreements: Washington Accord and Sydney Accord. https://www.engineersaustralia.org.au/

Fairfield Market Research. (2025). Tunnel construction market size report, 2024–2031. https://www.fairfieldmarketresearch.com/report/tunnel-construction-market

FEANI. (2024). Eur Ing – European engineer title. European Federation of National Engineering Associations. https://www.feani.org/

Fortune Business Insights. (2026). Tunnel boring machines market size, share & industry analysis, 2026–2034. Report ID: FBI101674. https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/tunnel-boring-machines-market-101674

ICE. (2024). Chartered engineer (CEng) requirements and initial professional development. Institution of Civil Engineers. https://www.ice.org.uk/

ITA-AITES. (2024). Education and Training Committee. International Tunnelling and Underground Space Association. https://about.ita-aites.org/

ЗКАИИП. (2003). Закон за камарите на архитектите и инженерите в инвестиционното проектиране. Обн. ДВ, бр. 20 от 04.03.2003 г., с посл. изм. и доп.

ITA-CET. (2026). ITA-CET University network. Update 06/2026. International Tunnelling and Underground Space Association. https://about.ita-aites.org/files/ITA-CET_Committee_Members_June_2026-1.pdf

КИИП. Наредба № 2 за проектантската правоспособност на инженерите, регистрирани в КИИП, с посл. изм. и доп. https://www.kiip.bg/

МГУ. (2024). Department of underground construction. University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”.

https://mgu.bg/en/departments/department-underground-construction/

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024a). Учебен план на специалност „Подземно строителство“, ОКС „бакалавър“, редовна форма на обучение (рев. 3, Протокол № 8 на Академичния съвет от 22.05.2024 г.). София.

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024b). Учебен план на специалност „Подземно строителство“, ОКС „бакалавър“, задочна форма на обучение (Протокол № 8 на Академичния съвет от 22.05.2024 г.). София.

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024c). Учебен план на специалност „Подземно строителство“, ОКС „магистър“, редовна форма на обучение (рев. 1). София.

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024d). Учебен план на специалност „Геотехника“, ОКС „магистър“, редовна форма на обучение. София.

НАОА. (2024). Програмна акредитация на проф. направление 5.7. https://www.neaa.government.bg/

NCEES. (2025). Engineering Education Standard. National Council of Examiners for Engineering and Surveying. https://ncees.org/wp-content/uploads/2025/10/NCEES-Engineering-Education-Standard_2025.pdf

Railway Pro. (2025). Tunnelling works completed on Sofia Metro Line 3 Lot 4. https://www.railwaypro.com/

Research and Markets. (2026). Global tunnel construction market – forecast to 2030. https://www.researchandmarkets.com/

TYLin. (2024). Sofia Metro 3 Line Project. https://www.tylin.com/work/projects/sofia-metro-3-line-project

UTS. (2024). Master of engineering (tunnelling and underground engineering). University of Technology Sydney. https://www.uts.edu.au/

EQUIVALENCE OF THE “UNDERGROUND CONSTRUCTION” DEGREE PROGRAMME IN INTERNATIONAL ENGINEERING EDUCATION AND ENGLISH-LANGUAGE NOMENCLATURE

Borislav Borisov, Pavel Pavlov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia. E-mail: b.borisov@mgu.bg; p.pavlov@mgu.bg

ABSTRACT. This paper examines the linguistic and functional equivalence of translating the name of the course of studies in “Underground Construction” at the University of Mining and Geology (UMG) “St. Ivan Rilski” into English. Through a structured comparative documentary analysis of curricula at Colorado School of Mines (USA), the ITA-AITES endorsed Specialised Master at ENTPE/INSA Lyon (France), and University of Technology Sydney (Australia), supplemented by a review of programmes at ETH Zürich, Politecnico di Torino, RUB, NTNU, and University of Warwick (UK), the paper argues that the literal translation “Underground Construction” may create initial terminological ambiguity in credential evaluation. Programme titles incorporating the component “Engineering” more accurately reflect the academic depth and design competence embedded in the UMG curriculum. The implications for professional recognition under the ABET (USA), Engineering Council UK, and Engineers Australia frameworks are discussed. The paper concludes with context-specific translation recommendations and advocates for the adoption of a unified official English designation by UMG.

Key words: underground construction, tunnel engineering, academic nomenclature, professional recognition, credential evaluation.

ЕКВИВАЛЕНТНОСТ НА СПЕЦИАЛНОСТ „ПОДЗЕМНО СТРОИТЕЛСТВО“ В КОНТЕКСТА НА МЕЖДУНАРОДНОТО ИНЖЕНЕРНО ОБРАЗОВАНИЕ И АНГЛОЕЗИЧНАТА НОМЕНКЛАТУРА

Борислав Борисов, Павел Павлов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София; e-mail: b.borisov@mgu.bg; p.pavlov@mgu.bg

Резюме. Докладът разглежда езиковата и функционалната еквивалентност при превода на английски език на наименованието на специалност „Подземно строителство“ в МГУ „Св. Иван Рилски“. Чрез структуриран сравнителен документален анализ на учебните програми на Висшето минно училище в Колорадо (Colorado School of Mines, САЩ), на одобрения от Международната асоциация по тунелно строителство и подземно пространство (ITA-AITES) специализиран магистър (Mastère Spécialisé) във висшите инженерни училища ENTPE и INSA в Лион (Франция) и на Технологичния университет в Сидни (University of Technology Sydney, Австралия), допълнен с преглед на програмите на Федералната политехника в Цюрих (ETH Zürich), Политехническия университет в Торино (Politecnico di Torino), Рурския университет в Бохум (RUB), Норвежкия университет за наука и технологии (NTNU) и Университета в Уорик (University of Warwick, Великобритания), се аргументира, че буквалният превод „Underground Construction“ може да породи първоначална терминологична неяснота при оценяването на квалификациите. Наименованията на програмите, включващи компонентата „Engineering“, по-точно отразяват академичната задълбоченост и проектантската компетентност, заложени в учебния план на МГУ. Обсъдени са последиците за професионалното признаване по рамките на ABET (Акредитационен съвет по инженерство и технологии, САЩ), Инженерния съвет на Великобритания (Engineering Council UK) и Асоциацията на инженерите в Австралия (Engineers Australia). Докладът завършва със съобразени с конкретния контекст препоръки за превод и препоръчва официалното приемане на единно английско наименование от МГУ.

Ключови думи: подземно строителство, тунелно инженерство, академична номенклатура, професионално признаване, оценяване на квалификациите.

1. Въведение

Преводът на наименованията на академични специалности и образователно-квалификационни степени представлява проблем с практически последствия, засягащ професионалното признаване, правоспособността за лицензиране и международната мобилност на дипломираните инженери. В условията на глобализиращия се пазар на инженерен труд, където мащабни инфраструктурни проекти генерират нарастващо търсене на специалисти с компетентности в областта на подземното строителство, точният превод на дипломното наименование придобива стратегическо значение – както за индивидуалния дипломант, така и за институцията, която го е подготвила. Съгласно актуални пазарни анализи глобалният пазар в областта на тунелното строителство е оценен на 27,74 млрд. USD през 2025 г. и се очаква да достигне 38,6 млрд. USD до 2030 г. при среден темп на растеж (CAGR) от 6,9 % (Research and Markets, 2026).

Специалността „Подземно строителство“ в МГУ „Св. Иван Рилски“ е утвърдена в националния контекст, но при представяне пред чуждестранни работодатели, акредитационни органи или системи за признаване на дипломи буквалният превод може да породи подвеждащи асоциации. Потенциалните последствия надхвърлят лингвистиката, като могат да засегнат първоначалната интерпретация на квалификацията при процедури по лицензиране в други държави, международното академично признаване от партньорски университети и организации като ITA-AITES (Международна асоциация по тунелно строителство и подземно пространство), както и привлекателността на МГУ за чуждестранни кандидат-студенти, търсещи високоспециализирано инженерно образование (ABET, 2025a; Engineering Council UK, 2024; Engineers Australia, 2024; NCEES, 2025).

Целта на настоящата статия е да предложи методологично обоснован отговор на въпроса как следва да се преведе специалност „Подземно строителство“, така че преводът да отразява вярно академичното съдържание, да улеснява международното признаване и да не ограничава кариерните перспективи на дипломираните, утвърждавайки институционалния авторитет на МГУ. Отговорът се търси чрез структуриран сравнителен документален анализ на водещи международни университетски програми и преглед на изискванията на основните акредитационни и лицензионни организации.

В англоезичните юрисдикции терминът „Construction“ е функционално по-тесен от българския „строителство“. Когато е използван самостоятелно и без ясно обозначена инженерна институционална рамка, терминът „Construction“ в англосаксонския контекст може да бъде възприет предимно като свързан със строителното изпълнение, технологиите и управлението, без еднозначно да показва пълния аналитичен, проектантски и изследователски обхват на програмата. Тази семантична асиметрия не е само академичен въпрос, тъй като може да повлияе на начина, по който квалификацията се интерпретира при кандидатстване за статут „професионален инженер“ (Professional Engineer, PE) в САЩ, при признаване като „правоспособен инженер“ (Chartered Engineer, CEng) във Великобритания или при оценка за статут „правоспособен професионален инженер“ (Chartered Professional Engineer, CPEng) в Австралия.

2. Теоретична рамка

2.1. Институционална идентичност на МГУ и компетентностен профил

МГУ „Св. Иван Рилски“ е тяснопрофилна институция, ориентирана към добивната промишленост и геонауките, съществуваща като самостоятелно висше училище от 1953 г. Специалността „Подземно строителство“ е акредитирана от НАОА (Национална агенция за оценяване и акредитация) в рамките на професионално направление 5.7 „Архитектура, строителство и геодезия“ (НАОА, 2024). Това класифициране я поставя юридически и академично в категорията на строителното инженерство – разграничение, което е ключово при избора на международни аналози за сравнение.

Учебната програма формира инженери с интердисциплинарен профил, интегриращ знания от минно-технологичната, строително-конструктивната и геотехническата области. Минно-технологичната компонента обхваща например: методи за механично и взривно разрушаване на скални масиви, технологии за прокарване на минни изработки и подземни съоръжения, проветряване на подземни обекти и управление на скалния натиск. Строително-конструктивният и геомеханичен профил на програмата е структуриран около следните основни аналитични направления: съвременен конструктивен анализ на съоръжения с продължителен срок на експлоатация (включващ строителна динамика и метод на крайните елементи), фундаментално геотехническо проектиране (земна и скална механика, дълбоко фундиране, укрепване на свлачища, мониторинг и др.), познаване на строителните материали и специализирани технологии за изграждане на метрополитени и други подземни съоръжения. От перспективата на международното признаване, този масив от аналитични, изчислителни и проектантски дисциплини е относим към изискванията на стандарта „Engineering Education Standard“ на NCEES (Национален съвет на изпитните органи по инженерство и геодезия, САЩ) (NCEES, 2025), който при оценка на чуждестранни дипломи изисква доказване на минимум 32 семестриални кредита по висша математика и базови науки и 48 кредита по инженерни науки и проектиране (Engineering Science and Design). Ако специализиращите дисциплини бъдат преведени единствено през призмата на наименованието „Construction“, съществува риск те да бъдат класифицирани като мениджърски или технологични, а не толкова като инженерни кредити – което може да затрудни достигането на изискуемия кредитен праг (NCEES, 2025). Действащите учебни планове от 2024 г. (МГУ, 2024a; 2024b) документално потвърждават този профил: те надхвърлят минималния обем от 240 ECTS (Европейска система за трансфер и натрупване на кредити) (255 ECTS в редовна и 252 ECTS в задочна форма) и включват инженерна математика, строителна механика, геотехническо и конструктивно проектиране, числени и статистически методи и системно курсово проектиране с учебни практики, което буквалният превод „Underground Construction“ не предава. Подготовката по Подземно строителство в МГУ навлиза дълбоко в полето на приложно-изследователските дейности, инженерното проектиране, числено моделиране и оразмеряване на носещи конструкции при сложни геомеханични и хидрогеоложки условия.

Тази комбинация от компетентности е специфична за специалността. Програмата на МГУ систематично интегрира земна и скална механика, технологии за тунелно строителство, т. нар. специални методи за подземно строителство, взривни процеси, инжекционни работи и геотехническо управление на риска в цялостен инженерен профил. Тази интердисциплинарност поражда терминологичното предизвикателство, че буквалният превод „Underground Construction“ не е в състояние да предаде пълния обхват на компетентностите, което на практика означава, че при международен контакт – било при кандидатстване за работа, лицензиране или академично сътрудничество, част от квалификацията на дипломирания инженер е възможно да остане скрита зад семантично непълно наименование.

По същество дипломираните инженери по специалност „Подземно строителство“ са компетентни да извършват изследователска дейност, да проектират и ръководят строителството и поддръжката на подземни минни изработки, пътни и железопътни тунели, хидротехнически и енергийни подземни съоръжения, метрополитени и подземни комуникационни съоръжения (UMG, 2024). Същевременно следва да се има предвид въздействието на наименованието и при стратегиите за привличане на чуждестранни студенти и разработване на програми на английски език, които да бъдат конкурентни и атрактивни на международния образователен пазар.

2.2. Семантична асиметрия: „Construction“ срещу „Engineering“

В българския език (а по аналогия и в немския, и в руския) думата „строителство“ (Bau, строительство) обхваща пълния инженерен цикъл – от концептуалното проектиране и конструктивните изчисления до управлението на строителната площадка, поддръжката и ремонта на съоръженията. Дипломираният специалист получава квалификация „инженер“, която, след придобиване на пълна проектантска правоспособност съгласно ЗКАИИП (Закон за камарите на архитектите и инженерите в инвестиционното проектиране) (чл. 7), му дава проектантска правоспособност в обхвата, определен от ЗКАИИП и от регистрацията в съответната професионална секция на КИИП (Камара на инженерите в инвестиционното проектиране) (ЗКАИИП, 2003).

В англосаксонския академичен свят наименованието „Construction“ може да обозначава различни по характер програми: „Construction Engineering“, която може да бъде пълноценна инженерна програма, „Construction Engineering Technology“, която е технологичен профил, и „Construction Management“, която е управленски профил, насочен към изпълнение на проекти, планиране, бюджетиране и управление на безопасността. Рискът за квалификацията следователно е терминологична неяснота при първоначалния преглед, а не автоматична класификация. Управленските и технологичните програми не включват дълбочината на математическия анализ и механиката, характерни за програмите по „Civil Engineering“. Това разграничение е формализирано в системата на ABET (Акредитационен съвет по инженерство и технологии, САЩ), където програмите се акредитират от различни комисии: Инженерната акредитационна комисия (Engineering Accreditation Commission, EAC) за инженерните специалности и Комисията за акредитация на инженерните технологии (Engineering Technology Accreditation Commission, ETAC) за технологичните. В критериите на ABET за акредитационен цикъл 2025–2026 програмите с наименование „construction“ имат отделни програмни критерии, различни от тези за „civil engineering“. Програмните критерии за „construction“ изискват от студентите знания в областта на строителни методи, материали, оборудване, планиране, безопасност и анализ на разходите, докато програмните критерии за „civil engineering“ (EAC) изискват прилагане на висша математика, проектиране на системи и компоненти в многобройни строителни контексти, както и задълбочени познания в конструктивното и геотехническо проектиране (ABET, 2025a). Следва да се отбележи, че самото наименование не е единственият критерий – значение имат и учебният план, хорариумът и процедурата по оценка на квалификацията. Въпреки това, при първоначален преглед на документите от агенции за оценка на чуждестранни дипломи, наименованието „Underground Construction“ без маркера „Engineering“ може да създаде първоначална терминологична неяснота относно инженерния характер на програмата (NCEES, 2025).

2.3. Терминологични предизвикателства в опита на МГУ

Катедра „Чужди езици“ е провела изследване на уменията на студентите да разпознават и превеждат специфични термини при работа с научни текстове на чужд език (Purvanova et al., 2019). Резултатите разкриват съществени затруднения: терминът „Underground construction“ е превеждан неправилно като „подземна конструкция“ вместо „подземно строителство“, а имената на факултетите са непоследователни в рамките на един и същ текст. Тези наблюдения потвърждават необходимостта от унифицирана официална английска терминология.

Включването на компонентата „Engineering“ в наименованието следователно не е стилистично предпочитание, а необходима терминологична квалификация. В англоезичната академична номенклатура компонентата „Engineering“ обозначава програма, основана на инженерни науки, математическо моделиране, анализ и проектиране. Терминът указва, че учебната програма обхваща пълния спектър от инженерни дейности – проектиране, конструктивен анализ, числено моделиране и оразмеряване (ABET, 2025a; ENAEE, 2024).

3. Международен сравнителен анализ

3.1. Висше минно училище в Колорадо (Colorado School of Mines), САЩ

Висшето минно училище в Колорадо (Colorado School of Mines, CSM) в Голдън, Колорадо, предлага магистърска програма по „Underground Construction and Tunnel Engineering“ (UCTE). Програмата е съвместно начинание на три отделни факултета: Строително и екологично инженерство (Civil and Environmental Engineering), Геология и геоложко инженерство (Geology and Geological Engineering) и Минно инженерство (Mining Engineering). Този модел съвпада с интердисциплинарната структура на обучение в МГУ „Св. Иван Рилски“ (CSM, 2024). Наименованието вероятно е избрано при отчитане на описаната семантична асиметрия: „Underground Construction“ обозначава изпълнението, а „Tunnel Engineering“ сигнализира проектната компонента. Показателно е, че думата „Engineering“ е вградена директно в наименованието на курсовете – „Underground Construction Engineering in Hard Rock“ и „Underground Construction Engineering in Soft Ground“ – което сигнализира на акредитиращите органи за наличието на необходимата доза математическо моделиране и проектантска дейност. Останалите курсове включват „Tunnel Design and Analysis“, „Rock Mechanics“, „Numerical Modelling in Geotechnical Engineering“, „Ground Support Systems“ и „Shotcrete Technology“ (CSM, 2024). Степента на съответствие с учебната програма на МГУ е значителна, което прави „Underground Construction and Tunnel Engineering“ подходящ преводен еквивалент в северноамерикански контекст.

3.2. Европейски примери: Университетът в Уорик и ENTPE/INSA Лион

Университетът в Уорик (University of Warwick) стартира през 2011 г. магистърската програма „Tunnelling and Underground Space“, акредитирана от Института на строителните инженери (Institution of Civil Engineers, ICE) и подкрепена от Британското тунелно дружество (British Tunnelling Society, BTS) и от Международната асоциация по тунелно строителство и подземно пространство (ITA-AITES). Програмата е създадена в отговор на търсенето, генерирано от мащабни инфраструктурни проекти като Crossrail (Elizabeth Line) и High Speed 2. Терминът „Underground Space“ отразява съвременната европейска тенденция за цялостно използване на подземното пространство. Програмата е акредитирана като „Further Learning for a Chartered Engineer“ съгласно стандартите UK-SPEC (британски стандарт за професионална инженерна компетентност) на Инженерния съвет на Великобритания (Engineering Council UK), като приблизително 20 % от обучението се осъществява от индустриални специалисти (Warwick, 2021). Като реален пример тя илюстрира, че в рамките на утвърдена британска инженерна традиция, наименованието е съзнателно формулирано с ясно обозначение на инженерния характер – „Tunnelling“ в контекста на институция, акредитирана от ICE (BTS, 2024). Като активен европейски аналог, специализираният магистър (Mastère Spécialisé) „Tunnels et Ouvrages

Souterrains“ (Тунели и подземни съоръжения), предлаган съвместно от висшите инженерни училища ENTPE и INSA в Лион (Франция) от 2011 г., е одобрен от ITA-AITES и акредитиран от Конференцията на висшите училища (Conférence des Grandes Écoles). Програмата е разработена в тясно сътрудничество с AFTES (Френската асоциация за тунели и подземно пространство) и CETU (Център за изследване на тунели) и е насочена към специалисти в проектирането, строителството и експлоатацията на подземни съоръжения. Учебният план обхваща геотехническо моделиране, проектиране на тунели, методи за прокопаване и укрепване, управление на риска и МКЕ (метод на крайните елементи) анализ, а лекциите се водят от академични специалисти и водещи индустриални експерти. Програмата потвърждава международната тенденция: дори във френския контекст, наименованието акцентира върху инженерната и проектантска компетентност (ENTPE/INSA, 2024; ITA-AITES, 2024).

3.3. Технологичен университет в Сидни (University of Technology Sydney), Австралия

Технологичният университет в Сидни (University of Technology Sydney, UTS) стартира през февруари 2024 г. първата в Австралия специализирана следдипломна специализация „Tunnelling and Underground Engineering“ в рамките на магистърска програма по инженерство (Master of Engineering) (UTS, 2024). Програмата е разработена в отговор на потребностите на бързо разрастващия се тунелен сектор, в тясно сътрудничество с водещи индустриални експерти и международни строителни консорциуми. Контекстът е бързият растеж на инфраструктурните инвестиции – проектите за метро в Сидни (Sydney Metro) и Мелбърн (Melbourne Metro), които са сред най-мащабните текущи градски подземни проекти в южното полукълбо. Учебната програма обхваща геотехническо инженерство, конструктивно инженерство, строителни материали, тунелопробивни машини, безизкопни технологии, интелигентни технологии и управление на строителството (UTS, 2024). Показателно е, че UTS използва наименованието „Tunnelling and Underground Engineering“, което е в синхрон с международната практика специализираните програми в тази област да се обозначават чрез ясно обозначение на инженерния характер (Engineers Australia, 2024). Този пример показва предпочитание към наименование, което представя не само строителното изпълнение, но и инженерно-проектантската характеристика на подготовката.

3.4. Преобладаващи международни терминологични модели

Извън по-детайлно анализираните програми, прегледът на международната академична номенклатура разкрива устойчив терминологичен модел. Университетската мрежа на ITA-CET (Комитет по образование и обучение), координирана от ITA-AITES, обединява университети от четири континента, предлагащи специализирано обучение в областта на подземното строителство. Преобладаващото мнозинство от програмите включват в заглавието си термините „Engineering“, „Tunnelling“ или комбинация от двата, като изолираната употреба на наименованието „Underground Construction“ без допълнителен квалифициращ елемент е сравнително рядка сред разгледаните програми, а там, където се среща (например катедрата във Федералната политехника в Цюрих, ETH Zürich), е поставена в ясно обозначена инженерна институционална рамка (ITA-AITES, 2024).

Тази тенденция се наблюдава последователно в различни образователни традиции. В Германия Рурският университет в Бохум (Ruhr-Universität Bochum, RUB) предлага магистърска програма „Subsurface Engineering“ (RUB, 2024). В Австрия Минният университет в Леобен (Montanuniversität Leoben) – основан през 1840 г. и институционално аналогичен на МГУ – предлага магистърска програма „Mining and Tunnelling“ (на английски, 120 ECTS) със специализация „Geotechnics and Tunnelling“, обхващаща скална механика, числено моделиране, геотехнически мониторинг и цифровизация в тунелното строителство. Съвместно с Техническия университет в Грац (TU Graz) университетът предлага и програмата „NATM Master of Science: Construction, Rehabilitation and Operation of NATM- and TBM-Tunnels“ (90 ECTS; NATM – нов австрийски тунелен метод; TBM – тунелопробивна машина), (Montanuniversität Leoben, 2024; ITA-AITES, 2024). Институционалната аналогия с МГУ е забележителна, като и двата университета са тяснопрофилни минни висши училища, интегриращи тунелното строителство в инженерния си учебен план, съответно университетът в Леобен избира наименования с ясни обозначения на инженерния характер – „Tunnelling“ и „Geotechnics“. В Италия съвместната магистърска програма на Политехническите университети в Торино и Милано (Politecnico di Torino, Politecnico di Milano) е озаглавена „Tunnel Engineering – Design, Construction and Management“, като думата „Engineering“ е изведена на преден план като общоприет термин, обхващащ както проектирането (design), така и изпълнението (construction) (Politecnico di Torino, 2024). Във Франция специализираният магистър „Tunnels et Ouvrages Souterrains“ на ENTPE/INSA в Лион и програмата на AETOS/UNED (Национален университет за дистанционно обучение, Испания) в Мадрид допълват картината на одобрените от ITA-AITES програми. В Норвегия Норвежкият университет за наука и технологии (NTNU) предлага курсове по тунелно инженерство в рамките на програмата по „Civil and Environmental Engineering“ (NTNU, 2024). В ETH Zürich съществува катедра „Underground Construction“, функционираща в рамките на инженерна степен по „Civil, Environmental and Geomatic Engineering“ (ETH Zürich, 2024). В този случай терминът „Underground Construction“ е семантично достатъчен, когато е контекстуално вграден в по-широка инженерна рамка.

В обобщение прегледът показва, че наименованието на програма, подготвяща инженери с проектантска и приложно-изследователска компетентност в областта на подземните съоръжения, е препоръчително да съдържа обозначение на инженерния характер на квалификацията, обикновено чрез термина „Engineering“, чрез „Tunnelling“ (при посочване на „civil“ и/или „geotechnical engineering“) или чрез комбинация от двата.

4. Професионално лицензиране

Преводът на наименованието на специалността има професионално-регулаторно отношение в контекста на

международното професионално лицензиране. В разгледаните юрисдикции достъпът до лицензиран инженерен статут е обусловен от притежаването на диплома, призната като акредитирана инженерна квалификация.

В САЩ достъпът до лицензионния изпит за „професионален инженер“ (PE) е регулиран на ниво отделен щат, като общото правило изисква притежаване на диплома от програма, акредитирана от Инженерната акредитационна комисия (EAC) на ABET, или оценена като еквивалентна. За кандидати с чуждестранни дипломи обичайният механизъм е оценка на квалификацията от NCEES или от агенции за оценяване на образователни документи като WES (World Education Services) и ECE (Educational Credential Evaluators) (WES, 2024), като изборът на оценяваща организация зависи от изискванията на конкретния щатски борд и агенциите не са взаимозаменяеми за лицензионни цели. ABET прави ясно разграничение между програмните критерии за „construction“ и за „civil engineering“, а съгласно наръчника за акредитационни политики и процедури на ABET (APPM, т. I.C.3.c.(1)), всички програми, акредитирани от EAC, задължително трябва да включват думата „engineering“ в наименованието си (ABET, 2025b). Това правило се отнася до наименованията на акредитираните от ABET програми и не означава, че чуждестранна диплома се класифицира автоматично според заглавието си. Наименованието на програмата не предопределя само по себе си лицензионния резултат, но може съществено да повлияе на първоначалната интерпретация на квалификацията при документен преглед (NCEES, 2025).

Във Великобритания обичайният път към статута „правоспособен инженер“ (CEng) минава през акредитирана инженерна степен, призната от Инженерния съвет на Великобритания чрез Съвместния борд на модераторите (Joint Board of Moderators, JBM), като съществува и индивидуален път на оценяване за кандидати без акредитирана степен. Британската система прави разлика между CEng – професионалисти, които създават иновативни решения чрез прилагане на висша математика и нови технологии – и „инженер по експлоатация и поддръжка“ (Incorporated Engineer, IEng) – професионалисти, които предимно поддържат и управляват съществуващи технологии. Терминът „Construction“ без „Engineering“ не предопределя професионалния резултат, но би могъл да насочи първоначалната интерпретация на квалификацията към по-обектово насочен, а не към ясно инженерно-проектантски профил в рамката на UK-SPEC (Engineering Council UK, 2024). Асоциацията на инженерите в Австралия (Engineers Australia) разграничава инженерните (Engineering) от технологичните (Technology) квалификации чрез международните споразумения: Вашингтонският акорд (Washington Accord) признава акредитационните системи за 4-годишни програми, подготвящи „професионални инженери“ (Professional Engineers), а Сидниският акорд (Sydney Accord) – за програми, подготвящи „инженерни технолози“ (Engineering Technologists), като акордите не присъждат пряко индивидуални професионални титли. Наименование като „Underground Construction“ не би предопределило автоматично класификация по Сидниския акорд, но при първоначален преглед на документите може да насочи оценителя към по-слабо изразен инженерен профил в сравнение с наименования, съдържащи „Engineering“, и така да подцени реалната академична тежест на квалификацията. В този контекст е показателно, че програмата на UTS носи наименованието „Tunnelling and Underground Engineering“, което е съвместимо с рамката на Вашингтонския акорд (Engineers Australia, 2024).

В европейски контекст рамката EUR-ACE (Европейска акредитация на инженерни програми), администрирана от ENAEE (Европейска мрежа за акредитация на инженерното образование), е европейски знак за качество на инженерните образователни програми, който подобрява прозрачността и съпоставимостта, без сам по себе си да предоставя професионално признаване. Позиционирането на програмата на МГУ в инженерната компетентностна рамка е предпоставка за евентуално кандидатстване за етикета EUR-ACE. В контекста на Болонския процес и съпоставимостта на квалификациите в Европейското пространство за висше образование, езиковата прецизност на дипломните наименования придобива допълнителна тежест (ENAEE, 2024). За българските висши училища, включително МГУ, които все по-активно участват в международни образователни мрежи и проекти за мобилност, адекватното английско наименование на специалностите е условие за пълноценно интегриране.

5. Препоръки за превод

Въз основа на сравнителния анализ и прегледа на лицензионните изисквания следва ясно да се разграничат две равнища. Официалното английско наименование на квалификацията е едно и трябва да бъде еднакво във всички официални документи, независимо от юрисдикцията, като за кандидат за такова наименование се препоръчва „Underground Construction and Tunnel Engineering“ – вариантът, застъпен и в свързаната публикация за компетентностния профил (Борисов & Павлов, 2026) – чието приемане изисква официално институционално решение; до вземането му в официалните документи се използва действащото наименование „Underground Construction“. Отделно от него могат да се използват контекстни описателни формулировки, които съпровождат официалното наименование, без да го заместват. Окончателната редакция на официалното наименование следва да бъде утвърдена след преглед от академичния съвет, юридическото звено, НАЦИД (Национален център за информация и документация), звеното, издаващо Европейското приложение към дипломата, и специалист по академична английска терминология.

Вариант 1 (описателна формулировка за северноамерикански контекст): „Underground Construction and Tunnel Engineering“ – пряко заимстване от програмата на CSM, която е най-близкият институционален аналог на МГУ в САЩ. Този превод улеснява разпознаваемостта от ABET-ориентираните оценители и се препоръчва за професионални автобиографии, профили в LinkedIn и кандидатури към международни строителни компании.

Вариант 2 (описателна формулировка за европейски и академичен контекст): „Geotechnical and Underground Engineering“ или **„Underground Structures and Tunnel Engineering“** – по-широко присъстващ в

европейските академични среди. Подходящ за докторски програми, научни публикации и позиции в геотехнически консултантски фирми. Този вариант е съгласуван с компетентностната рамка EUR-ACE (ENAEE, 2024).

Вариант 3 (официални административни процедури): до официално институционално решение се използва действащото дипломно наименование „Underground Construction“, при необходимост придружено от описателното допълнение „with specialisation in tunnel and underground structures engineering“, което следва плътно оригиналното наименование и обозначава инженерния характер на подготовката, без да претендира за формално обособена специализация. Подходящо решение е и представянето „Underground Construction (BSc/MSc in Civil Engineering)“, при което се запазва оригиналното наименование на специалността, а поясняващите скоби ситуират квалификацията в широко разпознаваемата рамка на строителното инженерство.

Препоръчително е официално приемане на посоченото единно английско наименование, което да се използва последователно в дипломи, академични справки, институционалния уебсайт и рекламни материали. Съответно този превод следва да се интегрира в двуезичното Европейско приложение към дипломата (Diploma Supplement), което се издава на всеки завършващ студент. Тъй като преводите на официални документи по правило следват плътно оригиналното наименование, издаването на официално приложение към дипломата (Diploma Supplement) на английски език директно от университета е най-надеждният механизъм за терминологично най-правилен превод. Успоредно с това, официалната номенклатура следва да бъде синхронизирана с регистрите на Националния център за информация и документация (НАЦИД), което ще осигури проследимост при международни запитвания от страна на мрежата ENIC-NARIC (европейската мрежа за академично признаване на квалификации). Такава мярка ще подобри мобилността на дипломираните инженери на глобалния пазар на труда и международното разпознаване на специалността.

6. Дискусия

Структурираният преглед на международната академична номенклатура разкрива ясна терминологична тенденция: програмите, които подготвят инженери за обследване, проектиране и изграждане на подземни съоръжения, последователно използват термини като „Engineering“, „Tunnelling“ или комбинация от двата. Тази закономерност се забелязва в различни образователни традиции – от англосаксонската (CSM, UTS, Уорик) през континенталноевропейската (ETH Zürich, RUB, Минния университет в Леобен, Политехниката в Торино, ENTPE/INSA Лион) до скандинавската (NTNU). Съответно наименованието функционира не просто като етикет, а като комуникационен инструмент, насочен към работодатели, лицензионни органи и оценители на квалификации.

В контекста на бързо нарастващия глобален пазар на подземна инфраструктура ясното и международно разпознаваемо дипломно наименование е стратегическо предимство.

Съществен е и въпросът за академичното разпознаване. Университетите партньори, координаторите на програми за мобилност (включително „Еразъм+“) и организациите като ITA-AITES често използват наименованието като първоначален ориентир при установяване на еквивалентност. Наименование, което не обозначава пълната инженерна компонента, може да създаде допълнителна необходимост от поясняване при двустранни споразумения и да намали видимостта на програмата в международни бази данни.

В европейски контекст, практиката на ITA-CET и техните одобрени магистърски програми (Политехниката в Торино/Милано, ENTPE/INSA в Лион, AETOS/UNED в Мадрид, както и примера на Уорик) показва, че международно утвърдените наименования на програми в областта на подземното строителство последователно съдържат елемент, указващ пълния инженерен характер на квалификацията. В официалния списък на ITA-CET, актуализиран през юни 2026 г., МГУ „Св. Иван Рилски“ е включен като U-31 в университетската мрежа (ITA-CET, 2026). Пълноценното представяне на програмата в мрежата допълнително мотивира използването на международно разпознаваемо английско наименование.

Настоящото изследване има определени ограничения. Анализът се базира на публично достъпна информация за учебните програми и акредитационните изисквания, без директни консултации с оценителите от WES, NCEES или Engineers Australia, както и на опита на авторите при взаимодействие с чуждестранни обучаващи институции, национални агенции – възложители по строителни проекти и чуждестранни работодатели. Заключенията относно възможната класификация на дипломата са базирани на семантичен и нормативен анализ, а не на емпирични данни от конкретни процедури по оценка. Въпреки това, предложените варианти на превод са съобразени с конкретния институционален контекст и не претендират за универсална приложимост – изборът между тях зависи от целевата юрисдикция и адресата на документа. Съответно те следва да се разглеждат като работни предложения, подлежащи на допълнително прецизиране според конкретния институционален контекст.

7. Заключение

Преводът на специалност „Подземно строителство“ от МГУ „Св. Иван Рилски“ на английски език не е единствено лингвистична задача, а въпрос с практически последствия за кариерния път на дипломираните инженери и за международната конкурентоспособност на университета. Буквалният превод „Underground Construction“ е допустим, но е желателно да бъде функционално допълнен в англоезичен инженерно-образователен контекст, тъй като „Construction“ се асоциира предимно с изпълнение и управление, а не с инженерно проектиране и изследователска дейност.

Сравнителният анализ показва устойчиво международно предпочитание към наименования, съдържащи еднозначно обозначение на пълния инженерен характер, при програми с профил, близък до този на специалност „Подземно строителство“. Названието на специалността в международна среда има значение за академичната разпознаваемост и първоначалната

интерпретация на квалификацията при процедури по признаване и лицензиране (ABET, 2025a; Engineering Council UK, 2024; Engineers Australia, 2024). Преобладаващият международен терминологичен модел, документиран чрез мрежата на ITA-CET и практиката на водещи университети като Федералната политехника в Цюрих, Рурския университет в Бохум, Минния университет в Леобен, Политехниката в Торино и ENTPE/INSA в Лион, показва, че инженерната квалификация в тази област се обозначава с термини, указващи изследователска и проектантска компетентности.

Единното официално наименование, утвърдено чрез Европейското приложение към дипломата и синхронизирано с регистрите на НАЦИД, е конкретна осъществима стъпка с дългосрочен положителен ефект.

Изборът на английско наименование е стратегическо решение, спомагащо позиционирането на МГУ в международната академична среда и подобряващо първоначалната терминологична яснота при кандидатстване за работа и процедури по признаване в чужбина. Прецизирането на терминологията е малка, но ефективна стъпка с дългосрочен положителен ефект за позиционирането както на индивидуалния дипломиран специалист, така и на университета в глобалното академично пространство.

Литература

ABET. (2025a). Criteria for accrediting engineering programs, 2025–2026. Accreditation Board for Engineering and Technology. https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/

ABET. (2025b). Accreditation Policy and Procedure Manual (APPM), 2025–2026. Accreditation Board for Engineering and Technology. https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/

British Tunnelling Society (BTS). (2024). Education and training in tunnelling. https://www.britishtunnelling.org.uk/education

Colorado School of Mines (CSM). (2024). Underground construction and tunnel engineering. https://ucte.mines.edu/

ENAEE. (2024). EUR-ACE framework standards and guidelines. European Network for Accreditation of Engineering Education. https://www.enaee.eu/eur-ace-system/standards-and-guidelines/

Engineers Australia. (2024). Chartered professional engineer (CPEng) competency standards. https://www.engineersaustralia.org.au/chartered-status

ETH Zürich. (2024). Chair of underground construction. Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. https://tunnelling.ethz.ch/

Engineering Council UK. (2024). UK-SPEC – UK standard for professional engineering competence. https://www.engc.org.uk/standards-guidance/standards/uk-spec/

ENTPE/INSA Lyon. (2024). Mastère Spécialisé Tunnels et Ouvrages Souterrains. https://www.insa-lyon.fr/fr/mastere-ouvrages-souterrains

ITA-CET. (2026). ITA-CET University network. Update 06/2026. International Tunnelling and Underground Space Association. https://about.ita-aites.org/files/ITA-CET_Committee_Members_June_2026-1.pdf

Institution of Civil Engineers (ICE). (2024). Chartered engineer (CEng) requirements. https://www.ice.org.uk/careers-and-professional-development

ITA-AITES. (2024). Education and training committee – Academic courses. International Tunnelling and Underground Space Association. https://about.ita-aites.org/wg-committees/ita-cet/master-courses

Закон за камарите на архитектите и инженерите в инвестиционното проектиране (ЗКАИИП). (2003). Обн. ДВ, бр. 20 от 04.03.2003 г., с посл. изм. и доп.

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024a). Учебен план на специалност „Подземно строителство“, ОКС „бакалавър“, редовна форма на обучение (рев. 3, Протокол № 8 на Академичния съвет от 22.05.2024 г.). София.

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024b). Учебен план на специалност „Подземно строителство“, ОКС „бакалавър“, задочна форма на обучение (Протокол № 8 на Академичния съвет от 22.05.2024 г.). София.

МГУ „Св. Иван Рилски“. (2024c). Учебен план на специалност „Подземно строителство“, ОКС „магистър“, редовна форма на обучение (рев. 1). София.

Национална агенция за оценяване и акредитация (НАОА). (2024). Програмна акредитация на проф. направление 5.7 в МГУ „Св. Иван Рилски“. https://www.neaa.government.bg/

Montanuniversität Leoben. (2024). MSc Mining and Tunnelling – Geotechnics and Tunnelling specialisation. https://www.unileoben.ac.at/en/studying/graduate-studies/advanced-resources/mining-and-tunnelling/

National Council of Examiners for Engineering and Surveying (NCEES). (2024). NCEES engineering education standard and credentials evaluations. https://ncees.org/ncees-services/credentials-evaluations/

NCEES. (2025). Engineering Education Standard. National Council of Examiners for Engineering and Surveying. https://ncees.org/wp-content/uploads/2025/10/NCEES-Engineering-Education-Standard_2025.pdf

NTNU. (2024). Department of Geoscience and Petroleum – Underground construction and rock engineering. Norwegian University of Science and Technology. https://www.ntnu.edu/igp

Politecnico di Torino & Politecnico di Milano. (2024). Joint specialized master in tunnel engineering – design, construction and management. https://about.ita-aites.org/wg-committees/ita-cet/master-courses

Purvanova, M., Hristova, M., Panichkova, V., Vukadinova, Ts., Papazova, M., Balacheva, E. & Davcheva, E. (2019). Introducing academic and institutional terminology and analysis of students' skills to recognise and translate specific terms. *Journal of Mining and Geological Sciences*, 62(4), 143–148.

Research and Markets. (2026). Tunnel market report 2026. ResearchAndMarkets.com. https://www.researchandmarkets.com/report/tunnel

Ruhr-Universität Bochum (RUB). (2024). Master of Science in Subsurface Engineering. https://www.subsurf.ruhr-uni-bochum.de/

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” (UMG). (2024). Department of underground construction. https://mgu.bg/en/departments/department-underground-construction/

University of Technology Sydney (UTS). (2024). Master of engineering – tunnelling and underground engineering. https://www.uts.edu.au/study/engineering/tunnelling-and-underground-engineering

University of Warwick. (2021). MSc tunnelling and underground space – programme discontinuation notice. https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/postgraduate/tunnelling

World Education Services (WES). (2024). International degree equivalencies. https://www.wes.org/

AN INITIAL STUDY ON ANTIMONY LEACHING FROM LEAD CONCENTRATE

Alexander Dimitrov, Marinela Panayotova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: alexandercreed283@gmail.com; marichim@mgu.bg

ABSTRACT. The work confirms that (i) lead-zinc (Pb-Zn) polymetallic ores in the Rhodopes region contain antimony (Sb) in concentrations higher than the Clarke number and (ii) the flotation beneficiation of these ores concentrates Sb in Pb concentrate. The initial leaching experiments with 2 M nitric acid, 2 M sulphuric acid alone and mixed with sodium chloride (1 M), and 2 M sodium sulphide (Na_2S) in 1 M sodium hydroxide (NaOH) solutions were carried out at a temperature of 90-95 °C. Only 2 M Na_2S in 1M NaOH solution practically does not leach lead. Initial treatment of the material with a solution of sulphuric acid containing sodium chloride, followed by neutralisation and contacting with an alkaline sodium sulphide solution is pointed (at a proof-of-concept level) as an possible approach for antimony leaching, with minimal leaching of lead.

Key words: antimony, leaching, lead concentrate.

ПЪРВОНАЧАЛНО ПРОУЧВАНЕ НА ИЗЛУЖВАНЕТО НА АНТИМОН ОТ ОЛОВЕН КОНЦЕНТРАТ

Александър Димитров, Маринела Панайотова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Работата потвърждава, че (i) оловно-цинковите (Pb-Zn) полиметални руди в района на Родопите съдържат антимон (Sb) в концентрации, по-високи от числото на Кларк, и (ii) флотационното обогатяване на тези руди концентрира Sb в Pb концентрат. Проведени са първоначални експерименти за излужване с 2 М азотна киселина, 2 М сярна киселина самостоятелно и смесена с натриев хлорид (1 М) и 2 М натриев сулфид (Na_2S) в 1 М разтвор на натриев хидроксид (NaOH) при температура 90-95 °C. Само 2 М Na_2S в 1М разтвор на NaOH практически не излужва олово. Първоначалното обработване на материала с разтвор на сярна киселина, съдържащ натриев хлорид, последвано от неутрализация и третиране с алкален разтвор на натриев сулфид, е посочено (на ниво доказване на концепцията) като евентуален възможен подход за излужване на антимон, с минимално излужване на олово.

Ключови думи: антимон, излужване, оловен концентрат.

Introduction and theoretical background

Antimony (Sb) is used as a flame retardant in rubber, plastic, textiles, paper, etc. Along with its compounds, it is applied as a stabiliser and catalyst in the chemical industry. One of the main uses of Sb is in production of high mechanical strength lead-antimony (Pb-Sb) alloys applied in automotive lead–acid batteries and in construction (Nishad and Bhaskarapillai, 2021; Dembele et al., 2022; U.S. Geological Survey, 2026).

Recently, antimony and its compounds have been studied as materials suitable for application in renewable energy sources, such as solar cells, lithium and sodium ion batteries (Parize, et al., 2017; Nie et al., 2021; Moolayadukkam et al., 2022; Wu et al., 2024).

Antimony supply is at high risk due to the geographical concentration (sometimes in politically unstable countries) of the natural ore deposits and global production. The leading country of antimony production is China, ensuring 36.4% of the world’s total production for 2025. The reserves are concentrated in China (41%), Russia (17%), and Bolivia (15%) (U.S. Geological Survey, 2026). The Sb supply vulnerability increases because it is recovered as a by-product from lead, copper, silver, and gold minerals. An increasing demand for antimony and its compounds is expected and if the present extraction rate is maintained, it is anticipated that the extractable global resources of Sb will be exhausted by 2050 (Henckens et al., 2016).

All of the above explain why antimony is included in the 2025 USA list of critical raw materials (CRMs) (https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program/science/about-2025-list-critical-minerals), as well as in the 2023 European Union list of CRMs (European Commission, 2023).

Stibnite (Sb_2S_3) is the most important antimony mineral from an industrial point of view. Other Sb-bearing minerals of industrial interest are jamesonite ($Pb_4FeSb_6S_{14}$), tetrahedrite ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$), zinkenite (Pb_9Sb22S_{42}), boulangerite ($Pb_5Sb_4S_{11}$), bindheimite ($Pb_2Sb_2O_6(O,OH)$), as well as lead sulphide ores (Anderson, 2012; Dembele, 2022).

Antimony is extracted from its primary resources through pyrometallurgy or hydrometallurgy. The particular pyrometallurgical process used depends on the grade of the Sb concentrate to be treated (Anderson, 2019; Moosavi-Khoonsari, 2022).

Antimony is recovered from low-grade ores and industrial process residues by hydrometallurgical technologies (Anderson, 2019). Aqueous solutions and proper chemical reactions are used to leach valuable metals in the pregnant leach solution (PLS). After the PLS purification, the aimed metals are recovered through diverse chemical and physicochemical processes.

Hydrometallurgical recovery of Sb employs mainly two lixiviant types - acidic chloride containing systems and alkaline sulphide systems (Anderson, 2001).

Mainly HCl solutions are used by the industry, often together with ferric chloride ($FeCl_3$). The following generalised reactions proceed (as an example for stibnite) (Ye, 2019):

$Sb_2S_3 + 6HCl \rightarrow 2SbCl_3 + 3H_2S$

$6FeCl_3 + Sb_2S_3 \rightarrow 2SbCl_3 + 6FeCl_2 + 3S^0$.

Ferric chloride is used as an oxidising and chloridising agent that transforms the antimony sulphide mineral into a chloride complex.

However, HCl solution and its mixture with $FeCl_3$ are highly corrosive (Noor and Al-Moubaraki, 2008; Nwokocha and Burleigh, 2024). In addition, these solutions are able to effectively dissolve galena (Dutrizac, 1986; Baba and Adekola, 2011; Nnanwube et al., 2018).

Different complexes are obtained at 25 °C - $PbCl_n^{2-n}$ ($0 \leq n \leq 4$) - while at elevated temperatures of 300 °C the predominant

species are $PbCl^+$, $PbCl_2^0$, and $PbCl_3^-$ (Seward, 1984; Luo and Millero, 2006).

A mixture of sodium sulphide (Na_2S) and sodium hydroxide (NaOH) is the lixiviant used in the alkaline leaching. Sodium thioantimonite (Na_3SbS_3) is formed as described by the following reactions (Anderson, 2001):

$Na_2S + Sb_2S_3 \rightarrow 2NaSbS_2$

$NaSbS_2 + Na_2S \rightarrow Na_3SbS_3$.

Elemental sulphur, naturally available in minerals, dissolves in NaOH to form sulphur species (sulphide - S^{2-}, sodium thiosulphate - $Na_2S_2O_3$, and sodium polysulphides - Na_2S_x) that can also act as a lixiviant for antimony:

$4S^0 + 6NaOH \rightarrow 2Na_2S + Na_2S_2O_3 + 3H_2O$

$(x - 1)S^0 + Na_2S \rightarrow Na_2S_x$ (where x = 2 to 5).

Polysulfide oxidises sodium thioantimonite to sodium thioantimonate (Na_3SbS_4) that is the main species found generally in the solution:

$Na_2S_x + (x - 1)\ Na_3SbS_3 \rightarrow (x - 1)Na_3SbS_4 + Na_2S$.

The addition of NaOH prevents Na_2S hydrolysis and also solubilises stibnite (Dembele et al., 2022):

$Sb_2S_3 + 2NaOH \rightarrow NaSbS_2 + NaSbOS + H_2O$.

Although the alkaline sulphide leaching is considered very selective for antimony, it still possesses some drawbacks. According to some studies (Multani et al., 2016), when Sb minerals occur with galena, sphalerite, pyrite, NaOH is able to leach these minerals to form correspondingly the soluble plumbite (Na_2PbO_2), zincate (Na_2ZnO_2), and iron hydroxide ($Fe(OH)_2$) that can cause a certain loss of the reagent.

In industry and the predominating part of the studies devoted to Sb leaching from low-grade Sb minerals or from industrial waste, the Sb concentrations are considerably higher or co-measurable with the lead concentrations in the studied raw material. However, if the Sb is in materials containing high lead concentrations and very low Sb concentrations, as is the case with Pb concentrate, then the task is to leach the antimony into an aqueous solution, avoiding considerable leaching of lead from the concentrate.

In nature, Sb is often interconnected with ores of lead and zinc base metals (Reuter et al., 2019). Some Bulgarian geological studies point out the Sb presence in lead-zinc ores in the Rhodopes (Dimitrov, 1988; Marchev, et al., 2005; Popov and Popov, 2019).

Antimony often concentrates alongside lead in galena (lead sulphide) concentrate. This occurs because antimony frequently forms mixed sulphide or "sulphosalt" minerals (such as boulangerite or tetrahedrite) that naturally float alongside galena during the ore processing and concentration phases (Cao, et al., 2018; Megaloudi et al., 2021).

It is known that galena (PbS) dissolves in nitric acid (HNO_3) due to the acid's highly oxidising nature, converting lead sulphide into soluble lead nitrate, nitrogen oxides, and elemental sulphur (Halikia, et al., 2002; Strunnikov and Koz'min, 2005). However, the oxidation of sulphide sulphur to elemental sulphur and sulphate may cause certain passivation of the galena surface (Pashkov et al., 2002; Nnanwube and Onukwuli, 2025). The aqueous oxidation of galena studied in autoclave experiments with nitric acid at different concentrations (0.31–0.91 M) and temperatures (130–170 °C) showed the galena passivation by a small amount of anglesite ($PbSO_4$) on its surface (Aydoğan, et al., 2007).

Galena does not dissolve directly in sulphuric acid, it undergoes a surface oxidation reaction that forms an insoluble, passivating film of lead sulphate ($PbSO_4$) that effectively halts further dissolution (Xie et al., 2021; Xie et al., 2022).

However, it is widely believed that H_2SO_4 is not a suitable leaching reagent for low-grade Sb ores (Anderson, 2001).

By contrast, Rahimzoda and coauthors (Rahimzoda et al., 2024) state that treatment with 1.80 M H_2SO_4 solution at a solid to liquid (S/L) ratio = 1 : 6 and a temperature of 80 ◦C, leaches 85% of the Sb from a solid pyrometallurgical product obtained by calcination of Sb-containing materials with NaCl for 2 h. When the HCl solution was used, 75% of the Sb available in the same solid material was leached under the same conditions. We consider that probably the introduction of chlorides in the system during the chlorination roasting process improved the results.

All of the above leads us to the idea to study (i) whether Sb from Bulgarian lead-zinc / polymetallic ores is concentrated in the galena concentrate, and (ii) what is the ability of HNO_3, H_2SO_4, H_2SO_4 with the addition of NaCl, and Na_2S – NaOH solutions to leach Sb from the galena concentrate, while dissolving as less lead as possible.

Materials and methods

Ore, lead concentrate, zinc concentrate, and flotation tailings, obtained from a lead-zinc industry, are used in the study, with an emphasis on galena concentrate. Chemical analyses of the samples were performed using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The solid samples were digested with the Aqua Regia - IMS40B method. The liquid samples were analysed using the standard addition method. In both cases, certified reference materials were used in calibrations. The analysis of the solid samples was performed by SGS BG Company and of the liquid samples - by the Educational and Scientific Laboratory of Trace Analysis: ISP Techniques and Radioanalytical Methods – “St. Kliment Ohridski University”. The lead concentrate, that was further used in leaching experiments, was subjected to an X-Ray Diffraction study at the corresponding Laboratory at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”. Bruker D2 Phaser was used at Cu, λ = 1,54184, 30 kV, 10 mA, Two Theta 5°-90°, Increment 0,02° and 4191 steps.

In leaching experiments, a concentrate with particles of size +75 - 150 μm was used. Solutions of HNO_3, H_2SO_4, Na_2S, NaOH, and NaCl were prepared using p.a. grade chemicals and distilled water. The solid to liquid ratio was = 1 : 5. Experiments were carried out in 300 mL glass reactors, ensuring simultaneous temperature maintenance and stirring with a magnetic stirrer, as well as condensation of the vapours and return of water using a reflux condenser. The experimental conditions were chosen based on the literature (Anderson, 2001; Yang, 2017; Dembele et al., 2024) and presented in Table 1. For each condition, two parallel experiments were conducted and the results presented below are averaged.

Table 1. *Experimental conditions*

Expt. type	Conditions
1	2M HNO_3, 2 h, 50-55 °C
2	2M H_2SO_4, 2 h, 50-55 °C
3	1 M NaCl in 2M H_2SO_4, 2 h, 50-55 °C
4	2 M Na_2S in 1M NaOH, 2 h, 90-95 °C
5	1 M NaCl in 2M H_2SO_4, 2 h, 50-55 °C washing until neutral reaction followed by 2 M Na_2S in 1M NaOH, 2 h, 90-95 °C

The amount of extracted Sb (in %) is calculated using equation (1):

$$Extracted\ Sb,\ \% = (Sb_{in\ liquid} / Sb_{in\ solid}) \times 100 \quad (1)$$

Results and discussion

Table 2 presents the concentrations of Pb, Zn, and Sb in the different material streams determined by ICP-MS analysis of the solid phase.

Table 2. *Concentration of studied metals in the different material streams*

Material	Sb, ppm	Pb, %	Zn, %
Ore	9.97	2.89	2.03
Pb concentrate	149.2	> 65	5.80
Zn concentrate	7.8	3.80	> 60
Tailings	4.41	0.22	0.52

The data shown in Table 2 confirm that the lead-zinc ores from the studied region contain Sb in amounts higher than its average estimated abundance in the Earth's crust, which is in the range from 0.2 to 0.5 ppm (https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/antimony-statistics-and-information). It is clear that Sb is concentrated in lead concentrate – nearly 15-fold in this specific case. The results from the X-Ray analysis showed that the studied lead concentrate was composed mainly of galena, but other components were also present - ore phases were represented by sphalerite, pyrite and chalcopyrite, and non-mineral phases - by kaolinite and quartz (Fig. 1). Most probably, due to the low amounts of Sb in the materials, its minerals have not be detected by the XRD analysis.

The results from the leaching experiments, described in Table 1, are presented in Table 3.

Table 3. *Results from the leaching experiments*

Exp. type	Extracted metal, %	
	Sb	Pb
1	0.003	1.08
2	0.0023	0.0018
3	0.0022	0.05
4	5.8	0.000003
5	21.9	0.000002

As can be seen from the data given in Table 3, HNO_3 acid solution leaches a very low amount of Sb but a high amount of Pb, showing that the galena surface is not passivated. The finding may be assigned to the presence of pyrite in the sample. Zárate-Gutiérrez et al. (2012) proved that the pyrite presence modified both the reaction mechanism and the minerals dissolution kinetics, accelerating the oxidation of galena by depassivating its surface.

The percentages of leached antimony and lead with a 2 M solution of sulphuric acid are not only very low, but also approximately the same. This suggests that perhaps the destruction of the crystal lattice of galena releases isomorphously included antimony.

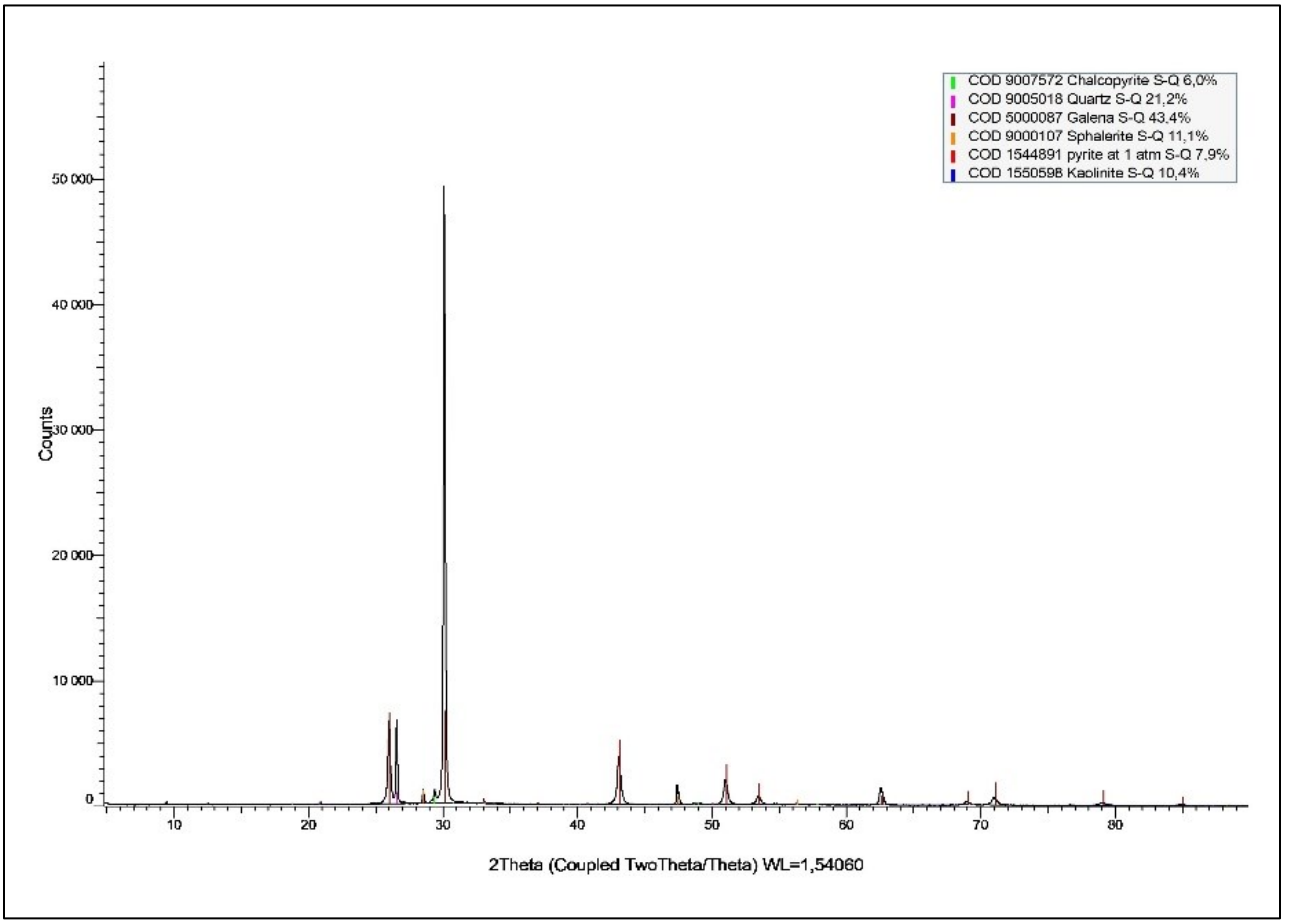


Fig. 1. Diffractogram of the used lead concentrate

The addition of sodium chloride to the sulphuric acid solution significantly increases the leaching of lead - about 28 times, while practically not changing the leaching of antimony.

Dembele and coauthors also found a relatively low leaching ability of even more concentrated 4 M solutions of H_2SO_4 and HNO_3 towards stibnite – 26 and 18 % correspondingly, at a temperature of 90 ^oC, when stibnite flotation tailings were leached and the impeding lead was practically not present in the raw material (Dembele et al., 2024). As the best leaching solution in their case, they found 4.4 M HCl that is not applicable when the raw material is mainly galena.

The use of a sulphide-alkaline solution under the conditions of the experiment practically does not leach lead, while the leaching of antimony is significant - experiment 4 – Table 3. Megaloudi et al. (2021) proposed leaching in a sodium sulphide strongly alkaline solution to extract Sb from galena concentrate containing Pb (52.89%), S (17.39%), Sb (9.91%), Fe (4.47%), As (2.79%), and Zn (1.73%). However, their concentrate included Sb in a relatively high concentration, under the form of boulangerite and jamesonite. They found that the increase in Na_2S concentration in the leaching solution and temperature caused an increase in Sb extraction, both factors increasing the dissolution rate. In addition, an increase in the S / L ratio led to a decrease in Sb extraction. About 97-98 % of the antimony available were dissolved within 2 h with a solution containing 1.25 M NaOH and 0.96 M Na_2S at 98 ^oC, but from Sb own ores that occurred in the Pb concentrate. The X-ray patterns showed that boulangerite peaks disappeared because the mineral was dissolved.

On the other hand, the initial treatment of the sample with a solution of sulphuric acid and sodium chloride, followed by washing and treatment with an alkaline solution, increased the extraction of antimony nearly 4 times, while practically did not further dissolve lead, compared to that leached during the initial treatment of the sample with the sulphuric acid solution. This could be an approach to intensify antimony leaching, while reducing lead leaching. All of the above hints that a certain pre-treatment of a galena concentrate with Cl^-ion bearing sulphuric acid solution followed by alkaline leaching could enhance Sb leaching and deserves further future experiments. The finding is partially in line with discoveries of Rahimzoda and coauthors' (Rahimzoda et al., 2024), who achieved 85% leaching of Sb that was present in the solid pyrometallurgical product obtained by calcination with the NaCl of Sb-containing materials followed by leaching for 2 h with 180 g/L H_2SO_4 solution at a S/L ratio = 1: 6 and a temperature of 80 ^oC.

Conclusions

Based on the studies carried out, the following conclusions can be drawn:

1. It is confirmed that lead-zinc polymetallic ores in the Rhodopes region bare Sb in concentrations higher than the average Clarke number.
2. During the flotation beneficiation of lead-zinc ores, Sb is concentrated in Pb concentrate.
3. At this stage of the research, for the purpose of antimony leaching, with minimal leaching of lead, an initial treatment of the material with a solution of sulphuric acid containing sodium chloride, followed by the material leaching with a solution containing sodium sulphide and sodium hydroxide is outlined as a possible approach for treating the lead concentrate. The results obtained should be considered only as proof of concept. For the implementation of the process, a number of further experiments with varying the leaching conditions (lixiviant concentrations and ratio of dissolved reagents, S/L ratio, temperature, stirring rate, particles size of the solid material) are needed in order to find the optimal ones.

Acknowledgements. This work has been carried out in the framework of the National Science Program “Critical and strategic raw materials for a green transition and sustainable development”, approved by the Resolution of the Council of Ministers № 508/18.07.2024 and funded by the Ministry of Education and Science (MES) of Bulgaria.

References

Anderson, C. G. (2001). Hydrometallurgically treating antimony-bearing industrial wastes. *JOM, 53,* 18–20. https://doi.org/10.1007/s11837-001-0156-y

Anderson, C. G. (2012). The metallurgy of antimony. *Geochemistry, 72,* 3–8. DOI: 10.1016/j.chemer.2012.04.001

Anderson, C. G. (2019). Antimony Production and Commodities. In R.C. Dunne, S. Komar-Kawatra, & C.A. Young (Eds.) *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (pp. 1557–1568). Englewood, CO, USA

Aydoğan, S., Erdemoğlu, M., Uçar, G., & Aras, A. (2007). Kinetics of galena dissolution in nitric acid solutions with hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy, 88,* 52–57 doi:10.1016/j.hydromet.2007.03.005

Baba, A. A., & Adekola, F. A. (2011). Comparative analysis of the dissolution kinetics of galena in binary solutions of $HCl/FeCl_3$ and HCl/H_2O_2. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 18*(1), 9–17. https://doi.org/10.1007/s12613-011-0393-1

Cao, Q., Chen, X., Feng, Q., & Wen, S. (2018). Activation mechanism of lead ion in the flotation of stibnite. *Minerals Engineering, 119,* 173–182. https://doi.org/10.1016/ j.mineng.2018.01.039;

Dembele, S., Akcil, A., & Panda, S. (2022). Technological trends, emerging applications and metallurgical strategies in antimony recovery from stibnite. *Minerals Engineering, 175,* Article 107304. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107304

Dembele, S., Akcil, A., & Panda, S. (2024). Investigation of the characteristics of stibnite ($Sb2S_3$) flotation tailings and extraction of critical metals (Sb and As): Optimisation and scale-up. *Minerals Engineering, 216,* Article 108883. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108883

Dimitrov, R. (Ed.) *Olovno-tsinkovite nahodishta v Balgaria,* Tehnika, Sofia, 1988.

Dutrizac, J. E. (1986). The dissolution of galena in ferric chloride media. *Metallurgical Transactions B, 17*, 5–17.

European Commission (2023). *COM(2023) 160 Final ANNEXES to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020.* European Commission. Brussels, Belgium.

Halikia, I., Zoumpoulakis, L., & Christodoulou, E. (2002). Lead sulphide leaching kinetics in nitric acid solutions. *Erzmetall 55*(3), 166–175.

Henckens, M. L. C. M., Driessen, P. P. J., & Worrell, E. (2016). How can we adapt to geological scarcity of antimony?

Investigation of antimony's substitutability and of other measures to achieve a sustainable use. *Resources, Conservation and Recycling, 108,* 54–62. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.012

Luo, Y., & Millero, F. J. (2006). Stability constants for the formation of lead chloride complexes as a function of temperature and ionic strength. *Geochimica Cosmochimica Acta, 71*(2), 326–334. doi: 10.1016/j.gca.2006.09.019

Marchev, P., Kaiser-Rohrmeier, M., Heinrich, C., Ovtcharova, M., von Quadt, A., & Raicheva, R. (2005). Hydrothermal ore deposits related to post-orogenic extensional magmatism and core complex formation: The Rhodope Massif of Bulgaria and Greece. *Ore Geology Reviews, 27,* 53–89. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.027

Megaloudi, R. A., Kourtis, A., Oustadakis, P., Tzamos, E., Dimitriadis, D., & Xenidis, A. (2021). Antimony Extraction from Galena Concentrates. *Materials Proceeding, 5,* 130. https:// doi.org/10.3390/materproc2021005130

Moolayadukkam, S., Bopaiah, K. A., Parakkandy, P. K., & Thomas, S. (2022). Antimony (Sb)-Based Anodes for Lithium–Ion Batteries: Recent Advances. *Condensed Matter, 7*(1), Article 27. DOI: 10.3390/condmat7010027

Moosavi-Khoonsari, E., Mostaghel, S., Siegmund, A., & Cloutier, J. P. (2022). A Review on Pyrometallurgical Extraction of Antimony from Primary Resources: Current Practices and Evolving Processes. *Processes, 10*(8), Article 1590. https://doi.org/10.3390/pr10081590

Multani, R. S., Feldmann, T., & Demopoulos, G. P. (2016). Antimony in the metallurgical industry: A review of its chemistry and environmental stabilisation options. *Hydrometallurgy,164,*141–153. 10.1016/j.hydromet.2016.06.014

Nie, R., Hu, M., Risqi, A. M., Li, Z., & Seok, S. I. (2021). Efficient and stable antimony selenoiodide solar cells. *Advanced Science 8,* Article 2003172.

Nishad, P.A., & Bhaskarapillai, A. (2021). Antimony, a pollutant of emerging concern: A review on industrial sources and remediation technologies. *Chemosphere, 277,* Article 130252. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130252

Nnanwube, I. A., & Onukwuli, O. D. (2025). Kinetics of galena leaching in nitric acid and sodium chloride solutions for potential lead recovery. *Canadian Metallurgical Quarterly, 64*(4), 2399–2414. https://doi.org/10.1080/00084433.2025.2452779

Nnanwube, I. A. Onukwuli, O. D., & Sunday, U. A. (2018). Modelling and Optimisation of Galena Dissolution in Hydrochloric Acid: Comparison of Central Composite Design and Artificial Neural Network. *Journal of Minerals and Materials Characterisation and Engineering, 6*(3). DOI: 10.4236/jmmce.2018.63021;

Noor, E. A., & Al-Moubaraki A. H. (2008). Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions. *International Journal of Electrochemical Science, 3*(7), 806-818. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15485-X

Nwokocha, T., & Burleigh, T.D. (2024). Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel in HCl and $FeCl_3$. In: TMS 2024 153rd Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. TMS 2024. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. pp 1205–1217 https://doi.org/10.1007/978-3-031-50349-8_105

Parize, R., Katerski, A., Gromyko, I., Rapenne, L., Roussel, H., Karber, E., Appert, E., Krunks, M., & Consonni, V. (2017). $ZnO/TiO_2/Sb_2S_3$ core-shell nanowire heterostructure for extremely thin absorber solar cells. *Journal of Physical Chemistry C, 121*(18), 9672–9680. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00178

Pashkov, G. L., Mikhlina, E. V., Kholmogorov, A. G., & Mikhlin, Y. L. (2002). Effect of potential and ferric ions on lead sulphide dissolution in nitric acid. *Hydrometallurgy, 63,* 171–179. 10.1016/S0304-386X (01)00221-3

Popov, K., & Popov, P. (2019). The Alpine late collisional Rila-Rhodope Metallogenic Zone of the Balkan Orogenic System. *Review of the Bulgarian Geological Society, 80,* 1, 55–79.

Rahimzoda, K. S., Anderson, C. G., Badalov, A. B., Kadirov, A. A., & Eshov, B. B. (2024). Hydrometallurgical Processing of Antimony Bearing Pyrometallurgical Calcines. *Journal of Mineral and Material Science (JMMS), 5*(5), Article 1097. DOI: 10.54026/JMMS/1096

Reuter, M. A., van Schaik, A., Gutzmer, J., Bartie, N., & Abadías-Llamas, A. (2019). Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. *Annual Review of Materials Research, 49,* 253–74. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010057

Seward, T. M. (1984). The formation of lead(II) chloride complexes to 300°C: A spectrophotometric study, *Geochimica et Cosmochimica Acta, 48*(1), 121-134. https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90354-5

Strunnikov, S. G., & Koz'min, Yu. A. (2005). Hydrometallurgical schemes of lead concentrate processing. *Chemistry for Sustainable Development, 13*(4), 483–490.

U.S. Geological Survey (2026). *Mineral commodity summaries 2026 (ver. 1.3,* May 2026*).* U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/mcs2026.

Wu, Y., Shuang,W., Wang, Y., Chen, F., Tang, S., Wu, X. L., Bai, Z., Yang, L., & Zhang, J. (2024). Recent Progress in Sodium-Ion Batteries: Advanced Materials, Reaction Mechanisms and Energy Applications. *Electrochemical Energy Reviews, 7,* Article 17. DOI https://doi.org/10.1007/s41918-024-00215-y

Xie, H., Jin, Y., Zhang, P., Liu, Y., Gao, L., Feng, Q., & Liu, D. (2022). Surface modification mechanism of galena with H_2SO_4 and its effect on flotation separation performance. *Applied Surface Science, 579,* Article 152129. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152129

Xie, H., Liu, Y., Rao, B., Wu, J., Gao, L., Chen, L., & Tian, X. (2021). Selective passivation behavior of galena surface by sulphuric acid and a novel flotation separation method for copper-lead sulphide ore without collector and inhibitor. *Separation and Purification Technology, 267,* Article 118621. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118621 ;

Yang, T., Rao, S., Liu, W., Zhang, D., & Chen, L. (2017). A selective process for extracting antimony from refractory gold ore. *Hydrometallurgy, 169,* 571–575. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.03.014

Ye, L., Ouyang, Z., Chen, Y., & Chen, Y. (2019). Ferric chloride leaching of antimony from stibnite. *Hydrometallurgy, 186,* 210–217. 10.1016/j.hydromet.2019.04.021

Zárate-Gutiérrez, R., Lapidus, G. T., & Morales, R. D. (2012). Aqueous oxidation of galena and pyrite with nitric acid at moderate temperatures. *Hydrometallurgy, 115-116*, 57–63 DOI:10.1016/J.HYDROMET.2011.12.010.

https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program/science/about-2025-list-critical-minerals

https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/antimony-statistics-and-information

AN ENHANCED GIS FRAMEWORK FOR CONCESSION DATA ACCESSIBILITY: A CASE STUDY OF THE PERNIK REGION

Stanimir Dimitrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” ,1700 Sofia; E-mail: stanimir.dimitrov@mgu.bg

ABSTRACT. One of the strategic activities defined in the Strategy for Development of Geological Exploration and Protection of the Subsoil in the Republic of Bulgaria until 2010(MEW, 2001) is the “establishment of a National Geological Server for geoinformation support of state authorities, European institutions, and interested users. “Despite previous efforts in this direction by various companies and institutions, as of 2026, there are still no functioning geological servers with public access. The aim of this study is to present the development of a web-based GIS featuring publicly accessible data from the National Concessions Register and the Ministry of Energy, with a focus on mining concessions for mineral resources in the Pernik region. The results obtained using modern GIS approaches, are integrated into the ESRI ArcGIS Server software environment, and the concession data are published in accordance with established standards of Open Geospatial Consortium (OGC): Web Map Service (WMS) and Web Feature Service (WFS). This ensures the operational interoperability of spatial data and services, enabling efficient exchange, integration, and analysis of geospatial information in real time to support administration and business.

Key words: GIS, Concessions, Mineral Resources, OGC.

УСЪВЪРШЕНСТВАН ГИС ПОДХОД ЗА ДОСТЪП ДО ДАННИ ЗА КОНЦЕСИИ – ИЗСЛЕДВАНЕ ЗА ОБЛАСТ ПЕРНИК

Станимир Димитров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ ,1700 София

РЕЗЮМЕ. Една от стратегическите дейности, дефинирани в “Стратегия за развитието на геологопроучвателната дейност и опазването на земните недра в Република България до 2010 г.”(МОСВ, 2001), е “изграждане на Национален геоложки сървър за геоинформационно обезпечаване на държавните органи, европейски институции и заинтересовани потребители.” Въпреки предходни дейности в тази насока от различни частни компании и държавни институции, към 2026 г. все още не са разработени геоложки сървъри с публичен достъп. Целта на настоящата статия е да разгледа създаването на уеб базирана ГИС, интегрираща данни с публичен достъп от Националния концесионен регистър и Министерството на енергетиката, с фокус върху концесиите за добив на подземни богатства за област Перник. Резултатите от изследването, получени с помощта на съвременни ГИС подходи, са интегрирани в софтуерната среда на ESRI ArcGIS Server, като данните за концесиите са публикувани чрез утвърдените стандарти на OGC (Отворен геопространствен консорциум) – WMS (услуга за уеб карти) и WFS (услуга за уеб обекти). Това осигурява оперативна съвместимост на пространствените данни и услуги, като създава условия за ефективен обмен, интеграция и анализ на геопространствени данни в реално време, в подкрепа на администрацията и бизнеса.

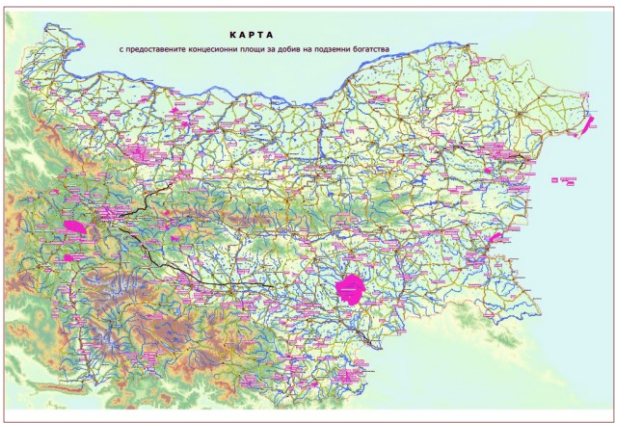
Ключови думи: ГИС, концесии, подземни богатства, OGC.

Въведение

С тенденцията публичните данни да бъдат с отворен достъп[1] (Закон за достъп до пространствените данни), дирекция „Стратегическо развитие, координация и концесии“ към Министерски съвет и Министерство на енергетиката са добър пример за прозрачно управление на данните за концесии за добив на подземни богатства.

Дирекция „Природни ресурси, концесии и контрол“ към Министерството на енергетиката поддържа и споделя регистър с действащите концесии за добив на подземни богатства, както и карта с предоставените концесионни площи за добив на подземни богатства и инертни материали под формата на георефериранi карти в PDF формат (Фиг. 1). От друга страна, дирекция „Стратегическо развитие, координация и концесии“ поддържа Национален концесионен регистър (НКР), в който са включени всички договори за предоставяне на концесии, условията по тях, както и се съдържа координатен регистър и схема на концесионната площ.

Въпреки свободния достъп до информация, касаеща концесии, и в частност концесии за добив на подземни богатства, от схемите на концесионните площи с техните координатни регистри би било трудно концесията да се постави в пространствен контекст само с разглеждането на договорите. Картата с предоставените концесионни площи за добив на подземни богатства от своя страна носи само пространствен контекст – показва местоположението на концесиите в национален мащаб, но не дава информация за точните граници и характеристики на концесиите.



Фиг. 1. Карта с предоставените концесионни площи за добив на подземни богатства (Източник: Министерство на енергетиката, https://www.me.government.bg/themes/koncesii-za-dobiv-735-1613.html)

Предвид гореизложеното, целта на настоящата разработка е оптимизиране на достъпа до данните чрез обединяването на цялата информация в единна ГИС платформа, така че концесиите да се визуализират на уеб-карта с цялата придружаваща информация към тях. Това би позволило на заинтересованите

[1] Форма на информация, към която всеки има неограничен достъп, с право да я използва, променя и споделя(Институт по публична администрация, 2015)

лица своевременно да извършват справки за концесиите – местоположение, граници, срокове на концесия, концесионери, видове подземни богатства и друга публично достъпна информация, касаеща концесиите за добив на едно място.

В обхвата на изследването влизат 19 концесии за добив на подземни богатства, намиращи се на територията на област Перник. Четиринадесет от тях са в групите на строителните материали – доломити, глини и варовици. Подземните богатства на две концесии попадат в групата на твърдите горива – въглища и кафяви въглища. Метални полезни изкопаеми се добиват в една от концесиите, а две концесии добиват подземни богатства от групата на неметалните полезни изкопаеми – огнеупорни и керамични глини. Предложеният подход за преминаване към динамични уеб ГИС услуги, разработен за територията на област Перник, може да бъде приложен към по-големи територии - на регионално и национално ниво.

Публикуването на данните в уеб среда, като уеб ГИС услуги, под стандарти на OGC – WMS и WFS, позволява не само тяхната визуализация, но и изтегляне и работа с данните (Davis, 2007).

Обхват и състояние на данните за концесии на територията на България

Необходимата информация за концесиите се намира в сайта на Министерството на енергетиката, а за границите на концесиите информация като координатен регистър има в договорите за предоставяне на всяка една от тях, публикувани в НКР.

Данни от Министерство на енергетиката

Регистърът с действащите концесии за добив на подземни богатства съдържа данни за идентификатор на концесията, концесионер, находище, община, област, група подземно богатство, срок на концесията, дата на подписване на договор, дата на влизане в сила на концесионния договор и номер на решение на Министерски/Общински съвет. Данните са в табличен (xlsx) формат.

Данни от Националния концесионен регистър

НКР съхранява и споделя данни за партидата на концесията (идентификатор на концесията), вид на концесията, предмет на концесията, концедент, статус на партидата, дали е под или над европейски праг, връзка с партидата за процедура, както и договорите за предоставяне за добив на подземни богатства, решенията за предоставяне на концесия, допълнителни споразумения и разпоредби (ако са налични) и други свързани документи по партидата.

Договорите, с приложени към тях схема и координати на концесионната площ, се съхраняват като сканирани PDF файлове.

На базата на координатните регистри, концесиите за добив могат да бъдат интегрирани в ГИС среда, след тяхното привеждане от сканиран документ в xlsx таблица, която ГИС системата може да разчете.

Технически, пренасянето на координатните регистри от сканиран документ в таблица може да бъде дълъг, ръчен процес, особено при голям брой точки, който крие рискове от грешки при преписването на координатите.

За конкретната разработка е избрано този работен процес да бъде полу-автоматизиран с помощта на изкуствен интелект. При този подход, след пренасяне на координатите в табличен вид е необходимо те да бъдат проверени, тъй като са възможни грешки. Предизвикателството идва от една страна поради наличието на воден знак, както и от лошо сканираните документи, при което стойностите на координатите на места изблеждяват и стават трудно четими (Фиг. 2).

№ точка	X(м)	Y(м)	H(м)
17(т22)	4595301.3	8451921.3	783.0
18(т27)	4595310.5	8451924.0	781.2
19(т28)	4595315.0	8451925.3	780.7
20(т33)	4595327.9	8451929.0	777.0
21(тI)	4595394.8	8451901.0	748.3
22(тII)	4595384.9	8451928.5	764.4
23(тIII)	4595365.0	8451888.8	772.0
24(тIV)	4595351.1	8451935.6	769.2
25(тV)	4595352.0	8451736.1	754.3
26(т38)	4595354.1	8451736.7	754.0
27(т40)	4595366.2	8451730.2	752.2
28(т41)	4595362.1	8451739.0	752.7

Фиг. 2. Координатен регистър, сканиран от договор за предоставяне на концесия за добив на подземни богатства - с воден знак и избледнели цифри

ГИС технологии

За реализирането на настоящата разработка са избрани продуктите на ESRI – ArcGIS Enterprise и ArcGIS Pro, тъй като ESRI предоставят цялостна ГИС платформа за създаване, обработване, поддържане и споделяне на геопространствени данни и картографски продукти със силен инструментариум за анализи в добре изградена завършена система от инструменти за ГИС анализи, обработка и споделяне (Славова, 2025).

ArcGIS Enterprise представлява комплексна сървърна софтуерна архитектура за управление на геопространствени данни, интеграция на функционалности за анализи, визуализация и изчисления в рамките на защитена корпоративна инфраструктура. Системата служи като централизирана платформа за оперативна съвместимост, поддържане на уеб ГИС услуги и автоматизирането на работни процеси в реално време (ESRI, 2026).

Основата на геопространственото съдържание в ArcGIS Enterprise са уеб ГИС услугите, поддържани на ArcGIS Server, а основното място за достъп, визуализация и работа с това съдържание е порталът на ArcGIS Enterprise. Порталът помага за трансформирането на услугите от ArcGIS Server в информационни продукти и за защитеното им споделяне с потребители и заинтересовани страни. (Bhatia T., Singh B., Litoria P., Pateriya B., 2019)

В рамките на представената в статията разработка, е използван ArcGIS Enterprise портала на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, чрез който са споделени ГИС услугите, поддържани от сървър, на територията на катедра „Маркшайдерство и геодезия“.

ArcGIS Pro. Изборът на ArcGIS Pro като основна ГИС среда за подготовка и обработка на данните, заедно с ArcGIS Enterprise, осигурява цялостен технологичен цикъл за прецизна обработка и администриране на геопространствените данни. Този интегриран подход гарантира висока степен на оперативна съвместимост, което позволява ефективен обмен на географска информация. ArcGIS Pro е използван за ГИС среда, в която са извършени основните ГИС задачи за осъществяване целта на разработката – интеграция на данни, изграждане

на база данните, създаване на полигони и споделяне на слоя в уеб среда.

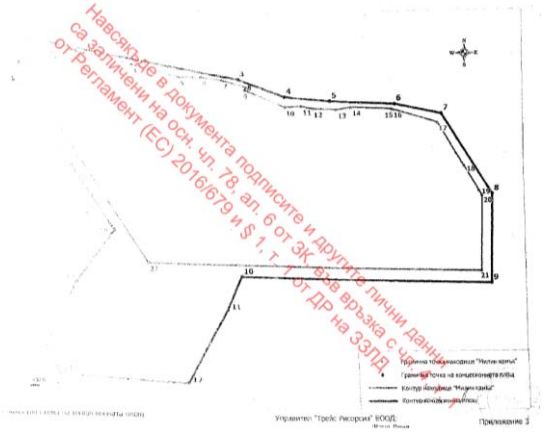
Методика за преход от статични регистри към динамични уеб ГИС услуги

Изграждане на ГИС базата данни

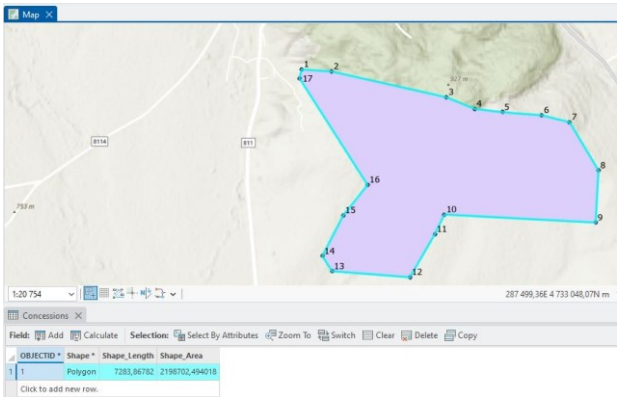
Значителна част от координатните регистри в договорите за концесии са в координатна система „1970“. Поради липсата на тази координатна система в ArcGIS Pro, за целта на настоящата разработка, координатните регистри предварително са трансформирани в координатна система БГС2005 с официалния софтуер на Агенция по геодезия картография и кадастър BGSTrans. Друг подход би бил дефиниране на системата „1970“ в среда на ArcGIS Pro.

За да се избегне многократно въвеждане на таблици всички координатни регистри за граници на концесии в област Перник са събрани в един xlsx (Microsoft Excel) файл, но в различни листи. ArcGIS Pro позволява разглеждането на различните листи от xlsx файл като различни таблици с координати.

Данните от качената в ArcGIS Pro таблица с концесиите съществуват все още само като таблична информация. Използван е алгоритъм, който създава точки по координатите в таблиците, последван от алгоритъм за изчертаване на полигони съобразно последователността на номерацията на точките. Така от схема в сканиран документ (Фиг. 3) концесионните площи са вече представени във векторен формат (Фиг. 4). Следвайки този подход, са генерирани (очертани) всички налични концесионни площи.



Фиг. 3. Схема на концесионната площ на находище „Милин камък“ от договор за предоставяне на концесия



Фиг. 4. Полигон, представляващ концесионната площ на находище „Милин камък“ в ГИС

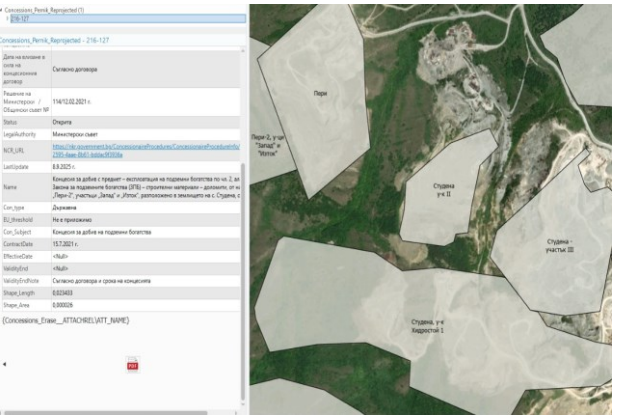
Всяка предоставена концесия се идентифицира със съответен партиден номер. При създаването на векторния слой е добавено допълнително текстово поле, в което се вписва този партиден номер, тъй като служи и за референция за обединяване на елементите в слоя с данните от Министерство на енергетиката. По тази методика ГИС базата данни съчетава геометрия за всяка една концесия, атрибутна информация от МЕ, атрибутна информация от НКР и прикачени договори с придружаващи документи относно предоставянето на концесия. Добавени са и метаданни, в които се описват източниците на данните, датите на създаване на ГИС данните, както и са посочени контакти за връзка. (Фиг. 5).

Фиг. 5. Схема на съдържанието на ГИС базата данни

Споделяне на картата в уеб среда

Картата, състояща се от слоеве за концесиите и обложка (или базова карта), може лесно да бъде споделена в уеб пространството с директна връзка между настолното ГИС приложение и ArcGIS Enterprise, така че интеграцията между ArcGIS Pro и сървърната инфраструктура позволява автоматизирано трансформиране на локалните данни в оптимизирани уеб услуги.

Преди публикуването се извършва оптимизиране на символизацията на полигоните, която да осигури по-добра визуализация и съответно по-добро възприятие на данните (Фиг. 6).



Фиг. 6. Част от визуализацията на границите на концесиите за добив в района на язовир Студена

Следващата стъпка включва конфигуриране на параметрите за споделяне на подготвения ресурс към портала на ArcGIS Enterprise. Посредством инструментариума за споделяне (Sharing), полигоновият слой се дефинира като уеб слой с данни (Web Feature Layer), което позволява на крайните потребители не само да визуализират, но и да извличат информация за конкретните концесионни договори. Посочва се вида на данните, тагове за картата, категории, в които данните попадат, име на уеб слоя и ниво на споделяне. След

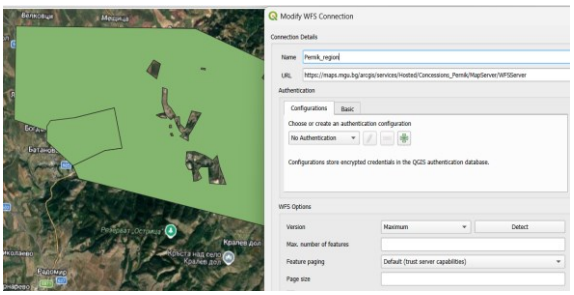
завършване на софтуерна проверка за грешки, слоят се публикува и може да бъде намерен, споделян и конфигуриран в уеб среда.

WMS и WFS

Ключов етап е предоставянето на геопространствените данни за концесионните обекти чрез международно признатите стандарти на Open Geospatial Consortium (Reed, 2010). Интеграцията на WMS позволява на потребителите да визуализират границите на концесиите като динамично генерирани растерни изображения, което оптимизира скоростта на зареждане в уеб базирани ГИС приложения (Beaujardiere, 2006; Abdalla, 2016). От друга страна, внедряването на WFS осигурява директен достъп до векторната геометрия и атрибутната информация на полигоните, позволявайки извършването на пространствени заявки и локално съхранение на данните от външни системи (Vretanos, 2014). Този подход гарантира, че информацията е достъпна както за визуализация, така и за задълбочен експертен анализ.

Изборът на протоколите WMS и WFS в средата на ArcGIS Enterprise е продиктуван от необходимостта от пълна оперативна съвместимост с различни софтуерни платформи. ESRI е основен член в OGC и ГИС продуктите на организацията поддържат стандартите WMS и WFS. (ESRI, 2025). Докато стандартните уеб карти на ESRI са оптимизирани за вътрешната софтуерна среда на организацията, WMS и WFS услугите премахват бариерите пред обмена на данни с институции и организации, използващи софтуер с отворен код или други специализирани ГИС системи. ArcGIS Enterprise автоматично поддържа актуалността на тези услуги, като всяка промяна в основната геобаза данни се отразява в реално време в публикуваните интерфейси (ArcGIS Enterprise).

За целите на валидацията на разработката, публикуваните WMS и WFS услуги са тествани чрез свързване от външен ГИС софтуер (QGIS). (Фиг. 7). Резултатът показва, че услугите работят и могат да се заявяват от външни ГИС софтуери и програми.



Фиг. 7. Границите на концесиите за добив в среда на QGIS чрез WFS услуга

Надграждане на системата

Уеб ГИС картата с предоставените концесии за добив на подземни богатства за област Перник има потенциал за надграждане по няколко направления:

Обхват. Разширяване на обхвата на изследването до национално ниво е следваща стъпка, която може да следва настоящата методология и методика.

Добавяне на други геоложки данни. Обединяването на данните от договорите за предоставяне на концесии на подземни богатства, координатните регистри на техните граници и информация от Министерство на енергетиката е добро начало за създаването на цялостен геоложки сървър, който може да бъде надграден с данни от специализирани карти, геоложки карти, карти с геоложки проучвания, сателитни изображения и други релевантни данни.

От уеб ГИС слой към ГИС портал. Един от последните инструменти, създаден за представяне и взаимодействие с ГИС данни е ArcGIS Experience Builder. ArcGIS Experience Builder е SaaS (софтуер като услуга) за създаване на уеб ГИС портал, който освен визуализация на ГИС данни има възможност да се създаде архитектура за цялостно ГИС приложение в уеб (ESRI, 2022). Така ГИС слоят има потенциал да бъде представен с различни инструменти за анализ и визуализация, добавяне на услуги от доставчици на сателитни изображения, добавяне на допълнителни инструменти и връзки към WMS и WFS услуги.

Заключение

Проведеното изследване успешно демонстрира прилагането на осъвременен ГИС подход за обединяване и визуализиране на данни от различни източници за концесии за добив на подземни богатства в област Перник. Чрез интегрирането на информация от Националния концесионен регистър и Министерството на енергетиката в единна технологична система, базирана на ArcGIS Enterprise и ArcGIS Pro, се преодолява фрагментираността на административните данни и се създава качествен информационен продукт.

Основните изводи от разработката могат да бъдат обобщени в следните направления:

Технологична ефективност: Използването на полуавтоматизирани методи за извличане на координатни регистри и последващата им трансформация в ГИС среда доказва, че е възможно бързо и прецизно преобразуване на архивни сканирани документи в актуални векторни слоеве.

Оперативна съвместимост: Публикуването на данните чрез утвърдените международни стандарти WMS и WFS гарантира, че геопространствената информация за област Перник е достъпна за широк кръг от потребители и външни системи, независимо от използвания от тях софтуер. Това премахва технологичните бариери и насърчава прозрачността в управлението на природните ресурси.

Приложимост и мащабируемост: Разработеният модел за област Перник служи като работещ прототип, който може да бъде разширен до национално ниво. Интегрирането на тези данни в специализиран геоложки сървър би подпомогнало значително държавната администрация, бизнеса и научната общност при вземането на информирани решения.

В заключение, представената методика за преход от статични регистри към динамични уеб ГИС услуги е ключова стъпка към модернизацията на сектора. Бъдещото надграждане на системата чрез съвременни уеб-базирани

ГИС инструменти би превърнало настоящия слой в комплексен портал, осигуряващ аналитични възможности в реално време и утвърждаващ принципите за отворени и достъпни данни в минерално-суровинния отрасъл на Република България.

Литература

Abdalla, R. (2006). *Mobile GIS and Location-Based Services (LBS)*. ISBN 978-3-319-33602-2. ISBN 978-3-319-33603-9 (eBook). DOI 10.1007/978-3-319-33603-9.

Beaujardiere, J. d. l. (2006). *OpenGIS® Web Map Server Implementation Specification*. OGC® 06-042.

Bhatia, T., Harpinder Singh, P.K., Litoria, B., & Pateriya, B. (2019*). Web GIS Development using Portal for ArcGIS, ArcGIS Server and Web AppBuilder for ArcGIS*. ISSN: 0976-8491 (Online), ISSN: 2229-4333 (Print).

Davis, S. (2007). *GIS for Web Developers*. ISBN-13: 978-0-9745140-9-3.

ESRI. *Introduction to ArcGIS Enterprise*. [Прегледан на 01.02.2026]. Достъпен от https://enterprise.arcgis.com/en/get-started/latest/windows/what-is-arcgis-enterprise-.htm

ESRI. *OGC support in ArcGIS Enterprise*. [Прегледан на 01.02.2026]. Достъпен от https://enterprise.arcgis.com/en/server/latest/publish-services/windows/ogc-support-in-arcgis-server.htm

ESRI. *ESRI Support for Open Geospatial Standards* [Supplemental material]. [Прегледан на 17.03.2025]. Достъпен от https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/technical-papers/esri-support-for-open-geospatial-standards.pdf

ESRI. *ArcGIS® Experience Builder* [Supplemental material]. G2801871. [Прегледан на 11.01.2026]. Достъпен от https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-experience-builder/overview

Panagiotis (Peter) A. Vretanos. (2014). *OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard. With Corrigendum*. OGC® Project Document: OGC 09-025r2.

UN-GGIM Secretariat (2022). *A Guide to the Role of Standards in Geospatial Information Management*. Достъпен от https://standards.unggim.ogc.org/unggim_guide.html

Закон за достъп до пространствени данни. изм. ДВ. бр.15 от 22 Февруари 2022г. [Прегледан на 01.02.2026]. Достъпен от: https://www.lex.bg/laws/ldoc/2135667082.

Закон за концесиите. изм. ДВ. бр.16 от 10 Февруари 2026г. [Прегледан на 09.03.2026]. Достъпен от: https://lex.bg/bg/laws/ldoc/2137178490.

Закон за подземните богатства. доп. ДВ. бр.95 от 7 Ноември 2025г. [Прегледан на 01.02.2026]. Достъпен от https://lex.bg/laws/ldoc/2134650880

Институт по публична администрация (ИПА) (2015). *Отворени данни за прозрачно управление*. ISBN 978-619-7262-02-5.

Министерски съвет, Дирекция "Стратегическо развитие, координация и концесии". *Национален концесионен регистър. Достъпен от https://nkr.government.bg/ [Прегледан: 09.09.2025].*

*Министерство на енергетиката (МЕ). Регистър на концесии за добив на подземни богатства. Достъпен от https://www.me.government.bg/themes/*koncesii-za-dobiv-735-1613.html

Министерство на околната среда и водите (МОСВ). *Стратегия за развитието на геолого-проучвателната дейност и опазването на земните недра в Република България до 2010 г*. Достъпен от https://share.google/YDmzpNGYlZzoshV2S

Славова, Т. (2025). *Визуализирай света: Пътеводител в геопространствените технологии*. София. ИК “Свети Иван Рилски”. ISBN: 978-954-353-502-6 (print). ISBN: 978-954-353-503-3 (online).

A HIGHLY EFFICIENT METHOD FOR THE GASIFICATION OF CELLULOSE WASTE

Dimitar Nikolaev Kolev

Institute of Chemical Engineering, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, *Acad. G.Bonchev Str., bl.103;*
E-mail: d.kolev@iche.bas.bg

ABSTRACT: The global demand for renewable energy sources is steadily increasing due to the environmental impact associated with the continued use of fossil fuels, including elevated pollution levels and increased emissions of greenhouse gases. Direct combustion of cellulose-based waste typically results in the formation of significant quantities of tar compounds, which deposit on heat-exchange surfaces and consequently reduce thermal efficiency. The technology presented in this study offers an effective method for converting cellulose waste into clean, tar-free combustible gases. The produced gas mixture is suitable for utilisation in various energy conversion systems, including burners, piston engines, and gas turbine modules. Experimental data indicate that the efficiency of converting the energy content of cellulose into gaseous fuel exceeds 80%, demonstrating the high potential of this approach for sustainable energy production.

Key words: gasification, energy efficiency.

ВИСОКО ЕФЕКТИВЕН МЕТОД ЗА ГАЗИФИКАЦИЯ НА ЦЕЛУЛОЗНИ ОТПАДЪЦИ

Димитър Николаев Колев
Институт по инженерна химия-БАН, София 1113, ул. „Акад Г. Бончев“, бл. 103

РЕЗЮМЕ: Глобалната необходимост от използване на възобновяеми енергийни източници непрекъснато нараства поради негативното въздействие на изкопаемите горива върху околната среда, включително повишените нива на замърсяване и увеличените емисии на парникови газове. Директното изгаряне на целулозни отпадъци обикновено води до образуване на значителни количества катранени съединения, които се отлагат по топлообменните повърхности и по този начин намаляват топлинната ефективност. Представената в настоящото изследване технология предлага ефективен метод за превръщане на целулозни отпадъци в чисти, свободни от катрани горими газове. Получената газова смес може да се използва в различни енергийни системи, включително горелки, бутални машини и газотурбинни модули. Данните показват, че коефициентът на преобразуване на енергийното съдържание на целулозата в газообразно гориво надвишава 80%, което демонстрира високия потенциал на този подход за устойчиво производство на енергия.

Ключови думи: газификация, енергийна ефективност.

Introduction

The use of renewable energy in EU countries has significantly increased in recent years. However, let us take a look at where we stand today. As shown in Table 1, the share of renewable energy in the European Union is still relatively low—comparable to that in Africa. For this reason, the Directive (EU) 2023/2413 was adopted to promote the use of renewable energy.

Table 1. *Energy resources used by continent*

Continent	Fossil Fuels (%)	Nuclear (%)	Renewables (%)
Africa	90	0	10
Asia	85	5	10
Europe	70	20	10
North America	80	15	5
South America	75	5	20
Oceania	65	10	25

The examination of global energy consumption by type shows that renewable energy accounts for only 15% (Fig. 1).

What exactly is biomass? Table 2 presents the elemental composition of several agricultural and forestry residues. Regardless of their origin, they share very similar basic components.

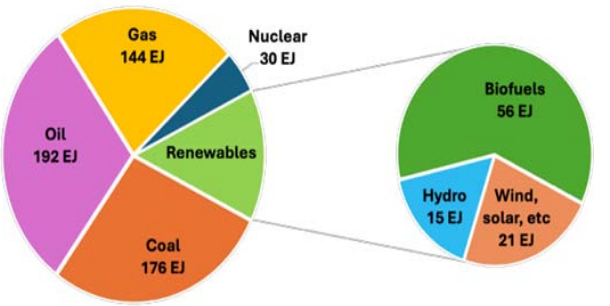


Figure 1. Global Total Energy Supply in 2023. Source: IEA

Table 2. *Elemental composition of biomass*

Type of Biomass	C %	*H* %	*O* %	*N* %	*S* %
Pine with bark	49.5	6.5	42.6	0.12	0.014
Spruce with bark	49.8	6.3	43.2	0.13	0.015
Beech with bark	47.9	6.2	45.2	0.22	0.015
Wheat straw	45.6	5.8	42.4	0.48	0.082
Rye straw	46.6	6	42.1	0.55	0.085
Millet straw	47.5	5.8	41.4	0.46	0.089

Next, the production of various grain crops in Bulgaria over the past few years is reviewed in Table 3. The total quantity exceeds 10 million tons (Global Data), and the amount of straw waste is approximately the same. Currently, this waste is partially used for animal feed and bedding, but most of it is either ploughed into the soil or burned illegally in the fields.

Table 3. *Grain production in Bulgaria*

Year	Wheat (mln t)	Corn (mln t)	Sunflower (mln t)	Other grains (mln t)
2022	6	2.9	2	0.8
2023	5.5	3.2	1.9	0.7
2023	6.2	3	2.1	0.8

Timber growth in Bulgaria is approximately 14.5 million m³. Only 5–7 million m³ (EFA 2023) is used for production. Waste from the wood processing industry amounts to between 1.5 and 2.5 million m³. Some of this waste is used to produce pellets, but most of it is discarded and pollutes the environment.

Finding a solution for the use of these waste materials is an important issue both for the industry and for improving the environment.

Technological scheme

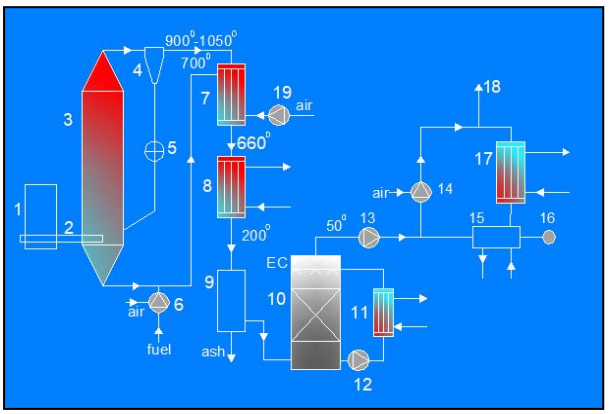


Fig. 2. Technological scheme of the gasification process

The system shown in Fig. 2 consists of the following elements: hopper (1), screw conveyor (2), gasifier (3), cyclone (4), rotary valve (5), burners (6) and (14), recuperative heat exchanger (7), heat exchangers (8), 11), and (17), bag filter (9), economiser (10), pump (12), fans (13) and (19), piston machine (15), electric generator (16), and chimney (18).

How gasification technology works

Agricultural residues are collected from the fields and delivered to a storage facility near the processing plant. It is important to note that these residues have a very low bulk density (around 250–350 kg/m³), which makes long-distance transportation uneconomical. Studies show that transportation within 30 km is cost-effective.

The schematic solution in Fig.2 covers the following steps:

Before entering the hopper (1), the straw is shredded. From the hopper, the material is fed via a screw conveyor (2) into a gasifier (3). Continuous and uniform feeding is crucial. The temperature inside the gasifier ranges from 700–1050 °C. Material transport is assisted by preheated air at 700 °C. During transport, particles undergo four processes: drying, pyrolysis, oxidation, and reduction, converting them into gas. Particles that do not fully react are separated by a cyclone (4) and returned to the gasifier through a valve (5).

The hot gases at 1050 °C pass through a heat exchanger (7), heating the process air to 700 °C. Then, gases at 660 °C enter a boiler (8), producing steam or hot water. After cooling below 200 °C, gases go to a bag filter (9), where ash is removed. This ash can be used as fertiliser. The cooled, cleaned gases enter a condenser (contact economiser), where water vapour condenses. The outgoing gases at 50 °C and saturated humidity are directed to a fan (13), compressed, and sent to a reciprocating engine connected to an electric generator. Exhaust gases then pass through another heat exchanger (17) for heat recovery before exiting through a chimney (18).

As shown, the system includes two burners: elements (6) and (14). The former is for initial startup, and the latter is for emergency shutdown or before reaching nominal mode.

It is important to note that this solution utilises waste heat at multiple temperature levels:

1. Outside air is heated to a temperature of 700°C in heat exchanger (7). The air is used in the gasification process;
2. Steam or hot water is produced in heat exchanger (8);
3. Hot water is produced at a temperature of 60 °C in heat exchanger (11), as well as in heat exchanger (17).

Processes occurring in the gasifier

The processes taking place in the gasifier are:

- Drying (100–200 °C)
- Pyrolysis (200–600 °C)
- Oxidation (800–1100 °C)
- Reduction (800–1000 °C)

Reactions taking place in the gasifier:

Carbon reactions:

$$C + CO_2 2 \leftrightarrow 2CO + 172\ kJ/mol \quad (1)$$
$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131\ kJ/mol \quad (2)$$
$$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8\ kJ/mol \quad (3)$$
$$C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111\ kJ/mol \quad (4)$$

Oxidation reactions:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394\ kJ/mol \quad (5)$$
$$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284\ kJ/mol \quad (6)$$
$$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 kJ/mol \quad (7)$$
$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O - 242\ kJ/mol \quad (8)$$

Shift reaction:

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2\ kJ/mol \quad (9)$$

Methanation reactions:

$$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247\ kJ/mol \quad (10)$$
$$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + HO_2 - 206\ kJ/mol \quad (11)$$
$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2HO_2 - 165\ kJ/mol \quad (12)$$

Steam-reforming reactions:

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206\ kJ/mol \quad (13)$$
$$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36\ kJ/mol \quad (14)$$

The equations provided are well-known in literature. Equations (1), (4), (7), (12), and (13) are by Higman and van der Burgt (2008). Equations (2), (3), (5), and (14) are formulated by Klass (1998). Equations (6), (8), (9), (10), and (11) can be found in (Knoef, 2005). As can be seen from the equations provided, the processes are both exothermic and endothermic. The energy required for the process is obtained from the partial combustion of the biomass.

Using the equations above, an example is provided of the energy obtained when using the proposed new technology.

The processing of 290 kg of straw with 10% moisture content generates 561 nm^3 of gas with a calorific value of 9.4 MJ/nm^3. This produces 500 kW/h of electricity with an overall efficiency of 34%.

The calorific value of the gas is sufficient for use in conventional combustion systems.

Advantages of the proposed technology

- ✓ *Airflow and temperature control.*

By increasing or decreasing the rotational speed of fan (19), the required air quantity for the process can be easily regulated. This enables effective control of the gas temperature at the outlet of the gasifier.

- ✓ *Residence time control of particles*.

Adjusting the height of gasifier (3) allows regulation of the particle residence time within the reactor, enabling optimisation of the gasification process.

- ✓ *Prevention of non-gasified biomass losses.*

The inclusion of cyclone (4) prevents non-gasified biomass from leaving the process, thereby improving overall process efficiency.

- ✓ *Elimination of the need for preliminary drying.*

The simultaneous occurrence of processes within the gasifier eliminates the need for preliminary drying of the biomass, thus simplifying the technology and reducing energy consumption.

- ✓ *High-quality product gas.*

The produced gas is of high purity due to its cleaning in filter (9) and subsequent water scrubbing in economiser (10).

- ✓ *Compatibility with existing combustion systems*.

The generated gas can be utilised by all conventional combustion installations with minimal adjustments to the fuel–air ratio, facilitating straightforward integration.

- ✓ *Utilisation of additional process heat*.

The additional heat generated within the process enables the development of auxiliary technological processes, such as drying, heating, or steam generation.

- ✓ *Potential for gasification network development.*

The construction of a network of gasification plants may lead to the establishment of gas pipeline interconnections, enabling large-scale consumers to switch entirely to renewable energy sources.

References

EFA - Executive Forest Agency. (2023). Annual Report. Sofia: Executive Forest Agency. Available at: https://www.iag.bg/data/docs/gd2022.pdf

Global Data & Statistics Hub. https://statbase.org/data/bgr-cereal-production/

Higman, C., van der Burgt, M. (2008). *Gasification*, 2nd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, pp. 3, 12.

Klass, D. L. (1998). *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*. Academic Press, pp. 30, 233, 239, 276–277.

Knoef, H. A. M. (Ed.). (2005). *Handbook Biomass Gasification*. BTG Publisher, Enschede, The Netherlands, pp. 32, 239–241.

Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/65 https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng

IEA-The International Energy Agency www.iea.org/about

DYNAMICS OF THE HEIGHT OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER AND ATMOSPHERIC AEROSOL IN SOFIA AND KRUMOVGRAD IN AUGUST 2024

Nikolay Kolev [1], Plamen Savov [1], Maya Vatzkitcheva [1], Maria Kolarova [2], Lambo Lambov [3]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nic_k@mgu.bg
[2] National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH)
[3] DPM Metals Krumovgrad, Bulgaria

ABSTRACT. The article presents results from an experimental aerosol measurement conducted in Sofia and Krumovgrad *over* typical summer days in August 2024. Data for aerosol concentrations measured by laser particle counters and the combined effect of the diurnal variation of the atmospheric boundary layer height, meteorological parameters, and hourly variations on the concentrations of the aerosol fractions are discussed. WRF-GDAS and HYSPLIT models were used to determine the height of the atmospheric boundary layer (ABL) and to track the air mass transfer. The atmospheric boundary layer is the part of the troposphere that extends from the Earth's surface and ranges in height from a few hundred meters to 1–2 km. Exchange processes within the ABL include friction, evaporation and condensation, heat exchange, pollutant emissions, and changes in airflow characteristics influenced by surface roughness and terrain. During the experiment, the ABL height varied between 1,500 and approximately 3,000 meters, reflecting the specific orography of the regions, climatic and meteorological factors, and the synoptic situation. The measured concentrations of PM10 in Sofia ranged from 1 to 20 µg/m3, and in the Krumovgrad region between 1 - 10 µg/m3, which can be considered as background for the study areas.

Key words: atmospheric boundary layer (ABL), particulate matter concentrations, WRF-(GDAS) and HYSPLIT models

ДИНАМИКА НА ВИСОЧИНАТА НА АТМОСФЕРНИЯ ГРАНИЧЕН СЛОЙ И АТМОСФЕРНИЯ АЕРОЗОЛ В СОФИЯ И КРУМОВГРАД ПРЕЗ АВГУСТ 2024

Николай Колев [1], Пламен Савов [1], Майя Вацкичева [1], Мария Коларова [2], Ламбо Ламбов [3]
[1] Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
[2] Национален институт по метеорология и хидрология (НИМХ)
[3] ДПМ Металс Крумовград, България

РЕЗЮМЕ. В статията са представени резултати от експериментална кампания на аерозолни измервания, проведена в София и Крумовград от типични летни дни на 2024 г. Обсъждат се данни от лазерни броячи на частици и комбинирания ефект от развитието на височината на атмосферния граничен слой, метеорологичните параметри и дневните вариации в концентрациите на аерозолните фракции. За определяне на височината на атмосферния граничен слой (АГС) и за проследяване на преноса на въздушни маси са използвани моделите WRF-GDAS и HYSPLIT. Атмосферният граничен слой е част от тропосферата, която започва от земната повърхност и се изменя от няколко стотин метра до 1-2 км. Процесите на обмен в АГС включват триене, изпарение и кондензация, топлообмен, емисии на замърсители и промени в характера на въздушния поток, повлияни от грапавостта и релефа. По време на експеримента височина на АГС варира от 1500 до около 3000 метра, което отразява специфичната орография на районите, климатичните и метеорологични фактори, както и синоптичната обстановка. Измерените концентрации на PM10 в София са от 1 до 20 µg/m^3, а в района на Крумовград между 1 - 10 µg/m^3, което можем да определим като фоново за районите на изследването., варира от 1500 до 3000 м през различните експериментални дни.

Ключови думи: атмосферен граничен слой (АГС), концентрации на частици, модели WRF-(GDAS) и HYSPLIT

Въведение

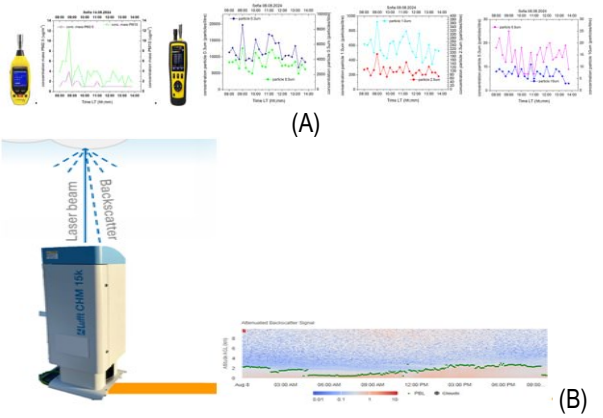
Изследване на атмосферния аерозол и височината на атмосферния граничен слой в София и Крумовград през юли 2017 г е продължено в настоящото проучване през лятото на 2024 г. Височината на атмосферния граничен слой (АГС) оказва влияние върху концентрацията на фините прахови частици (ФПЧ), като с повишаване на височината на АГС концентрацията на PM10 бързо намалява. Измерените нива на масовата концентрация на ФПЧ10 в диапазона 10 µm за района на София са 4 – 5 пъти по високи от концентрациите на ФПЧ10 за района на Крумовград през юли 1917 г. Височината на Атмосферният граничен слой над Крумовград по моделни данни е по висока от височината на АГС над София за същите дни с 200-300 метра, като това се дължи вероятно на по-южното разположение на града спрямо София и по-високите температури на въздуха, които създават по-висок слой на АГС. (Kolev et al., 2025). София и Крумовград предлагат интересни контрасти: София (градска среда с голямо натоварване на фините прахови частици) и Крумовград (регион с по-слабо индустриално влияние, но характерен с дългосрочни екологични проучвания около минен обект), което позволява да се анализират различни аерозолни източници и тяхното поведение в АГС. В диапазона 10–30 км, (често определян като мезомащабен), дневните изменения в структурата на АГС (напр. височина на смесващия слой) имат водеща роля, докато при по-големи разстояния (над 100 км) от значение са синоптичните процеси. (Stull, 1988; Oke, 1987). (Savov et al., 2021). Прахта (фините прахови частици – ФПЧ) е един от основните замърсители на въздуха, като основните ѝ източници са промишлеността, транспорта и енергетиката. (Kolev et al., 2019, 2024). Главна част от аерозоли остават в тропосферата, като 80% от тях се локализира на височината на атмосферния граничен слой. Основните параметри определящи поведението на праха са: концентрация, размери, форма, специфично тегло и химичен състав на дисперсната фаза. ФПЧ10 и ФПЧ2.5 се емитират главно от индустрията и от автомобилния транспорт (Vatzkitcheva et al., 2020). Изследванията в Крумовград в близост до мината „Ада тепе“ имат и друг

интересен аспект, подобна мина е съществувала и в древността приблизително през бронзовата епоха (15 век) преди Христа, като добиваното злато е една много интересна хипотеза за древния рудодобив (Marinova K. et al., 2018, Tomova, M., et al., 2025, Kisyov At. et al., 2025).

Експериментални данни

Измерванията са проведени от 06.08.2024 до 14.08.2024 г. в районите на гр. София и гр. Крумовград. Масовата концентрация на ФПЧ е измерена с преносими лазерни броячи на частици BQ20 – Trotec (Фиг. 1А), измерващи в два канала: **канал 1** (0 – 2,5 µm) и **канал 2** (2,5 - 10 µm), обозначени по-нататък в текста съответно като PM2,5 и PM10. PC200 – Trotec (Фиг. 1А) - брояча на частици измерва запрашеността с помощта на 6 входящи канала за измерване на прахови частици с големина 0.3µm, 0.5µm, 1.0µm, 2.5µm, 5.0µm и 10.0µm.

Измервания с облакомер Ceilometer (CHM 15k), (Фиг. 1.В), разположен в ИЕ-БАН в София със спецификации: източник на светлина - Nd:YAG лазер с дължина на вълната 1064 nm за определяне на височината на АГС (Dreischuh et al., 2016; Peshev et al., 2023).



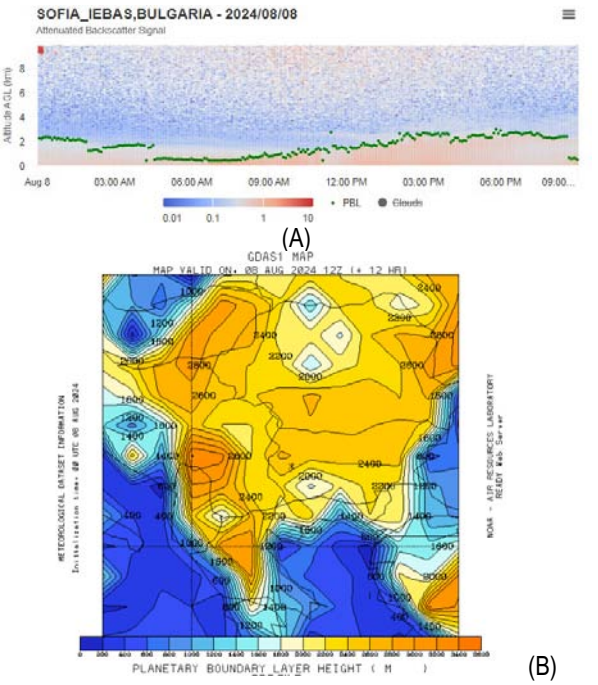
Фиг. 1. Уреди за измерване: А) лазерни броячи на ФПЧ; В) сейлометър CHM 15k (облакомер);

В настоящото проучване използвахме Ceilometer Lufft CHM 15k, който използва LiDAR (Light Detection and Ranging) технология, както е показано на Фиг. 1В. Това устройство излъчва кратки светлинни импулси от микрочип с твърдотелен лазер, които се разпръскват от частици като аерозоли, водни капчици и други молекули в атмосферата. Частта от отразената светлина, наречена обратно разсейване, се анализира от Ceilometer. Чрез измерване на времето, необходимо на лазерните импулси да се върнат, устройството определя разстоянието до разсейващите частици. Профилът на височината на отразените сигнали след това се използва за получаване на интензитета на обратното разсейване, който с помощта на валидна калибровъчна константа се преобразува в коефициента на отслабено обратно разсейване. От тази информация се определят различни атмосферни параметри, включително височината на облаците и разпределението на аерозолния слой. Тясната честотна лента на лазера позволява поставянето на оптичен филтър от приблизително 1 nm пред детектора, което значително намалява фоновия шум. Използва се осредняване на сигнала за подобряване на съотношението сигнал/шум, което е от решаващо значение за измерванията базирани на лидар, и за получаване на подробни аерозолни слоеве и определяне на височината на атмосферния граничен слой (АГС). Метеорологичните параметри са измервани със станция PCE-FWS 20-1, позволяваща точно измерване на посоката и скоростта на вятъра, на температурата и относителна влажност на въздуха на височина от земята 1м. Използвани са моделите HYSPLIT и WRF-GDAS, разработени от ARL-NOAA, с помощта на които се определя по моделни данни височината на АГС за двата града и се сравнява с резултатите получени от сейлометъра.

Дискусия и анализ на данните

Данните от измерванията и анализа са за периода 06.08.2024 - 14.08.2024г., като са разгледани по задълбочено два дни с подходящи типично летни условия.

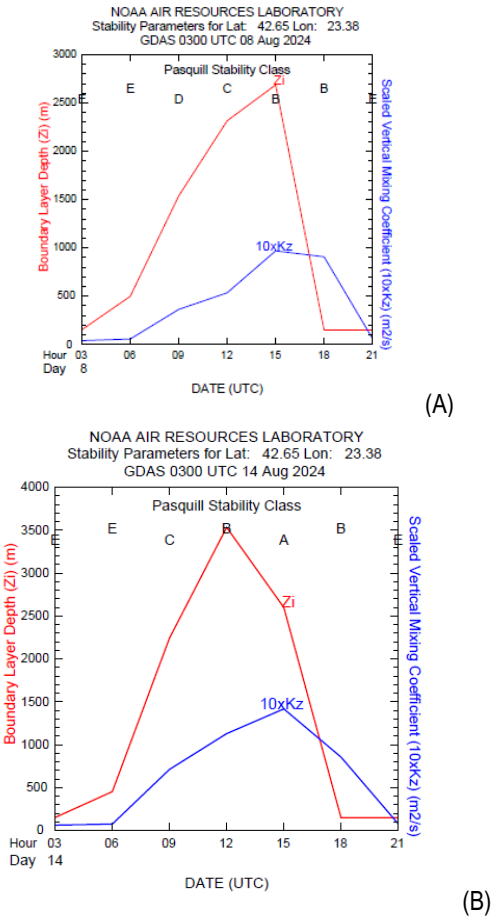
На фигура 2 е дадена височината на Атмосферният граничен слой в района на София (42.65N, 23.38E), Институт по Електроника, БАН определена от данни на облакомер Ceilometer (CHM 15k), за ясен слънчев ден със скорост на вятъра 1-2 m/s. На (Фиг. 2.А) от 08.08.24 височина на АГС в 15:00 PM (15 UTC + 3 часа локално време) е около 2600 m. На (Фиг. 2В) от 08.08.24 височината на АГС за София е около 2400 m – GDAS1 MAP – NOAA-ARL – Ready Web Server.



Фиг. 2. Сигнал от облакомер CHM 15к, получени на 08.08.2024 (А) в София и (В) карта на развитието на Атмосферният Граничен слой за България (GDAS1 MAP) на 08.08.2024 по данни на GDAS1 – HYSPLIT – NOAA-ARL-Ready Web Server

На фиг. 3 са представени височините на Атмосферния граничен слой по моделни данни (WRF-GDAS американски модел, разработен от ARL- NOAA) за два избрани дни в района на град София. Височината на АГС за 08.08.24

достига 2400m за 12:00 UTC (15:00 LT), а за 14.08.24 максималната височина на АГС е 3500m. Между моделните данни и данните получени за височина на АГС от облакомер Ceilometer (CHM 15k), има а разлика от 200 m, което е грешка в рамките на 10%, добър резултат при ясни слънчеви дни без вятър.

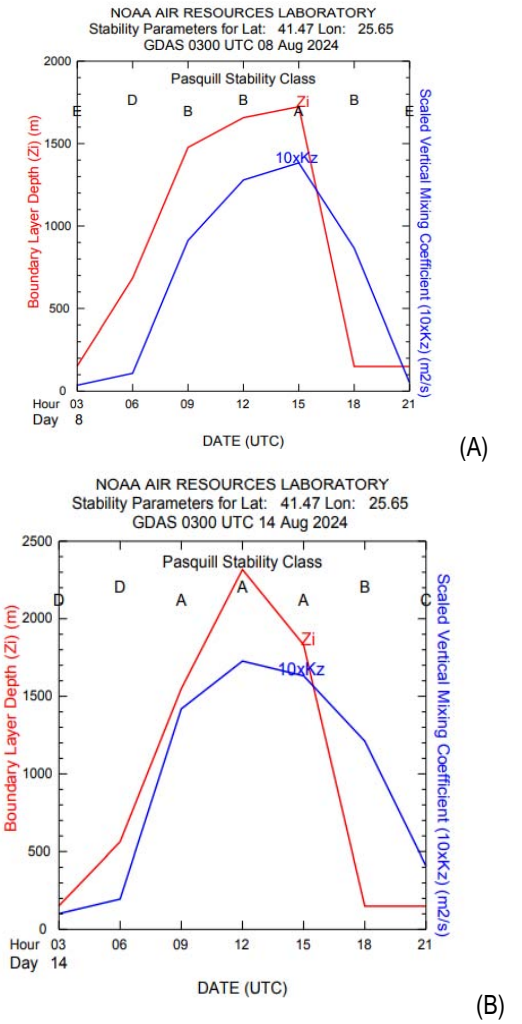


Фиг. 3. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС (Zi) на 08.08.2024 (A), 14.08.2024 (B), за (42.65N, 23.38E) София

На фигура 4 са представени моделни резултати за дневния ход на височината на атмосферния граничен слой (Zi) в Крумовград (41.47N, 25.65E) по моделни данни за двата дни на месец август 2024. Максималната височина на АГС на 08.08.2024 (Фиг. 4A) е около 1700 m в 12:00 UTC (15:00 LT), а на 14.08.2024 (Фиг. 4B) максимална височина на АГС в 12:00 UTC (15:00 LT) достига 2300 m.

Максималната височина на АГС в 12 UTC (15:00 LT) по данни от WRF-GDAS, с помощта на които се определя по моделни данни височината на АГС в София (42.65N, 23.38E) и Крумовград (41.47N, 25.65E) на 08.08.24 е съответно 2400m за София и 1700m за Крумовград.

На 14.08.24 височина на АГС за София е 3500m и 2300m за Крумовград. Отбелязват се по-високи стойности на височината на АГС за София в сравнение с Крумовград. За тези дни са измерени и едни от най-високите максимални температури в страната - 35°C и 33°C за София и Крумовград (горещници) (Draxler, 1979; Draxler, et al. 1998; Stein et al., 2015).



Фиг. 4. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС на 08.08.2024 (A), 14.08.2024 (B), (41.47N, 25.65E) Крумовград

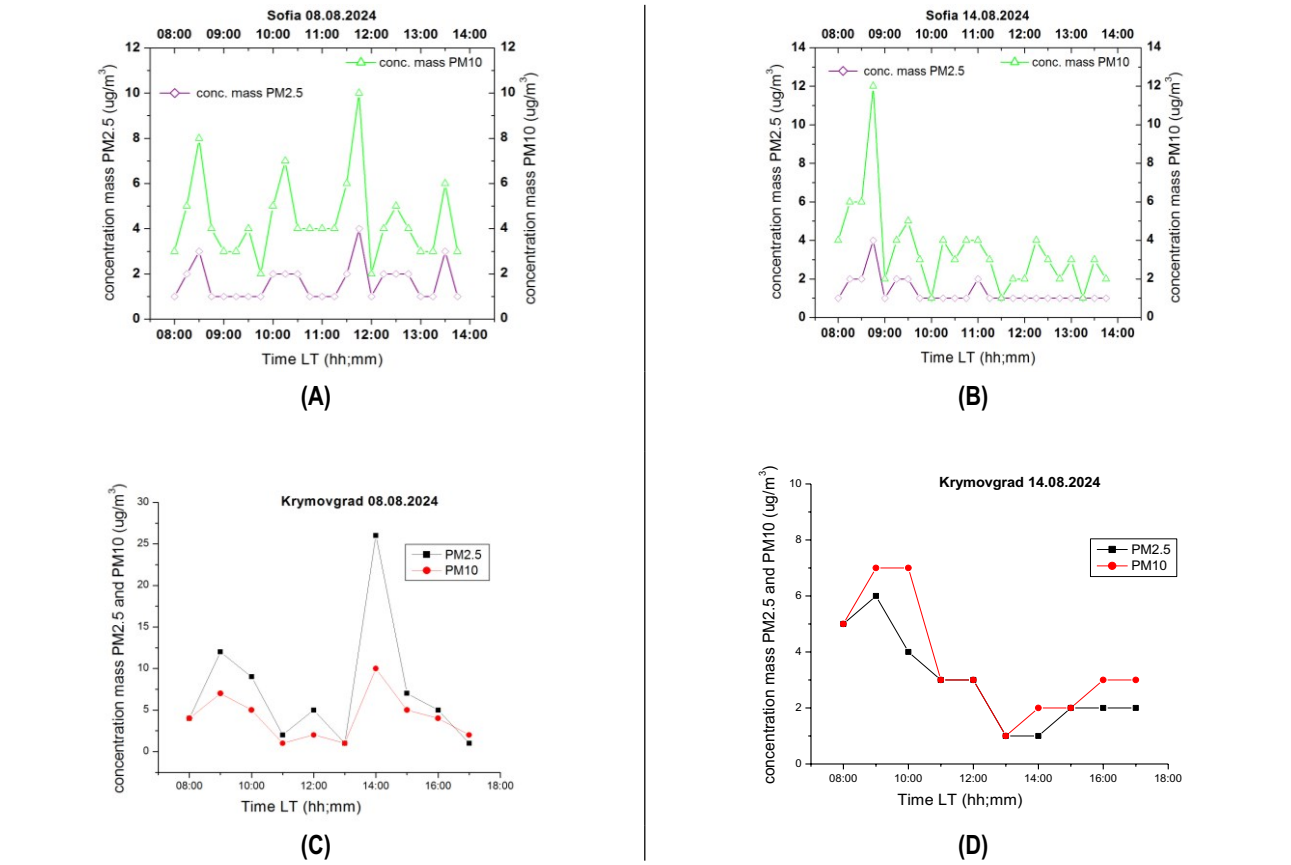
Измерените на 8 и 14 август концентрации на ФПЧ (PM2,5 и PM10) за София и Крумовград са представени на фиг. 5 и фиг. 6.

На фиг. 5 е представен дневния ход на масовата концентрация на ФПЧ с размери 10 μm и 2.5 μm, за София (A) и (B) и за Крумовград (C) и (D).

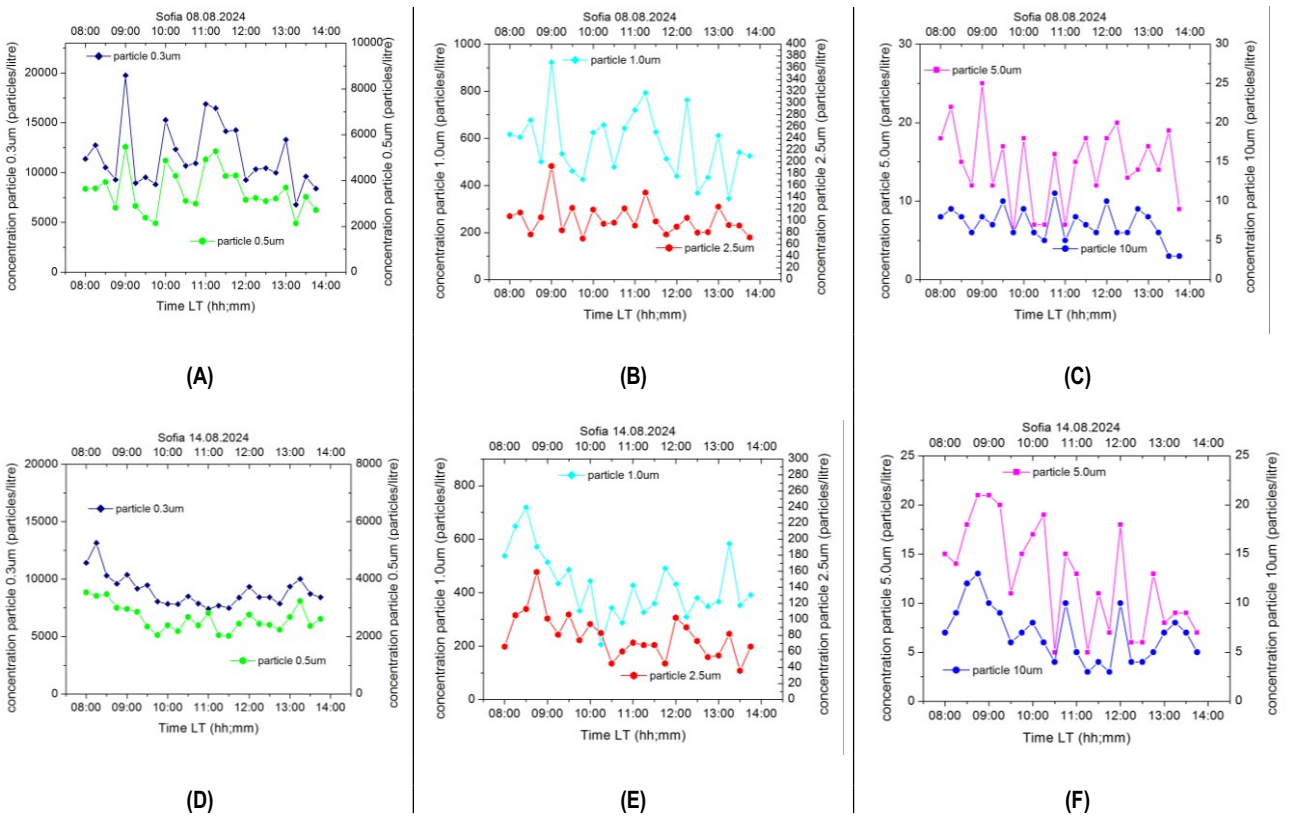
Измерената концентрацията на (PM10) за София на 08.08.2024 варира в диапазона от 8-10 μg/m^3 в 09:00 LT до 3 μg/m^3 в 12:00 LT, и от 12 μg/m^3 сутрин до 2 μg/m^3 следобед на 14.08.2024. Концентрацията на (PM2.5) е от 3 μg/m^3 сутрин до 1 μg/m^3 следобед за 08.08.2024 и от 4 μg/m^3 сутрин до 1 μg/m^3 на 14.08.2024.

Концентрацията на PM10 за Крумовград на 08.08.2024 е в диапазона от 10 μg/m^3 до 1 μg/m^3, а на 14.08.2024 е от 6 μg/m^3 сутрин до 1μg/m^3 следобед. Концентрацията на (PM2.5) и от 26 μg/m^3 сутрин до 2 μg/m^3 следобед за 08.08.2024, а на 14.08.2024 от 6 μg/m^3 до 1 μg/m^3 .

На фиг. 6 е представена измерената в София аерозолна концентрация на частици с размери 0.3μm, 0.5μm, 1.0μm, 2.5μm, 5.0μm и 10.0μm - на 08.08.2024 (A), (B), (C) и на 14.08.2024 (D), (E), (F).



Фиг. 5. Концентрация фини прахови частици PM2.5 и PM10 на 08.08.2024 (A), (C); 14.08.2024 (B), (D), в София и Крумовград

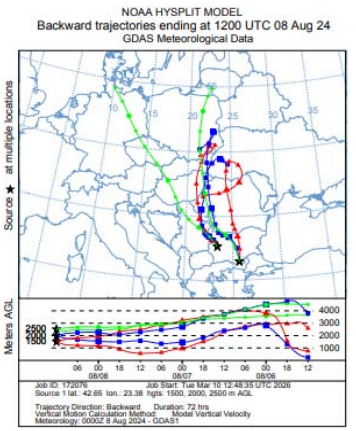


Фиг. 6. Концентрация фини прахови частици за размери от 0.3μm, 0.5μm, 1.0μm, 2.5μm, 5.0μm и 10.0μm на 08.08.2024 (A), (B), (C) и 14.08.2024 (D), (E), (F) в София

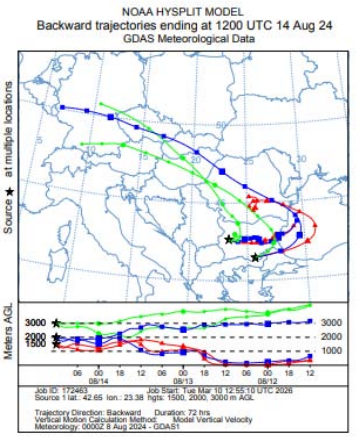
Концентрацията на 08.08.2024 на 0.3μm-0.5μm за София варира в диапазона от 20000-7000 particle/litre за 0.3μm и 12000-5000 particle/litre за 0.5μm на 08.08.2024, Концентрацията на 1.0μm-2.5μm за София варира от 900-300 particle/litre за 1.0μm и 450-200 particle/litre за 2.5μm. Концентрацията на 5.0μm-10.0μm за София варира от 25-10 particle/litre за 5.0μm и 10-3 particle/litre за 10.0μm.

Концентрацията на 14.08.2024 на 0.3μm-0.5μm за София варира в диапазона от 13000-10000 particle/litre за 0.3μm и 9000-6000 particle/litre за 0.5μm на 14.08.2024, Концентрацията на 1.0μm-2.5μm за София варира от 700-200 particle/litre за 1.0μm и 500-100 particle/litre за 2.5μm. Концентрацията на 5.0μm-10.0μm за София варира от 20-5 particle/litre за 5.0μm и 12-3 particle/litre за 10.0μm

Бройната концентрация на прахови частици с размери 0.3μm, 0.5μm, 1.0μm, 2.5μm, 5.0μm и 10.0μm на 08.08.2024 и на 14.08.2024 в София добре корелира с височината на АГС за двата дни и съответно за втория ден концентрацията е по-ниска от първия, докато височината на АГС за втория ден е по-висока от височината на първия експериментален ден. Потвърждава се тезата че височината на атмосферния граничен слой оказва силно влияние върху концентрацията на финни прахови частици.



(A)



(B)

Фиг. 7. Обратни траектории на въздушните маси, изчислени от модела HYSPLIT, завършващи над София и над Крумовград на: 08.08.2024 (A), 14.08.20247 (B), на височини 1500, 2000,2500 и 3000 m

На фигура 7 са представени обратни траектории на въздушните маси, изчислени от модела HYSPLIT, завършващи над София и над Крумовград на: 08.08.2024 (A), 14.08.2024 (B), на височини 1500, 2000, 2500 и 3000 m. Преноса на въздушните маси за 72 часа от север, Полша, Чехия, Унгария, Румъния и България, а за 14.08.2024 е от север и северзапад от, Германия, Чехия, Унгария, и от североизток – над Румъния, Черно море и България.

Температурата е в интервала от 22°C до 36°C, а относителната влажност е от 55% до 11% за София на 08.08.2024, а за Крумовград – от 16°C до 33°C, относителната влажност е от 50% до 17%.

6–8.VIII: В първия ден от периода през Балканския полуостров преминава барична долина и лежащият в нея студен атмосферен фронт. На 7.VIII след изтеглянето на баричната долина от запад временно израства баричен гребен и се установява предимно слънчево време. След изясняването в котловините и по високите полета на 8.VIII дневните температури се повишават. В периода 11–14.VIII: Баричното поле е антициклонално, а времето е предимно слънчево и горещо. В края на периода налягането се понижава и полето се трансформира в размито циклонално. (Месечен бюлетин на НИМХ, август 2024).

Скоростта на вятъра е между 1-3 m/s, като преобладава вятъра от северна посока.

Заключение

Това изследване представя резултати от комплексни експерименти в София и Крумовград за оценка на връзката на АГС и оптичните характеристики на атмосферния аерозол с помощта на устройства за дистанционно наблюдение, измервания на място и моделни данни. За двата града наблюдаваната височина на АГС варира от 2300 до 3500 m за експерименталните дни. По време на експерименталните изследвания измерените концентрации на частици (PM10) в София са от 10 до 3 μg/m3. За района на Крумовград те са между 6 - 1 μg/m3, които могат да се разглеждат като фоново ниски, измерванията са направени по време на експлоатацията на мината „Ада тепе“ 08.08.2024 и 14.08.2024. Резултатите от експеримента в София и Крумовград през месец юли 2017 г. и август 2024 показват връзката на АГС и микрофизични характеристики на атмосферния аерозол. Височината на атмосферния граничен слой оказва силно влияние върху концентрацията на финни прахови частици, като с повишаване на височината на АГС концентрацията на PM10 бързо намалява. Измерените нива на масовата концентрация на фините прахови частици в диапазона PM10 за района на София са 1.5 пъти по високи от концентрациите на ФПЧ10 за района на Крумовград. Височината на Атмосферният граничен слой над София по моделни данни е по висока от височината на АГС над Крумовград за същите дни с около 700 метра, като това се дължи вероятно на по-високите температури на въздуха, които генерират по-висок слой на АГС. (горещници август 2024г).

Изследванията в Крумовград в близост до мината „Ада тепе“ имат и друг аспект, подобна мина е съществувала и в древността приблизително през бронзовата епоха (15век) преди Христа, древния рудодобив по тези места е с много богата история.(Marinova K. et al., 2018, Tomova, M., et al., 2025, Kisyov At. et al., 2025)

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на: Дог. ГПФ №261, на 30.03.2026 г. НИС-МГУ „Апробиране на методика за Мултиканален анализ на повърхностни вълни (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) и определяне на някои геоинженерни параметри с помощта на геофизични методи“, Ръководител: доц. д-р Мая Томова - катедра „Приложна геофизика“, научен колектив: проф. д-р П. Савов, доц. д-р Майя Вацкичева, доц. д-р Николай Колев, гл. ас. д-р Атанас Кисьов, гл. ас. д-р Християн Цанков, ас. Богдана Миленкович. Авторите изказват благодарност на NOAA Air Resources Лаборатория (ARL) за предоставяне на моделите WRF-GDAS и HYSLIT, използвани в тази публикация. Авторите изказват благодарност на компанията ДПМ Металс Крумовград, България за предоставените данни, информация и подкрепата на мината „Ада тепе“ Крумовград. Авторите изказват благодарност още на Tanja Dreischuh and ACTRIS BG, part of the National Roadmap for Research Infrastructure, Grant Agreement No. 871115 (ACTRIS IMP).

Литература

Draxler, R. R. (1979). Estimating vertical diffusion from routine meteorological tower measurements, *Atmospheric Environment, 13* (11) 1559-1564.

Draxler, R.R. & Hess, G.D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Australian meteorological magazine*, *47* (4), 295-308.

Dreischuh, T., Grigorov, I., Peshev, Z., Deleva, A., Kolarov, G. & Stoyanov, D. (2016). Lidar Mapping of Near-Surface Aerosol Fields, *Aerosols Science and Case Studies*, 85-110.

Peshev, Z., Chaikovsky, A., Evgenieva, Ts., Pescherenkov, V., Vulkova, L., Deleva, A. & Dreischuh, T. (2023). Combined Characterization of Airborne Saharan Dust above Sofia, Bulgaria, during Blocking-Pattern Conditioned Dust Episode in February 2021, *Remote Sens*., *15,* 3833, 1-33.

Kolev, N., Savov, P., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D., Vladkova, B. & Toncheva, S. (2019). The impact of outdoor mining activities on atmospheric air quality in nearby settlements. *J. of Mining and Geological Sciences, 62* (2) 45-49.

Kolev, N., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D., Gogureva, A. & Atanasov, A. (2024). Analysis of the Atmospheric Air Quality over the Sofia - East Thermal Power Plant, *J. of Mining and Geological Sciences, 67*, 42-47, ISSN 2738-8816 (online).

Kolev, N., Savov, Pl., Vatzkitcheva, M., Kolarova, M., Lambov, L., Vasilev, Zh (2025). Measurement of Atmospheric Aerosol and Atmospheric Boundary Layer Height in Sofia and Krumovgrad in July 2017, *J. of Mining and Geological Science,68*, 144-149, ISSN 2738-8816 (online)

Kisyov At., M. Tomova, and Iv. Koprev, (2025) Geophysical Methods for Optimizing Mining Waste Management, EnviroRISKs 2024, LNNS 883, pp. 204–209, 2025, https://doi.org/10.1007/978-3-031-74707-6_22

Marinova K., St. Pristavova, (2018) Petrographic Investigation of Ceramic Artifacts from the Thracian Sanctuaries in the Eastern Rhodopes, *J. of Mining and Geological Sciencep*, Vol. 61, Part I, Geology and Geophysics, 23-29.

Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. London: Methuen, 435 pp.

Savov, P., Kolev, N., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D. & Vladkova, B. (2021). Urban parks and their relation to air pollution. *Annual of University of mining and geology "St. Ivan Rilski" – Sofia, 64*, 81-86.

Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Kolev, N., Savov, P. (2020). A study of horizontal distribution pattern of particulate pollutants near a highway, *Annual of University of mining and geology "St. Ivan Rilski" – Sofia, 63*, 113-117.

Tomova, M., Kisyov, At. (2025) Geophysical Evaluation of Water Drainage and Containment in a Mine Waste Storage Facility:a Comparative ERT Study, *J. of Mining and Geological Sciencep,68*, 61-65, ISSN 2738-8816 (online)

Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J B., Cohen, M.D. & Ngan, F. (2015). NOAA’S HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *96* (12) 2059-2077.

Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publisher, 670 pp.

НИМХ (2024). Месечен хидрометеорологичен бюлетин на НИМХ, август 2024, София.

OPTIMIZATION OF DIGITAL MODELING METHODS IN MINING BASED ON GEOSTATISTICAL AND GIS APPROACHES

Maryna Kunytska, Oleksand Yanovych, Sergii Kalchuk

State University "Zhytomyr Polytechnic", 10005 Zhytomyr, E-mail: km_kms@ztu.edu.ua; km_yuoa@ztu.edu.ua, kgt_ksv@ztu.edu.ua

ABSTRACT. The development of modern mining enterprises requires the implementation of advanced digital technologies to improve the accuracy, efficiency and safety of production processes. One of the key directions is the optimization of digital modelling methods based on geostatistical analysis and geographic information systems (GIS), which allow integrating heterogeneous spatial data and improving decision-making in mining operations. The purpose of this study is to optimize digital modelling methods in mining based on geostatistical and GIS approaches. The research is based on the analysis of modern technologies used in deposit geometrization, including 3D modelling, GIS, machine learning methods and digital twins. The methodology includes the use of geostatistical methods such as kriging and inverse distance weighting (IDW), GIS-based spatial analysis, and integration of data obtained from UAV surveys, GNSS measurements and geological exploration. A comparative analysis of software products used for digital modelling in mining was also carried out. The results show that the integration of GIS technologies and geostatistical methods significantly improves the accuracy of spatial modelling and allows optimization of mining processes. It was determined that the use of machine learning algorithms enhances forecasting capabilities and supports real-time decision-making. In addition, the analysis of digitalization costs demonstrated the importance of a phased implementation strategy to ensure economic efficiency. The proposed integrated approach to digital modelling allows improving the quality of resource estimation, optimizing production planning and reducing environmental risks. The obtained results confirm the effectiveness of applying combined geostatistical and GIS approaches for the development of modern mining systems.

Key words: digital modelling, mining, GIS, geostatistics, optimization.

ОПТИМИЗАЦИЯ НА МЕТОДИТЕ ЗА ЦИФРОВО МОДЕЛИРАНЕ В МИННОТО ДЕЛО, БАЗИРАНИ НА ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИ И ГИС ПОДХОДИ

Марина Куницка, Олександ Янович, Сергей Калчук

Държавен университет "Житомирска политехника", 10005 Житомир

РЕЗЮМЕ. Развитието на съвременните минни предприятия изисква внедряването на съвременни цифрови технологии за подобряване на точността, ефективността и безопасността на производствените процеси. Едно от ключовите направления е оптимизирането на методите за цифрово моделиране, базирани на геостатистически анализ и географски информационни системи (ГИС), които позволяват интегрирането на хетерогенни пространствени данни и подобряването на вземането на решения в минните операции. Целта на това изследване е да се оптимизират методите за цифрово моделиране в минното дело, базирани на геостатистически и ГИС подходи. Изследването се основава на анализ на съвременните технологии, използвани в геометризирането на находищата, включително 3D моделиране, ГИС, методи за машинно обучение и цифрови близнаци. Методологията включва използването на геостатистически методи като кригинг и обратно претегляне на разстояние (IDW), пространствен анализ, базиран на ГИС, и интегриране на данни, получени от проучвания с безпилотни летателни апарати, GNSS измервания и геоложки проучвания. Извършен е и сравнителен анализ на софтуерни продукти, използвани за цифрово моделиране в минното дело. Резултатите показват, че интегрирането на ГИС технологии и геостатистически методи значително подобрява точността на пространственото моделиране и позволява оптимизиране на минните процеси. Установено е, че използването на алгоритми за машинно обучение подобрява възможностите за прогнозиране и поддържа вземането на решения в реално време. Освен това, анализът на разходите за цифровизация демонстрира значението на поетапната стратегия за внедряване, за да се гарантира икономическа ефективност.
Предложеният интегриран подход към цифровото моделиране позволява подобряване на качеството на оценката на ресурсите, оптимизиране на планирането на производството и намаляване на екологичните рискове. Получените резултати потвърждават перспективността на прилагането на комбинирани геостатистически и ГИС подходи за разработването на съвременни минни системи.

Ключови думи: цифрово моделиране, минно дело, ГИС, геостатистика, оптимизация.

Introduction

The modern mining industry is undergoing rapid digital transformation driven by the need to improve the efficiency, accuracy, and safety of production processes. The increasing complexity of geological conditions and the growing demand for mineral resources require the use of advanced technologies for data processing, analysis, and modelling (Carvalho, 2017; Choi et al., 2020).

One of the key tasks in mining is the accurate geometrization of mineral deposits, which provides reliable information about the spatial distribution of resources and serves as a basis for effective planning and management of mining operations (Hustrulid et al., 2013). Traditional methods are often limited in their ability to process large volumes of heterogeneous data and ensure high accuracy.

In recent years, digital modelling based on geographic information systems (GIS) and geostatistical approaches has become widely used in mining practice. These technologies allow the integration of various data sources, including geological exploration, geodetic measurements, and remote sensing, into a unified digital environment.

Despite significant progress, there remains a need to optimize digital modelling methods to improve their accuracy, reliability, and efficiency. Therefore, the application of integrated geostatistical and GIS approaches is a relevant scientific and practical task in modern mining.

Theoretical part and methodology

Digital modelling in mining is based on the integration of various data sources, including geological, geodetic, and remote sensing data (Choi et al., 2020; Vangu et al., 2023). Geographic information systems (GIS) provide tools for spatial data management, visualization, and analysis, enabling the creation of comprehensive three-dimensional models of mineral deposits (Choi et al., 2020).

Geostatistical methods play a crucial role in modelling the spatial distribution of geological parameters. Among the most commonly used methods are kriging and inverse distance weighting (IDW), which allow interpolation of data and improve the accuracy of resource estimation in conditions of spatial variability (Kim et al., 2018; Uyan & Dursun, 2021).

Modern digital technologies also include the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), GNSS measurements, and photogrammetric processing, which significantly increase the density and accuracy of spatial data (Kunytska et al., 2023). The integration of these technologies into GIS environments allows for efficient data processing and visualization.

In addition, machine learning methods are increasingly used for analysing large datasets, identifying hidden patterns, and forecasting changes in geological conditions. The concept of digital twins enables real-time monitoring and simulation of mining systems, which improves decision-making and operational efficiency.

Thus, the integration of GIS technologies, geostatistical methods, and modern digital tools forms the theoretical basis for optimizing digital modelling methods in mining.

Results and discussion

The analysis of modern digital modelling methods in mining demonstrates that the integration of GIS technologies with geostatistical approaches (Choi et al., 2020; Uyan & Dursun, 2021) significantly improves the accuracy and reliability of spatial models (Fig. 1).

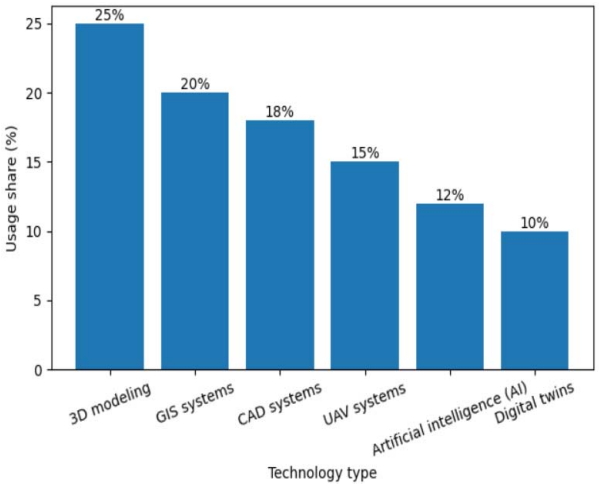


Fig. 1. Distribution of the application of key digital technologies in mining

It was established that geostatistical methods such as kriging and inverse distance weighting (IDW) provide a higher level of accuracy in modelling the spatial variability of mineral deposits, especially under conditions of heterogeneous geological structures. These methods allow more precise interpolation of geological parameters and reduce uncertainty in resource estimation.

The use of GIS technologies ensures efficient integration, processing, and visualization of heterogeneous data obtained from various sources, including geological exploration, UAV surveys, and GNSS measurements (Vangu et al., 2023). This integration significantly enhances the quality of spatial analysis and supports more informed decision-making in mining operations. (Uyan & Dursun, 2021)

The results also indicate that the application of machine learning algorithms improves predictive capabilities and enables the identification of hidden patterns in geological data. This contributes to the optimization of mining processes and allows real-time monitoring and adjustment of production parameters.

At the same time, the analysis of digitalization processes has shown that the implementation of digital technologies requires significant initial investments and careful planning of financial resources. The distribution of digitalization costs at different stages of implementation is presented in Fig. 2.

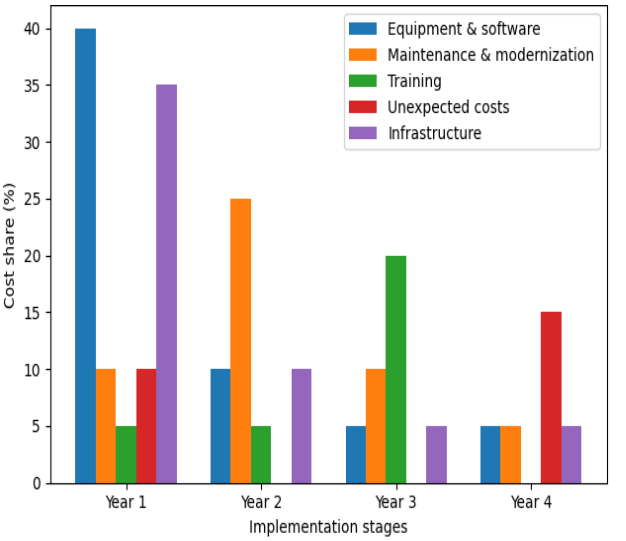


Fig. 2. Distribution of digitalization costs across different implementation stages

An important result of the study is the identification of key challenges in the implementation of digital technologies, including data heterogeneity, lack of standardized approaches, and shortage of qualified specialists (Fig. 3).

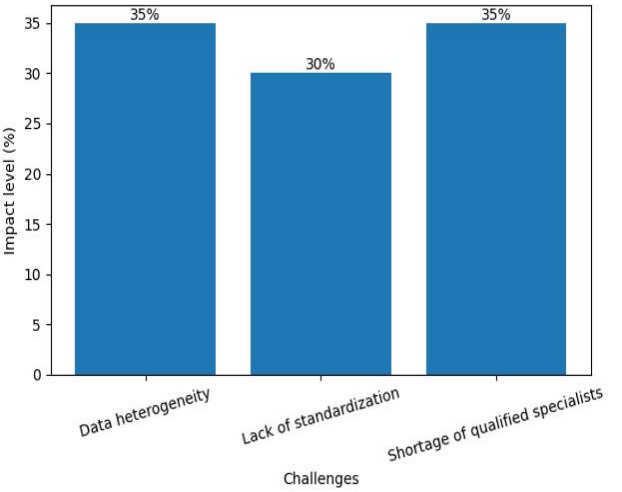


Fig. 3. Key challenges in the implementation of digital technologies in mining

Despite these challenges, the advantages of digital modelling significantly outweigh the limitations, providing improved accuracy, operational efficiency, and environmental sustainability of mining enterprises.

The obtained results confirm that the integrated use of GIS technologies and geostatistical methods is an effective and perspective approach for optimizing digital modelling processes and improving the overall performance of mining systems

Conclusion

The conducted study confirms that the optimization of digital modelling methods based on geostatistical and GIS approaches is an effective way to improve the efficiency and accuracy of mining operations.

It was established that the integration of GIS technologies with geostatistical methods such as kriging and inverse distance weighting (IDW) significantly enhances the reliability of spatial modelling and reduces uncertainty in resource estimation. The application of machine learning algorithms further improves predictive capabilities and supports real-time decision-making.

The analysis of digitalization processes demonstrated that despite the need for significant initial investments, the implementation of digital technologies provides substantial advantages, including improved operational efficiency, better resource management, and reduced environmental risks.

Thus, the integrated use of GIS, geostatistical methods, and modern digital technologies represents a promising direction for the development of mining systems and the sustainable use of mineral resources.

References

Carvalho, F.P. (2017). Mining industry and sustainable development: time for change. *Food Energy Secur.* 2017, *6*, 61–77. https://doi.org/10.1002/fes3.109

Choi, Y., Baek, J., Park, S. (2020). Review of GIS-based applications for mining: Planning, operation, and environmental management. *Applied Sciences*, *10*(7), 2266. https://doi.org/10.3390/app10072266

Choi, Y.; Park, H. D.; Sunwoo, C. (2008). Flood and gully erosion problems at the Pasir open pit coal mine, Indonesia: A case study of the hydrology using GIS. Bull. Eng. Geol. Environ. 2008, 67, 251–258. https://doi.org/10.1007/s10064-008-0131-8

Grenon, M. (2011). Slope orientation assessment for open-pit mines using GIS-based algorithms. *Computers & Geosciences, 37,* 1413–1420. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.12.006 https://www.isprs.org/proceedings/xxxvii/congress/1_pdf/41.pdf

Hustrulid, W.A., Kuchta, M., Martin, R. K. (2013). Open Pit Mine Planning and Design, CRC Press. [3rd ed.]. https://minemountain.in/assets/uploads/attachment_30661686823853.pdf

Kim, S. M.; Choi, Y.; Park, H. D. (2018). New Outlier Top-Cut Method for Mineral Resource Estimation via 3D Hot Spot Analysis of Borehole Data. *Minerals 2018, 8*, 348.https://doi.org/10.3390/min8080348

Kunytska M., Lunov A., Panasiuk A., Iskov S., Shlapak V. (2023). Digital simulation of open-pit mining organization system. *GEOMATE Journal*. Vol. 25(109).pp.197–204 https://geomatejournal.com/geomate/article/view/4064

Miao, F., Yan, M., Qi, X., Ye, C., Wang, B., Liu, R., Jianhua, C. (2008). Application of DInSAR and GIS for underground mine subsidence monitoring. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., 2008, Vol. 37*, pp. 251–255.

Uyan, M., Dursun, A. E. (2021). Determination and modeling of lignite reserve using geostatistical analysis and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(4), 312. DOI: 10.1007/s12517-021-06633-2

Vangu, G. M., Croitoru, A., Mitrache, M. & Dima, N. (2023). Design of a GIS database for surface mining. *Journal of Applied Engineering Sciences*, *13*(2), 289-296. DOI: 10.2478/jaes-2023-0037

EVALUATION OF GOLD AND COPPER DISTRIBUTION IN TECHNOLOGICAL PRODUCTS OF PORPHYRY COPPER ORE BENEFICIATION

Nikolay Nestorov, Mihail Petrov, Teodora Yankova, Irena Grigorova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: n.nestorov@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents the results of a comprehensive study on the content and distribution of copper and gold in technological products obtained from porphyry copper ores processing. Four consecutive sampling campaigns were carried out at ten sampling points within the regrinding and cleaner flotation circuits. Chemical characterisation of the samples was performed using ICP-AES, atomic absorption spectrometry, and fire assay, while particle size distribution was determined by sieve and sedimentation analysis. The results showed that copper and gold follow a common beneficiation trend, with the highest contents recorded in the froth products of the seventh cleaner flotation bank, averaging 24.03% Cu and 9.14 g/t Au. Comparison of the contents in products P1 and P9 showed that the gold content increased approximately 20-fold, whereas the corresponding increase for copper was about 17-fold. Gold also exhibited greater variability among the individual sampling campaigns. Size analysis revealed a higher relative proportion of gold in the <45 µm fraction. The results confirm the need for multiple sampling campaigns in order to achieve a reliable evaluation of gold distribution in the technological products.

Key words: porphyry copper ores, gold, copper, sampling, technological products.

ОЦЕНКА НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ЗЛАТОТО И МЕДТА В ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОДУКТИ ОТ ОБОГАТЯВАНЕ НА МЕДНОПОРФИРНИ РУДИ

Николай Несторов, Михаил Петров, Теодора Янкова, Ирена Григорова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата работа представя резултатите от комплексно изследване на съдържанието и разпределението на медта и златото в технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди. Проведени са четири последователни серии на опробване на десет точки от цикъла на досмилане и пречистна флотация. За химичното характеризиране на пробите са използвани ICP-AES, атомно-абсорбционна спектрометрия и тегловен пробирен анализ, а за определяне на разпределението по зърнометрични класи - ситов и седиментационен анализ. Установено е, че медта и златото следват обща тенденция на обогатяване, като най-високи съдържания са регистрирани в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация (средно 24,03% Cu и 9,14 g/t Au). Сравнението между съдържанията в продуктите П1 и П9 показва, че съдържанието на Au нараства приблизително 20 пъти, докато при Cu това съотношение е около 17. При златото е установена и по-голяма променливост на съдържанията в отделните серии на опробване. Зърнометричният анализ показва по-висок относителен дял на златото в класа <45 µm. Получените резултати потвърждават необходимостта от многократни серии на опробване за надеждна оценка на разпределението на златото в технологичните продукти.

Ключови думи: меднопорфирни руди, злато, мед, опробване, технологични продукти.

Въведение

При обогатяването на меднопорфирни руди все по-голямо значение придобива не само извличането на основния полезен компонент - медта, но и оценката на съпътстващите ценни компоненти, включително благородните метали (Aird et al., 2021; Agorhom et al., 2013). Порфирните находища представляват важен източник на мед, като тяхната икономическа стойност може съществено да нарасне при наличие на технологично извлекаеми количества злато и сребро (Aird et al., 2021). Разпределението на благородните метали в такива системи е тясно свързано със сулфидните минерални асоциации, типа на минерализацията и характера на хидротермалните изменения (Aird et al., 2021).

Флотационното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди не е еднозначно и зависи от конкретните минераложки особености на рудата и от условията на преработка. Bulatovic (1997) отбелязва променливия състав на медно-златните порфирни руди и необходимостта от избор на подходящи технологични решения в зависимост от характеристиките на конкретния тип руди. Allan и Woodcock (2001) посочват, че самородното злато и електрумът са най-често срещаните форми на златото в рудите, като тяхното извличане чрез флотация зависи съществено от физичното състояние на златните частици – размер, форма, състав и наличие на срастъци.

Наред с минераложките особености, решаващо значение за надеждната технологична оценка има представителното опробване. Dominy и колектив (2018) подчертават, че програмите за опробване при определяне извличането на златото трябва да бъдат представителни и целесъобразно разработени, като се прилага критична оценка на методите за вземане и подготовка на проби.

Lyman (2023) допълнително подчертава тази необходимост, като разглежда опробването на минерални технологични потоци като статистически процес, с множество източници на неопределеност - вариация на съдържанието във времето, различия в едрината и съдържанието на частиците, и такава свързана със самото опробване.

В по-широк геометалургичен контекст, в допълнение към класическите методи за опробване и лабораторен анализ, съвременните геофизични методи също могат да допринесат за по-пълното характеризиране на рудите, подлежащи на преработка. Както отбелязва Tomova и колектив (2025), електротомографията и други геофизични техники предоставят информация за пространствената изменчивост и вътрешната структура на минералните суровини, като по този начин допринасят за по-надеждна интерпретация на техните свойства. В този смисъл геометалургичният подход съчетава данни от различен характер с цел по-надеждна оценка на поведението на суровината при обогатяване и по-добро обосноваване на технологичните решения.

Blannin и колектив (2021) демонстрират, че дори при съвременните методи за количествен минераложки анализ (автоматизирана SEM-базирана минералогия) отчитането на статистическата неопределеност в практиката е рядко, и показват на примера на Au–Cu порфирно находище как недостатъчната представителност на извадката влияе върху количествените минераложки резултати.

Предвид изложеното, изследването на разпределението на златото и медта в продуктите от досмилане и пречистна флотация има значение както за текущия технологичен контрол, така и за обосноваване на връзката между минераложките характеристики, представителността на опробването и реалното технологично поведение на ценните компоненти, налични в медно-златните порфирни руди.

В настоящата разработка са представени резултатите от комплексно изследване на технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди, с цел да се оцени разпределението на златото и медта в ключови възли на схемата на досмилане и пречистна флотация, въз основа на четири последователни серии на опробване и химичен анализ на десет контролни точки.

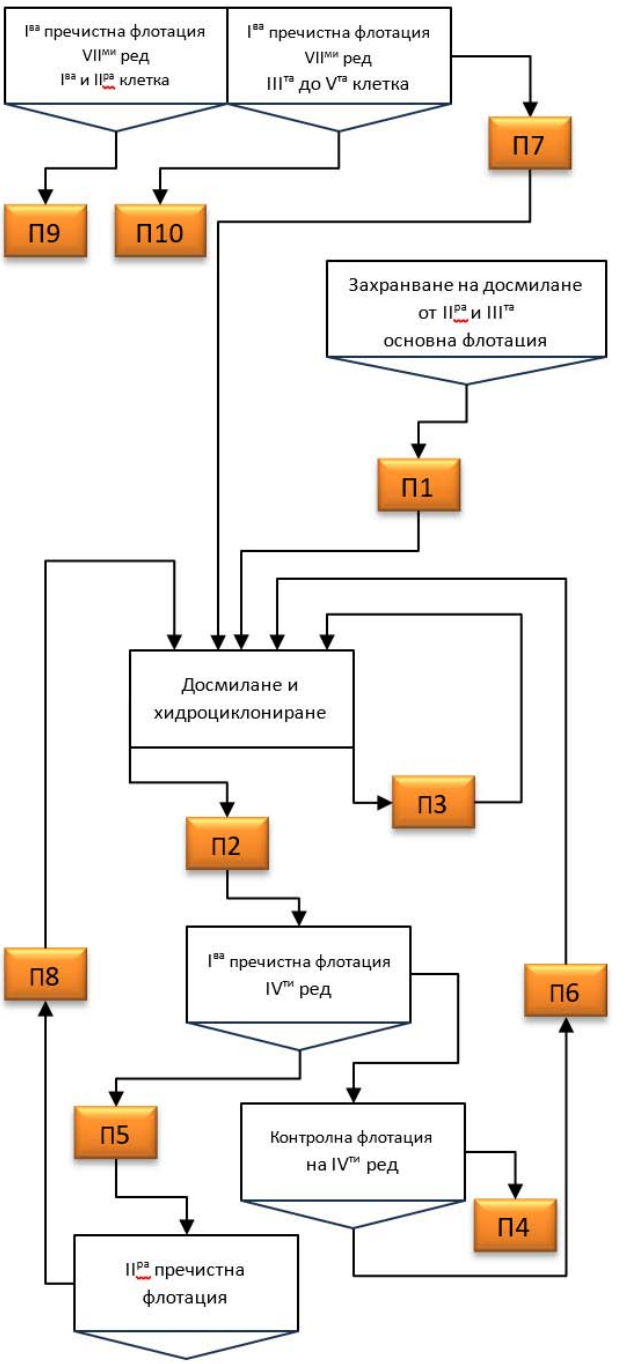
Материали и методика

Изследванията са проведени върху технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди. Опробвани са десет точки, обхващащи цикъла на досмилане и пречистна флотация: захранване на мелницата за досмилане (П1), слив (П2) и пясъци (П3) на хидроциклона от цикъла на досмилане, отпадък от 4-ти ред на пречистна флотация (П4), пенен продукт от 1-ва пречистка на 4-ти ред (П5), пенен продукт от контролна флотация на 4-ти ред (П6), камерен продукт от 7-ми ред на пречистна флотация (П7), камерен продукт от 2-ра пречистка (П8), пенен продукт от 1-ва и 2-ра клетка на 7-ми ред (П9) и пенен продукт от 3-та до 5-та клетка на 7-ми ред (П10).

Схема на проведените опробвания е показана на фиг. 1. Проведени са четири последователни серии на опробване в рамките на една работна смяна през четири последователни месеца - на 9 май, 5 юни, 19 юли и 8 август. За ръчното опробване са използвани пробовземачи от неръждаема стомана с дължина на отсекателя 120 mm, ширина 8 mm и обем 0,5 l. За опробването на точки П9 и П10 е използвана сонда с дължина 2 m и обем 0,5 l, осигуряваща пробовземане от долния слой на флотационните клетки. За всяка точка е използван отделен прибор с цел предотвратяване на замърсяване на пробите.

Пробоподготовката включва обезводняване на пулповите проби чрез филтруване под налягане до получаване на кек, изсушаване в лабораторен сушилен шкаф при 105 ± 5°C до постоянна маса, хомогенизиране и съкращаване чрез ротационен делител, както и зърнометрична подготовка в рингова мелница с хавани от манганова стомана или в планетарна топкова мелница с ахатови хавани, в зависимост от вида на последващия анализ.

Химичните анализи са извършени по три аналитични метода. Съдържанията на 35 елемента са определени чрез ICP-AES в разтвор, получен след разлагане на пробата с царска вода. Съдържанието на злато в интервала 0,01-3 g/t е определено чрез атомно-абсорбционна спектрометрия (AAS) след предварителна екстракция с органичен разтворител, а при съдържания над 3 g/t - чрез тегловен пробирен анализ с навеска 30 g, стапяне с флюс при 1100°C и купелуване при 950°C. Съдържанията на сребро и мед във всички проби са определени чрез AAS.



Фиг. 1. Схема на проведените опробвания на технологичните продукти

Зърнометричната характеристика на продуктите е определена чрез ситов и седиментационен анализ съгласно БДС 15443-82 и БДС ISO 2591-1:1997. Обособени са класите >125 µm, 125-75 µm, 75-45 µm и <45 µm. За всяка зърнометрична класа са определени съдържанията на Cu, Au и Ag, въз основа на които са изчислени разпределенията на тези компоненти по класи.

Резултати и дискусия

Съдържание на медта в технологичните продукти

Данните за съдържанието на мед (Cu) в технологичните продукти при четирите серии на опробване са представени в Таблица 1. В захранването на мелницата за досмилане (П1) и в слива на хидроциклона (П2) са установени близки средни съдържания - съответно 1,43% и 1,36%, докато в пясъците на хидроциклона (П3) съдържанието е по-високо (2,63%), което показва концентриране на медсъдържащата минерализация в по-едрия продукт.

Таблица 1. *Съдържание на Cu (%) в технологичните продукти при четирите серии на опробване*

Продукт	Опробване				Средно	Min –Max
	1	2	3	4		
	09.05	05.06	19.07	08.08		
П1	1,095	1,630	1,665	1,340	1,43	1,095-1,665
П2	1,230	1,500	1,551	1,170	1,36	1,170-1,551
П3	1,598	3,100	3,500	2,340	2,63	1,598-3,500
П4	0,033	0,088	0,056	0,030	0,05	0,030-0,088
П5	6,230	9,540	10,46	12,760	9,75	6,230-12,760
П6	0,389	0,584	1,230	0,632	0,71	0,389-1,230
П7	0,478	0,770	0,133	0,163	0,39	0,133-0,770
П8	0,460	0,479	1,930	0,451	0,83	0,451-1,930
П9	24,920	23,060	23,84	24,300	24,03	23,060-24,920
П10	19,920	13,360	16,95	21,080	17,83	13,360-21,080

В отпадъка от 4-ти ред на пречистната флотация (П4) съдържанието на Cu е устойчиво ниско (средно 0,05%), докато в пенните продукти то нараства значително. Най-високи стойности са отчетени в П9 и П10 - съответно 24,03% и 17,83%, като П9 се отличава с по-висока стабилност между отделните опробвания. Получените резултати показват ясно изразено обогатяване на медта в пенните продукти и ефективно обедняване на отпадъка.

Междинните продукти от пречистната флотация (П6, П7 и П8) се характеризират с по-ниски съдържания на Cu в сравнение с крайните пенни продукти. При третото опробване се наблюдава повишение на съдържанието, най-ясно изразено при П8, където Cu достига 1,930%, което може да се свърже с временни колебания в технологичния режим или с промяна в характеристиките на захранването.

Съдържание на златото в технологичните продукти

Данните за съдържанието на злато (Au) в технологичните продукти при четирите серии на опробване са показани в Таблица 2. В захранването на мелницата за досмилане (П1) и в слива на хидроциклона (П2) са констатирани близки средни съдържания на злато - съответно 0,45 и 0,51 g/t. По-високо съдържание е отчетено в пясъците на хидроциклона (П3) - средно 1,29 g/t, което показва концентриране на златосъдържащата минерализация в по-едрия продукт на класификацията.

Таблица 2. *Съдържание на Au (g/t) в технологичните продукти при четирите серии на опробване*

Продукт	Опробване				Средно	Min–Max
	1	2	3	4		
	09.05	05.06	19.07	08.08		
П1	0,374	0,664	0,414	0,337	0,45	0,337–0,664
П2	0,603	0,614	0,490	0,316	0,51	0,316–0,614
П3	1,140	1,900	1,050	1,050	1,29	1,050–1,900
П4	0,069	0,082	0,080	0,056	0,07	0,056–0,082
П5	2,690	3,880	2,580	2,720	2,97	2,580–3,880
П6	0,520	0,562	1,150	0,637	0,72	0,520–1,150
П7	0,418	0,559	0,182	0,261	0,36	0,182–0,559
П8	0,516	0,293	0,846	0,426	0,52	0,293–0,846
П9	8,420	12,450	7,400	8,300	9,14	7,400–12,450
П10	7,400	6,000	6,300	8,900	7,15	6,000–8,900

В отпадъка от 4-ти ред на пречистната флотация (П4) съдържанието на Au остава ниско - средно 0,07 g/t.

Най-високи стойности са установени в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация - средно 9,14 g/t за П9 и 7,15 g/t за П10. В сравнение с медта, при златото се наблюдават по-изразени вариации на съдържанията в отделните серии на опробване, особено в П9, което показва по-голяма променливост на този компонент в технологичните продукти.

Подобно на Cu, при междинните продукти П6, П7 и П8 се наблюдават сравнително ниски съдържания на Au, но при третото опробване е отчетено едновременно повишение и в трите продукта. Това може да се дължи на временни изменения в технологичния режим, на различия в минераложките характеристики на постъпващия материал или с комбинираното влияние на няколко фактора.

Съдържание на среброто в технологичните продукти

Данните за съдържанието на сребро (Ag) в технологичните продукти са обобщени в Таблица 3. При значителна част от продуктите (П2, П3, П4, П6, П7 и П8) в отделни серии на опробване са отчетени стойности под границата на определяне (<1 g/t), което ограничава възможността за надеждна количествена оценка.

Най-високи съдържания на сребро са установени в пенните продукти от 7-ми ред - средно 31,65 g/t за П9 и 24,18 g/t за П10. В пенния продукт от 1-ва пречистка на 4-ти ред (П5) средното съдържание е 12,67 g/t. Тази тенденция съответства на наблюдаваното обогатяване на Cu и Au в същите продукти. Характерно е, че при П10 изменчивостта на съдържанието на Ag между опробванията е по-ниска (21,80-26,60 g/t) в сравнение с П9 (25,00-41,80 g/t), което е в съответствие с установената по-висока изменчивост на Au в П9. Наличието на стойности под границата на определяне в междинните и отпадъчните продукти показва, че среброто, подобно на златото, се концентрира предимно в крайните пенни продукти на пречистната флотация.

Таблица 3. *Съдържание на Ag (g/t) в технологичните продукти при четирите серии на опробване*

Продукт	Опробване				Средно	Min–Max
	1	2	3	4		
	9.05	05.06	19.07	08.08		
П1	2,23	5,50	1,60	1,00	2,58	1,00–5,50
П2	2,20	14,70	1,70	<1	-*	-*
П3	<1	5,20	2,40	<1	-*	-*
П4	<1	2,20	<1	<1	-*	—*
П5	8,08	17,40	13,50	11,70	12,67	8,08–17,40
П6	2,93	3,50	<1	<1	-*	-*
П7	2,20	2,80	<1	<1	-*	-*
П8	3,90	2,80	7,20	<1	-*	-*
П9	34,80	41,80	25,00	25,00	31,65	25,00–41,80
П10	26,60	21,80	23,20	25,10	24,18	21,80–26,60

** Средните стойности и интервалите не са изчислени поради наличие на стойности под границата на определяне (<1 g/t).*

Разпределение на Cu и Au по зърнометрични класи

Данните за разпределението на Cu и Au по зърнометрични класи в ключовите технологични продукти са изложени в Таблица 4.

Таблица 4. *Разпределение на Cu и Au по зърнометрични класи в ключови технологични продукти (средни стойности)*

Продукт	Класа, µm	Добив, %	Разпределение на Cu, %	Разпределение на Au, %
П3 (1 серия)	>125	59,0	32,2	51,1
	125-75	26,7	42,1	25,6
	75-45	5,8	18,2	12,1
	<45	8,6	7,5	11,1
П5 (средно, 4 серии)	>125	5,3	4,7	4,7
	125-75	18,2	18,7	18,4
	75-45	12,2	13,7	15,3
	<45	64,3	62,9	61,6
П9 (средно, 3 серии)	>125	19,9	17,2	14,2
	125-75	26,3	28,3	23,7
	75-45	16,1	17,7	15,7
	<45	37,6	36,8	46,4
П10 (средно, 4 серии)	>125	7,5	6,6	6,1
	125-75	22,3	22,8	17,9
	75-45	16,2	18,2	12,8
	<45	54,0	52,4	63,1

В пясъците на хидроциклона (П3) златото е концентрирано предимно в класа >125 µm, в който са съсредоточени 51,1% от общото му количество, като този клас представлява 59,0% от масата на продукта.

Медта, за разлика от златото, е концентрирана предимно в класа 125-75 µm, в който се съдържат 42,1% от общото количество Cu, като този клас представлява 26,7% от масата на продукта. Това различие в разпределението на двата компонента по класи предполага различия в едрината и/или в разкриването на златоносните и медсъдържащите минерални фази в продукта на класификацията.

В пенните продукти П5, П9 и П10 преобладаващата част както от медта, така и от златото е съсредоточена в най-фината класа <45 µm. При П5 в тази класа са концентрирани 62,9% от Cu и 61,6% от Au, при П9 - 36,8% от Cu и 46,4% от Au, а при П10 - 52,4% от Cu и 63,1% от Au. Характерно е, че при П9 и П10 делът на златото в най-фината класа е по-висок от дела на медта, което показва по-изразено концентриране на златото във фините фракции. Тази тенденция може да се свърже с по-финото присъствие на част от златото и с особеностите на неговото разкриване в изследваните продукти.

Сравнение между съдържанията на Cu, Au и Ag в технологичните продукти

Съпоставката на данните от Таблица 1, 2 и 3 показва, че медта, златото и среброто следват обща тенденция на обогатяване по технологичната верига. И при трите компонента най-високи съдържания са установени в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация (П9 и П10), докато в отпадъка от 4-ти ред (П4) стойностите са най-ниски или, при Ag, в отделни случаи са под границата на определяне. Това потвърждава, че крайните пенни продукти представляват основната зона на концентриране на ценните компоненти в разглежданата схема.

При Cu и Au се наблюдава ясно изразено нарастване на съдържанията от захранването към крайните пенни продукти. Сравнението между П1 и П9 показва, че съдържанието на Au в П9 е приблизително 20 пъти по-високо от това в П1, докато при Cu това съотношение е около 17, което показва по-интензивно концентриране на златото в крайния пенен продукт.

При Ag също са установени най-високи средни съдържания в П9 и П10, съответно 31,65 и 24,18 g/t, което съответства на установената обща тенденция на обогатяване. Съществена разлика между компонентите се наблюдава по отношение на тяхната изменчивост между отделните серии на опробване. При медта съдържанията в крайните пенни продукти са сравнително устойчиви, докато при златото и среброто се наблюдават по-широки колебания, най-изразени при П9. Това показва, че поведението на благородните метали в технологичните продукти е по-променливо и следва да бъде проследявано с повишено внимание. Наблюдаваната повишена изменчивост на съдържанията на благородните метали може да бъде свързана и с хетерогенния характер на рудния материал и пространствените вариации в неговите физико-механични свойства. Подобни зависимости са установени и от Grigorova (2020), която показва, че различията в литоложкия състав и свързаните с тях физични характеристики, идентифицирани чрез електротомография, водят до съществена пространствена променливост на параметрите, оказващи влияние върху последващите технологични процеси.

Данните за зърнометричното разпределение допълнително показват, че в крайните пенни продукти

златото е представено с по-висок относителен дял в най-фината класа <45 μm в сравнение с медта. Това може да се свърже с особеностите на присъствието и разкриването на златото в изследваните продукти и да обясни по-високата променливост на неговото съдържание.

Като цяло получените резултати показват, че макар Cu, Au и Ag да следват обща закономерност на концентриране, благородните метали се характеризират с по-голяма изменчивост и изискват по-внимателен технологичен контрол.

Заключение

Проведените изследвания показват закономерно концентриране на медта, златото и среброто по технологичната верига, като най-високи съдържания и на трите компонента са установени в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация. Най-ясно изразено е обогатяването в продукт П9, в който са отчетени най-високите средни съдържания на Cu, Au и Ag.

Сравнението между захранването на мелницата за досмилане (П1) и пенния продукт от 1-ва и 2-ра клетка на 7-ми ред (П9) показва, че съдържанието на Au нараства приблизително 20 пъти, докато при Cu това съотношение е около 17. Това показва по-интензивно концентриране на златото в крайния пенен продукт в сравнение с медта.

При златото и среброто е установена по-голяма изменчивост в отделните серии на опробване, в сравнение с медта, което налага повишено внимание при технологичния контрол на благородните метали. В междинните и отпадъчните продукти при среброто, в редица случаи са отчетени стойности под границата на определяне, което допълнително затруднява количествената оценка на неговото разпределение.

Данните за зърнометричното разпределение показват по-висок относителен дял на златото в класа <45 μm в крайните пенни продукти, което може да се свърже с особеностите на неговото присъствие и разкриване. Получените резултати потвърждават необходимостта от многократни серии на опробване за получаване на представителна информация, особено при оценка на съдържанията на златото и среброто в технологичните продукти.

Провеждането на подобни изследвания има съществено значение за практиката на обогатяването на меднопорфирни руди, тъй като осигурява надеждна основа за оценка на разпределението на основните и съпътстващите ценни компоненти в отделните технологични потоци.

Чрез съчетаване на представително опробване, химичен анализ и зърнометрична характеристика се създават условия за по-точен технологичен контрол, за идентифициране на възможни загуби на ценни компоненти и за обосноваване на мерки за оптимизиране на процеса. Това е особено важно при благородните метали, при които дори относително малки колебания в разпределението могат да имат съществено технологично и икономическо значение.

Благодарности. Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0002-C01 „Развитие и усъвършенстване на професионалното и интердисциплинарно образование в техническите и икономически науки и повишаване на научноизследователския капацитет на добивната промишленост чрез проектна докторантура“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз.

Литература

Agorhom, E., Skinner ,W., Zanin, M. (2013) Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper–gold ore, *Chemical Engineering Science*, 99, 127-138. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.037

Aird, H., Purcell, C., DeWitt, N., Matthews, J., Capurro, T., Claiborne, J., Bermudez, J., Meisel, Z. (2021). Gold-and silver-bearing assemblages in the Ann-Mason copper porphyry deposit, Yerington, Nevada, *Ore Geology Reviews*, 138, Article № 104339. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104339

Allan, G.C., Woodcock J.T. (2001). A review of the flotation of native gold and electrum, *Minerals Engineering*, 14(9), 931-962. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00103-0

Bulatovic, S.M. (1997). Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides, *Minerals Engineering*, 10(9), 895-908. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00072-1

Blannin, R., Frenzel, M., Tuşa, L., Birtel, S., Ivăşcanu, P., Tim Baker, T., Gutzmer, J. (2021). Uncertainties in quantitative mineralogical studies using scanning electron microscope-based image analysis, *Minerals Engineering*, 167, Article № 106836. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106836

Dominy, S., O’Connor, L., Glass, H., Purevgerel S., Xie, Y. (2018). Towards Representative Metallurgical Sampling and Gold Recovery Testwork Programmes, *Minerals*, 8(5), 193. https://doi.org/10.3390/min8050193

Grigorova, M., Geophysical and mining technologies for increasing efficiency in Han Krum open pit mine, Bulgaria. Proc., 20(1.2) - XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 2020, Albena, Bulgaria (111-118).

Lyman, G., (2023). Sampling Theory for Mineral Process Flows, Minerals, 13(7), 922. https://doi.org/10.3390/min13070922

Tomova, M., Kisyov, A., Tsankov, C. (2025). Geophysical monitoring of Chelopech tailings storage facility conditions using electrical resistivity tomography. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 86(3), 147–150. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.147

БДС 15443:1982: Руди и концентрати на цветни метали. Ситов и седиментационен метод за определяне на зърнометричния състав.

БДС ISO 2591-1:1997: Ситов анализ. Част 1: Методи, използващи лабораторни сита от метална телена тъкан и перфорирана метална плоча.

MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF GOLD IN TECHNOLOGICAL PRODUCTS OF PORPHYRY COPPER ORE BENEFICIATION

Nikolay Nestorov, Mihail Petrov, Teodora Yankova, Irena Grigorova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: n.nestorov@mgu.bg

ABSTRACT. The paper presents the results of a mineralogical study of gold in beneficiation products obtained from porphyry copper ores. XRD, reflected-light optical microscopy, SEM, and EDX were used for sample characterisation. The results show that gold occurs in native form and is predominantly liberated, with particle sizes ranging from 10x20 to 250x150 μm and gold contents varying from 57.65 to 97.75%. Variations in the Ag distribution within some gold particles were identified, including the occurrence of electrum (Au, Ag), alongside particles with a uniform gold composition. Although gold is relatively well liberated, most particles contain microinclusions of quartz, pyrite, and chalcopyrite, which may adversely affect flotation recovery. The results confirm that a reliable assessment of the technological behaviour of gold requires comprehensive mineralogical investigations combined with chemical analyses.

Key words: porphyry copper ores, gold, mineralogy, flotation.

МИНЕРАЛОЖКА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ЗЛАТОТО В ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОДУКТИ ОТ ОБОГАТЯВАНЕ НА МЕДНОПОРФИРНИ РУДИ

Николай Несторов, Михаил Петров, Теодора Янкова, Ирена Григорова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Представени са резултатите от минераложки изследвания на златото в технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди. Използвани са XRD, оптична микроскопия в отразена светлина, SEM и EDX. Златото присъства в самороден вид и е освободено, с размери на частиците от 10 x 20 до 250 x 150 μm и съдържание 57,65 до 97,75% Au. Установено е наличие на нееднородност и вариации в разпределението на Ag в някои златни частици, включително наличие на електрум (Au, Ag), както и присъствие на частици от еднородно злато. Въпреки свободната им форма, в повечето частици са регистрирани микровключения от кварц, пирит и халкопирит, които могат да затруднят флотационното извличане. Резултатите потвърждават, че за надеждна оценка на технологичното поведение на златото е необходимо извършването на комплексни минераложки изследвания и химични анализи.

Ключови думи: меднопорфирни руди, злато, минералогия, флотация.

Въведение

Технологичните схеми за преработка на меднопорфирни руди и ефективното извличане на златото, изискват провеждането на комплексни минераложки изследвания. Съществено значение за правилната интерпретация на технологичното поведение на златото имат химичният състав, морфоложките особености, размерът на златните частици и степента на тяхната освободеност, както и минералните асоциации.

Именно тези характеристики в значителна степен определят условията за извличане на златото при флотационно обогатяване (Agorhom et al., 2013; Allan and Woodcock, 2001).

Томова и Кисьов (2025) посочват, че някои геофизични методи като електрическата томография (ERT) могат успешно да се използват за литоложко диференциране на подповърхностната среда при задачи, свързани с меднопорфирни находища. Методът позволява разграничаване на зони с различен литоложки и структурен характер въз основа на пространственото разпределение на специфичното електрическо съпротивление - физичен параметър, чувствителен към литологията, порьозността и водното съдържание (Tomova and Kisyov, 2025).

Agorhom, Skinner и Zanin (2013) показват, че минералогията на златото оказва пряко влияние върху неговото флотационно поведение и че оптимизирането на извличането му от меднопорфирни руди, изисква съчетаването на флотационни изследвания с минераложки методи.

Allan and Woodcock (2001) отбелязват, че минераложката характеристика на златото е необходима предпоставка за оценка на възможностите за неговото извличане, тъй като поведението на самородното злато и електрума зависи от размера, формата, химичния състав и наличието на срастъци.

Сред методите за минераложка характеристика на златото в рудите и технологичните продукти, особено значение имат оптичната микроскопия в отразена светлина, рентгеновата дифракция, сканиращата електронна микроскопия (SEM) и енергийно-дисперсионният рентгенов анализ (EDX). Чрез тях могат да се определят минералните фази, типовете срастъци, морфологията на златните частици, локалният им химичен състав и наличието на микровключения.

Blannin et al. (2021) посочват, че SEM-базираната автоматизирана минералогия е един от основните методи на геометалургичните изследвания, като същевременно подчертават необходимостта от внимателна интерпретация на количествените минераложки резултати.

В предишна публикация (Несторов и др., 2026) акцентът беше поставен върху химико-технологичната оценка на съдържанието и разпределението на медта и златото в технологичните продукти от досмилане и пречистна флотация. Настоящата работа е насочена към минераложката характеристика на златото. Целта е да се установят формата на присъствие, морфологията, химичният състав, фазовата еднородност и степента на либерализация (освобождаване) на златните частици в ключови технологични продукти, както и да се оцени

тяхното значение за технологичното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди.

Материали и методика

Обектът на изследване, схемата на опробване, пробовземането и пробоподготовката са описани подробно в предходна публикация (Несторов и др., 2026). Настоящото изследване обхваща десет технологични продукта от цикъла на досмилане и пречистна флотация на обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди, опробвани в четири последователни серии.

За целите на настоящата работа са приложени минераложки методи, насочени към определяне на минералния състав на продуктите, формата на присъствие на златото, неговата морфология, химичен състав, срастъци и степен на освобождаване.

Минералният състав на продуктите е определен чрез рентгенова дифракция (XRD). Анализирани са продуктите П5, П6, П7, П8, П9 и П10 от трите серии на опробване, тъй като те представят междинни и крайни продукти от пречистна флотация и позволяват проследяване на измененията в минералния състав в хода на технологичния процес.

За минераложка характеристика на рудните минерали и златото е приложен подход, включващ предварително гравитационно набогатяване на технологичните продукти за получаване на гравитационен концентрат (шлихова проба), в който златните частици са подбирани под бинокулярен стереомикроскоп. Паралелно с това са изготвени аншлифи -полирани препарати- брикети с диаметър 20 mm, получени от споени със смола минерални частици, като от всеки продукт са изработени по четири броя. Микроскопските изследвания на аншлифите в отразена светлина са проведени, с цел определяне на минералните фази, структурно-текстурните особености и типовете срастъци. Минераложките изследвания са допълнени с шлихов анализ, чрез който е създадена възможност за наблюдение и подбор на отделни златни частици за последващи SEM/EDX изследвания.

SEM/EDX анализите са извършени върху шлихови проби и върху полираните препарати-брикети. При изучаването на аншлифите, изследванията са направени в режим обратно разсеяни електрони (COMPO), при който изображението отразява фазовата нееднородност на минералните зърна. При шлиховите проби изследванията са проведени в режим вторични електрони (SEI), който дава информация за повърхностната морфология (релефа) на частиците. Чрез EDX анализ е определян локалният химичен състав на отделни златни частици и на минералните включения в тях. За всички наблюдавани златни частици са изготвени рентгенови разпределения на елементите по площ (X-ray mapping), както и смесени елементни карти, представящи разпределението на всички елементи в изследваната площ. В отделни случаи е използван и анализ по линия за проследяване на промените в състава през различни участъци на частиците.

Целта на SEM/EDX изследванията е да се охарактеризират отделните минерали, срастъци и микровключения от злато и други полезни компоненти, тяхната принадлежност към отделни минерали или към свободно състояние, както и формата, размерите и фазовата нееднородност на частиците. Този подход позволява съчетаване на минераложко описание с локален химичен анализ и е особено подходящ за интерпретация на технологичното поведение на златото в продуктите от досмилане и пречистна флотация.

Резултати и дискусия

Минерален състав на технологичните продукти (XRD)

Резултатите от рентгенодифракционния анализ, извършен на продуктите П5, П6, П7, П8, П9 и П10 при трите серии на опробване са представени в Таблица 1. Установени са следните минерални фази: халкопирит, пирит, кварц, албит, микроклин, клинохлор и мусковит, а в отделни серии – молибденит и каолинит.

Таблица 1. *Минерален състав на технологичните продукти по данни от XRD анализ (%)*

Продукт	№	Халкопирит	Пирит	Кварц	Албит	Микроклин	Клинохлор	Мусковит	Молибденит	Каолин
П5	1	25	21	11	16	24	3	–	–	–
	2	40	15	10	10	14	–	8	–	–
	3	36	33	5	7	17	–	–	2	–
П6	1	5	20	19	2	29	6	–	–	–
	2	6	6	18	18	31	5	15	–	–
	3	8	10	28	17	36	–	–	–	–
П7	1	5	26	18	21	24	5	–	–	–
	2	8	7	19	14	22	16	10	2	2
	3	3	5	31	20	35	5	–	–	–
П8	1	5	37	13	18	27	–	–	–	–
	2	6	7	20	17	29	7	13	–	–
	3	8	53	7	11	18	–	–	–	–
П10	1	69	10	7	–	14	–	–	–	–
	2	52	15	9	8	11	4	–	–	–
	3	67	11	5	6	9	–	–	1	–
П9	1	84	8	2	–	6	–	–	–	–
	2	79	5	5	–	10	–	–	–	–
	3	80	6	3	4	6	–	–	–	–

Съдържанието на халкопирит нараства отчетливо от междинните продукти към крайните пенни продукти. В продуктите П6 и П7 халкопиритът е застъпен в интервала 3-8%, докато в П9 достига 79-84%, а в П10 – 52-69%. Обратна тенденция се наблюдава при скалообразуващите минерали (кварц, албит, микроклин), чийто сумарен дял намалява от П6 и П7 към П9 и П10. Пиритът е с по-високо съдържание в П5 и П8, докато в крайните пенни продукти неговият дял е значително по-нисък. В отделни серии са установени и молибденит, мусковит и каолинит, но в подчинени количества.

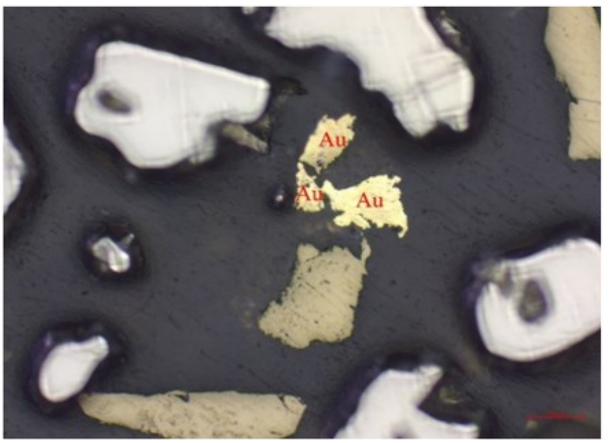
Установените различия могат да бъдат обяснени с хетерогенния характер на изследвания масив и пространствената променливост на неговите физични свойства. Подобни зависимости са отчетени и от Grigorova (2020), която показва, че вариациите в литоложкия състав и свързаните с тях физико-механични характеристики водят до значителни различия в поведението на материала при добив и последваща преработка.

Рудни минерални фази и срастъци

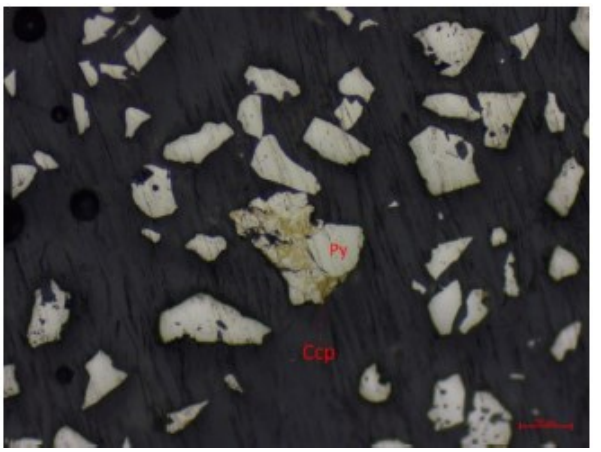
Оптичната микроскопия в отразена светлина, проведена на полирани препарати-брикети от продуктите П3, П1 и П4, показва присъствие на пирит, халкопирит, борнит, магнетит/мартит, ковелин, галенит, медни сулфосоли от групата тетраедрит–тенантит, сфалерит и арсенопирит. В продуктите П3 и П1 е установено и наличие на самородно злато (фиг. 1).

Наблюдаванитие видове срастъци включват халкопирит с кварц, пирит с магнетит, пирит с халкопирит ± галенит (фиг. 2), халкопирит с борнит, ковелин с борнит и халкопирит, медни сулфосоли с кварц и халкопирит, както и пирит със злато в продукта П1.

В продукт П4 самородно злато не е установено, а рудните минерали са представени главно от пирит, халкопирит, хематит, магнетит/мартит, ковелин, галенит, медни сулфосоли и сфалерит.



Фиг. 1. Свободни частици от злато – в централната част на кадъра. Около тях – свободни частици пирит (бяло) и халкопирит (жълто). Отразена светлина, N II, маркер 50 µm



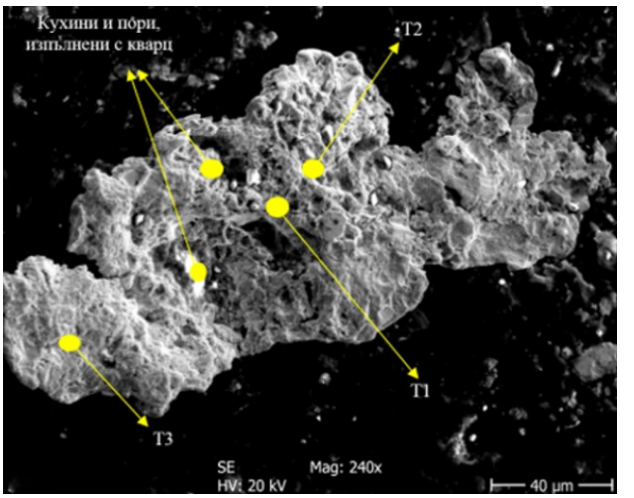
Фиг. 2. Срастък на пирит (бяло) с халкопирит (жълто) – в централната част на кадъра. Около него – свободни частици пирит. Отразена светлина, N II, маркер 50 µm

Морфология и размери на златните частици

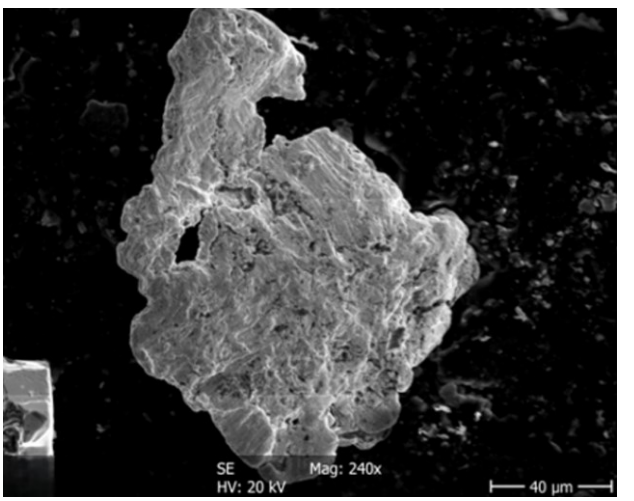
Изследваните златни частици, установени в шлиховите проби и полираните препарати-брикети от продуктите П3 и П1, попадат в групите на много дребно (50-100 µm) и дребно (100-250 µm) злато, съгласно класификацията на Петровская (1973). Установени са частици с размери от 10 x 20 µm до 250 x 150 µm.

Формите на златните частици са предимно неправилни, разклонени и удължени, с неравни резки контури. Част от частиците показват заоблени форми, вероятно свързани с известно въздействие при смилането на рудата. Повърхността на златинките е предимно пореста, с множество микрокухини, пори и пукнатини. Наблюдават се отпечатъци от отронени минерални зърна от кварц, пирит и халкопирит. По повърхността на една част от частиците са установени и налепи от фина прахообразна нерудна и рудна маса, включена механично при смилането на рудата.

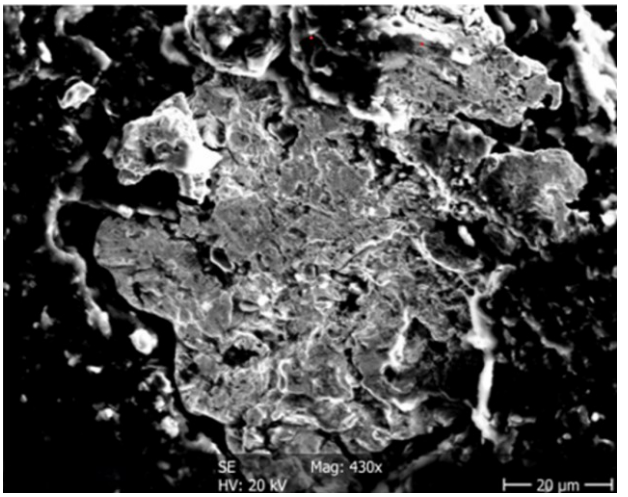
Всички регистрирани златни частици са освободени, т.е. не са установени срастъци с други минерали. Въпреки това, в повечето частици са регистрирани микровключения от кварц, пирит и халкопирит, отложени в кухини, пукнатини и пори на златинките, което може да затрудни тяхното флотационно извличане (фиг. 3, фиг. 5 и фиг. 10).



Фиг. 3. Пореста златинка със слаби механични деформации (П3, 7). В микрокухини и пори сред нея е отложен кварц. SEI, SEM, 240 X



Фиг. 4. Пореста златинка със слабо изразени заоблени очертания (П3, 9), SEI, SEM, 240 X



Фиг. 5. Раздробена златинка (сиво), с ъгловато включение от халкопирит (бяло до сиво) в горния ляв ъгъл. SEI, SEM, 430 X

Химичен състав и еднородност на златните частици (SEM/EDX)

С помощта на EDX анализи е определен химичният състав в различни части на златните частици (център и периферия), за изучаване фазовата еднородност на златинките. Определен е и минералния състав на микровключенията, присъстващи сред златните частици.

Обобщените данни за химизма на изследваните частици са представени в Таблица 2.

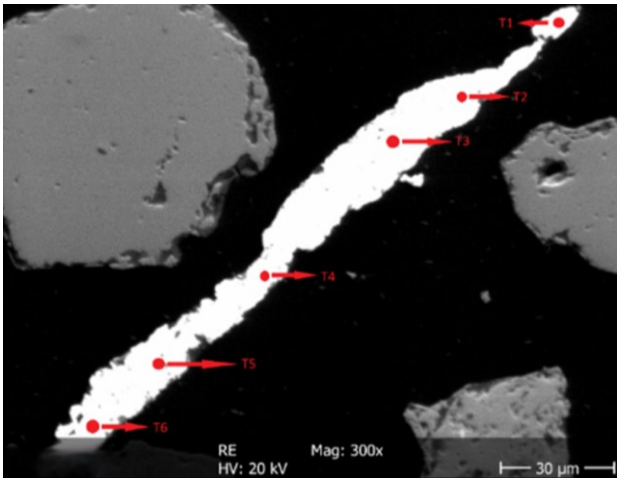
Таблица 2. *Обобщени данни за химичния състав на изследваните златни частици (SEM/EDX)*

№	Продукт	Размери, µm	Au център, %	Ag център, %	Au периф., %	Ag периф., %	Включения
1	П3	120×15	92,16	7,36	57,65	40,27	Py, Qtz
2	П3	18×18	88,80	9,97	88,16	9,44	Py
3	П3	80×40	89,59	9,69	92,33	6,39	Ccp
4	П3	50×60	86,41	12,54	84,41	12,97	Qtz
5	П1	10×20	90,66	8,47	77,23	20,39	Ccp
6	П3	10×30	97,75	1,35	93,17	5,60	–
7	П3	250×150	80,11	16,68	79,33	16,79	Qtz, Py
8	П3	120×90	85,30	13,25	79,11	11,54	Ccp
9	П3	200×150	93,63	5,52	87,97	10,97	Qtz, Fe-окс.
10	П3	–	82,77	7,76	84,62	9,14	Ccp, Qtz, Py
11	П3	200×90	91,38	6,32	79,58	17,56	Qtz
12	П3	–	93,84	3,65	93,04	5,10	Qtz
13	П3	200×200	82,16	15,35	85,97	12,64	Qtz, Py

Py - пирит, Ccp - халкопирит, Qtz - кварц, Fe-окс. - железни оксиди.

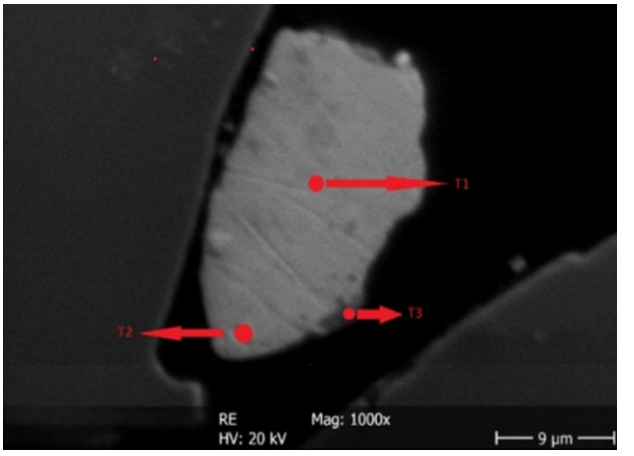
Съдържанието на Au в различни участъци на анализираните златинки варира в широки граници – от 57,65 до 97,75%, а съдържанието на Ag варира в интервала 1,35 - 40,27%, като в повечето случаи е под 10-16% Ag.

EDX анализите показват неравномерно разпределение на среброто в площта на някои от златните частици, както и наличие на еднородни частици с относително равномерно разпределение на среброто. Например при частица от продукт П3.1 (фиг. 6) с размери 120 × 15 µm, съдържанието на Au в централната част достига до 92,16% (високопробно злато), докато в периферията на същата златинка намалява до 57,65% като съответно съдържанието на Ag нараства до над 40,27%, което показва състав, характерен за електрум (Au, Ag).



Фиг. 6. Напречен презрез на златна частица (бяло) (П3, 1), с отбелязани местата на проведените анализи. Около нея – свободни частици от пирит (сиво), SEM, 300 X.

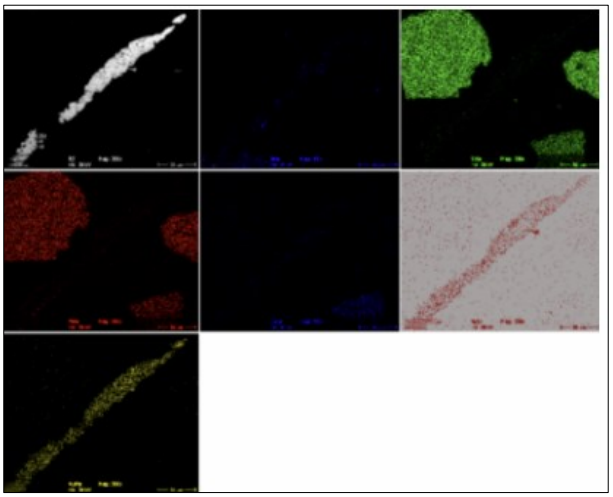
Подобна вътрешна нееднородност и наличие на зоналност се установява и в златинка от технологичния продукт П1.5 (фиг. 7), в която съдържанието на Au намалява от центъра към периферията при едновременно повишаване съдържанието на Ag и преход от високопробно злато към електрум (Au,Ag).



Фиг. 7. Златна частица (сиво)(П1, 5), с включение от халкопирит (черно), в периферията на златинката. SEM, 1000 X

За друга частица от продукта П3 с размери 18 × 18 µm е установено почти постоянно съдържание на Ag в интервала 9,97–9,44%, характерно за високопробното злато.

Площното разпределение на елементите (x-ray mapping) в златна частица П3.1 е представено на фиг. 8. На същата фигура е показано и разпределението на елементите в свободни частици от пирит, асоциращи със златинката.

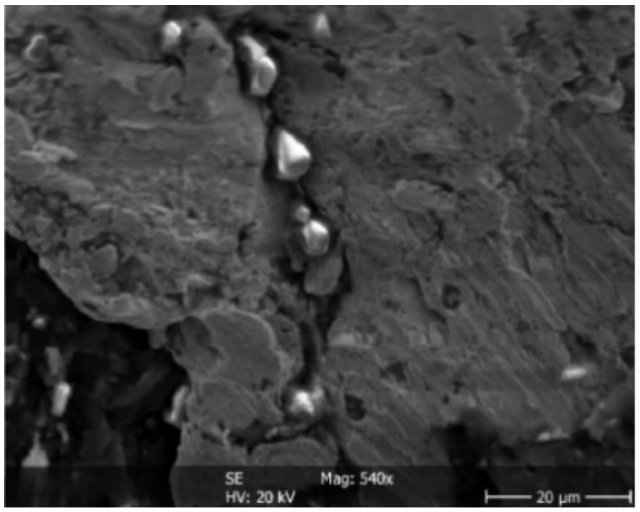


Фиг. 8. Площно разпространение на елементите Si (синьо), S (зелено), Fe (червено), Cu (светло синьо), Ag (светло червено), Au (жълто), SEM, 300 X

На смесените елементни карти отчетливо се наблюдава наличието на микровключения от кварц, пирит и други минерални фази, отложени в кухини, празнини и пори, в някои от изследваните златни частици (фиг. 10).

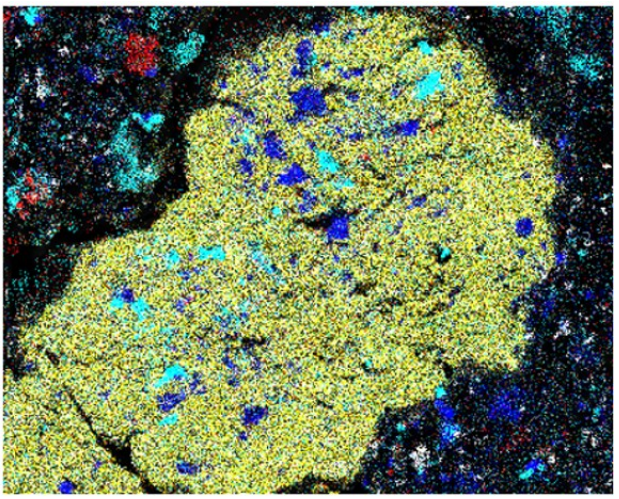
Технологична интерпретация на флотируемостта на златните частици

Въз основа на минераложките наблюдения и SEM/EDX данните могат да се разграничат два основни типа златни частици по отношение на очакваното им флотационно поведение. Първият тип включва частици с относително чиста повърхност, високо съдържание на Au и ограничен брой микровключения, при които са налице благоприятни условия за флотация (фиг. 9).



Фиг. 9. Златна частица от продукт П3 с високо съдържание на Au и микровключения от заоблени кварцови зърна, разположени по пукнатина в златинката, SEI, SEM, 540 X

Вторият тип обхваща частици с пореста повърхност, кухини и пукнатини, запълнени с кварц, пирит и халкопирит, както и частици с повърхностни налепи от фина рудна и нерудна маса. При тях условията за флотационно извличане са по-неблагоприятни и е възможно част от тези частици да преминават в отпадъчния продукт (фиг. 10).



Фиг. 10. Нехомогенна златинка (жълто), с множество микрокухини и пори, запълнени с кварц (тъмносиньо) и пирит (светлосиньо), SEM, 270 X

Наличието на механично включени повърхностни налепи и микровключения в кухини и пукнатини показва, че дори при освободени златни частици, реалната им флотируемост може да бъде влошена, в резултат на повърхностни и вътрешни микроструктурни особености. Това обстоятелство подчертава важното значение на минераложките изследвания при интерпретацията на технологичното поведение на златото.

Заключение

Проведените минераложки изследвания на технологичните продукти от досмилане и пречистна флотация на меднопорфирни руди позволяват да се формулират следните основни изводи:

1. Златото в изследваните продукти П3 и П1 присъства в самороден вид, като всички регистрирани частици са освободени. Размерите им варират от 10 x 20 до 250 x 150 µm, което ги отнася към групите на много дребно и дребно злато, съгласно класификацията на Петровская (1973).

2. Установено е неравномерно разпределение на среброто в част от изследваните златни частици и вътрешна фазова нееднородност, като по данни от EDX анализите се наблюдават случаи на преход от високопробно злато към електрум (Au, Ag) и обратно, както и наличие на почти еднородни частици с относително равномерно разпределение на среброто. Това показва вътрешна химична нееднородност на част от изследваните златинки.

3. Въпреки освободеността на златните частици, значителна част от тях съдържат микровключения от кварц, пирит и халкопирит, отложени в пори, микрокухини и пукнатини. Тези особености могат да затруднят

флотационното извличане на златото дори при освободени частици.

4. Рентгенодифрактометричният анализ потвърждава ясно изразено обогатяване с халкопирит на крайните пенни продукти, като в П9 съдържанието му достига до 79–84%, при едновременно намаляване на дела на скалообразуващите минерали.

5. Получените резултати показват, че за пълноценна оценка на технологичното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди е необходим комплексен подход, съчетаващ оптична микроскопия, рентгенодифрактометричен и SEM/EDX анализ.

Получените резултати потвърждават, че при оценката на технологичното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди, с детайлните минераложки и химични изследвания могат да бъдат изяснени причините за възможна загуба на злато в отпадъка.

Благодарности. Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0002-C01 „Развитие и усъвършенстване на професионалното и интердисциплинарно образование в техническите и икономически науки и повишаване на научноизследователския капацитет на добивната промишленост чрез проектна докторантура“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз.

Литература

Agorhom, E.A., Skinner, W., Zanin, M. (2013). Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper–gold ore. *Chemical Engineering Science*, 99, 127–138. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.037

Allan, G.C., Woodcock J.T. (2001). A review of the flotation of native gold and electrum, *Minerals Engineering*, 14(9), 931-962. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00103-0

Aird, H., Purcell, C., DeWitt, N., Matthews, J., Capurro, T., Claiborne, J., Bermudez, J., Meisel, Z. (2021). Gold-and silver-bearing assemblages in the Ann-Mason copper porphyry deposit, Yerington, Nevada, *Ore Geology Reviews*, 138, Article № 104339. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104339

Blannin, R., Frenzel, M., Tuşa, L., Birtel, S., Ivăşcanu, P., Tim Baker, T., Gutzmer, J. (2021). Uncertainties in quantitative mineralogical studies using scanning electron microscope-based image analysis, *Minerals Engineering*, 167, Article № 106836. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106836

Dominy, S., O’Connor, L., Glass, H., Purevgerel S., Xie, Y. (2018). Towards Representative Metallurgical Sampling and Gold Recovery Testwork Programmes, *Minerals*, 8(5), 193. https://doi.org/10.3390/min8050193

Grigorova, M. (2020). Geophysical and mining technologies for increasing efficiency in Han Krum open pit mine, Bulgaria. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 20(1.2), 111-118. Albena, Bulgaria.

Несторов, Н., М. Петров, Т. Янкова, И. Григорова, Оценка на разпределението на златото и медта в технологични продукти от обогатяване на меднопорфирни руди, Год. на МГУ, т. 69 – 69та Международна научна конференция, 16.11.2026, София, България.

Петровская, Н. В. (1973). *Самородное золото*. Москва, Наука, 348.

Tomova, M., Kisyov, A. (2025). Electrical resistivity tomography as a tool for geological-engineering assessment of the Benkovski-2 tailings storage facility. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 38, 682–687.

METHODS FOR MANGANESE REMOVAL FROM WASTEWATER: REVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS

Nikolay Popov, Plamen Georgiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nikolaypopov.com@gmail.com

ABSTRACT. Manganese plays a vital role as an essential micronutrient in numerous biological processes, but when its concentration is elevated in aquatic systems, it becomes a pollutant which induces considerable environmental problems. A great part of the heavy industry, like mining, metallurgy, chemical production, and battery manufacturing, generates wastewater streams containing manganese ions in a wide concentration range (1–200 mg/L). In the context of increasing environmental problems and progressively stricter regulatory standards, the implementation of sustainable manganese removal technologies becomes a necessity. The current review provides a comparative analysis of contemporary techniques for manganese removal from wastewater, including chemical oxidation and precipitation, adsorption, membrane-based processes, as well as biological and electrochemical approaches. The analysis shows that although most technologies achieve removal efficiencies above 90%, they cannot satisfy all criteria simultaneously. It was found that hybrid and integrated systems are a promising practical solution.

Key words: wastewater treatment, manganese removal, sustainable water management.

МЕТОДИ ЗА ОТСТРАНЯВАНЕ НА МАНГАН ОТ ОТПАДЪЧНИ ВОДИ: ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ

Николай Попов, Пламен Георгиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Манганът играе жизненоважна роля като основен микроелемент в множество биологични процеси, но когато концентрацията му се повиши във водните системи, той се превръща в замърсител, който причинява значителни екологични проблеми. Голяма част от тежката промишленост, като минното дело, металургията, химическата промишленост и производството на батерии, генерират потоци от отпадъчни води, съдържащи манганови йони в широк диапазон на концентрация (1–200 mg/L). В контекста на нарастващите екологични проблеми и все по-строгите регулаторни стандарти, прилагането на устойчиви технологии за отстраняване на манган се превръща в необходимост. Настоящият преглед предоставя сравнителен анализ на съвременните техники за отстраняване на тези йони от отпадъчни води, включително химическо окисление и утаяване, адсорбция, мембранни процеси, както и биологични и електрохимични подходи. Анализът показва, че въпреки че повечето технологии постигат пречиствателен ефект над 90%, те не могат да отговорят на всички критерии едновременно. Установено е, че хибридните системи са обещаващо практическо решение.

Ключови думи: пречистване на отпадъчни води, отстраняване на манган, устойчиво управление на води.

Introduction

Mining and mineral processing are central to modern industrial supply chains, providing the metals and mineral raw materials required for construction, transport, and energy transition technologies. However, these activities are inherently water-intensive and disruptive to natural systems, as they mobilise large volumes of solids and generate process-affected waters throughout the mine life cycle. The most persistent pressures typically originate from tailings storage facilities and waste-rock dumps (via seepage and runoff), as well as from process circuits where reagents, fine particles, and dissolved species interact with water. Under increasing water scarcity, stricter permitting frameworks, and rising societal expectations, mine water management is evolving from a compliance-driven task to a core operational function linked to water efficiency, reuse, and long-term liability reduction (Matebese et al., 2024; de Lima et al., 2025).

A key pathway of water degradation in mining environments is the formation of acid mine drainage (AMD), driven primarily by sulphide mineral oxidation and often enhanced by microbial activity. AMD is characterised by low pH and elevated concentrations of sulphate and dissolved metals, which complicate both prevention and treatment strategies. In recent years, the field has moved beyond conventional “one-size-fits-all” neutralisation approaches towards more systematic and comparative evaluation of prevention measures (e.g., covers and oxygen barriers), passive and semi-passive systems, and active chemical or physicochemical treatment systems. Increasingly, these approaches are assessed using sustainability-oriented metrics, including reagent consumption, sludge generation, energy demand, and overall environmental footprint (Yang et al., 2023; Nguegang & Ambushe, 2025).

At the same time, mine-impacted waters are no longer viewed solely as waste streams requiring disposal, but as potential sources of reusable water and recoverable materials. This shift aligns with broader circular economy principles and has driven growing interest in integrated and hybrid treatment systems (i.e., multi-step process systems) designed to maximise water recovery while enabling selective removal or recovery of metals and salts. However, this “treatment + recovery” paradigm introduces a critical trade-off: secondary residues (e.g., sludges and concentrates) may remain hazardous or difficult to valorise, meaning that overall sustainability performance depends strongly on downstream residue management (Matebese et al., 2024; Mahlohla et al., 2026).

Within this context, manganese (Mn) represents a particularly persistent and technically challenging contaminant in mine drainage and metallurgical wastewater. In contrast to Fe and Al, which are readily removed as hydroxides during pH adjustment, Mn removal is governed primarily by sorption and redox-controlled precipitation processes. These mechanisms are highly sensitive to Eh–pH conditions, competing ions, and the presence of reactive or catalytic surfaces, which limits process robustness under variable water chemistries. As a result, Mn frequently emerges as a “polishing-stage” constraint,

even when bulk metal removal has already been achieved (Neculita & Rosa, 2019).

From an operational and design perspective, this challenge is further amplified by the wide variability of Mn concentrations in mine-affected waters, ranging from a few mg/L to over 100 mg/L depending on geological and site-specific conditions (Doyle & Figueroa, 2024). Such variability reduces the effectiveness of single-step treatment approaches and necessitates adaptable, matrix-specific process configurations that can reliably meet discharge or reuse criteria.

Manganese also presents a dual sustainability concern. While it is an essential micronutrient, elevated concentrations in aquatic systems pose risks to ecosystems and human health, particularly where impacted waters interact with drinking water sources. A systematic review focusing on school-age children reported consistent associations between higher Mn exposure via drinking water and adverse cognitive or neurobehavioral outcomes (Iyare et al., 2019). In the European context, Mn is regulated as an indicator parameter in the Drinking Water Directive, with a parametric value of 50 µg/L, reinforcing the need for effective Mn control in water management strategies (Directive (EU) 2020/2184).

A wide range of Mn removal technologies has been developed, typically classified into chemical methods (neutralisation and oxidative precipitation), physicochemical approaches (adsorption, ion exchange, membrane processes), and biological and emerging electrochemical techniques. Nevertheless, the literature consistently highlights a key limitation: few technologies simultaneously achieve low residual Mn concentrations, low reagent and energy consumption, resilience to variable water matrices, and minimal secondary waste generation. This trade-off underpins the growing emphasis on integrated and hybrid treatment systems as more realistic and scalable solutions for industrial application (Bao et al., 2025).

The aim of this study is to provide a critical and sustainability-oriented overview of contemporary methods for manganese removal from wastewater, with particular focus on mining and metallurgical effluents. The paper evaluates removal mechanisms and controlling parameters, compares technology performance under realistic water matrices, and proposes practical criteria for process selection and integration in the context of increasingly stringent environmental and resource-efficiency requirements.

This review is based on a structured literature survey conducted using major scientific databases, including Scopus, Web of Science, and ScienceDirect. The search strategy combined keywords related to manganese occurrence and removal in industrial water, such as “manganese removal”, “Mn(II) oxidation”, “mine drainage”, “acid mine drainage (AMD)”, “metallurgical wastewater”, “adsorption”, “membrane processes”, “biological treatment”, and “electrochemical treatment”. Boolean operators (AND/OR), truncation and phrase searching were used to refine results, while backward and forward citation tracking was applied to key papers to capture additional relevant studies (Patil et al., 2016; Bao et al., 2025).

The primary time window considered spans from 2016 to 2026, to capture recent technological developments and emerging trends, while selectively including earlier seminal studies where needed for mechanistic understanding (e.g. Mn(II) oxidation kinetics and catalytic effects). Inclusion criteria comprised peer-reviewed journal articles reporting quantitative performance data (e.g. removal efficiency, residual Mn concentrations, or adsorption capacities), clearly defined operational conditions (e.g. pH, oxidant dose, current density, pressure, contact time), and applicability to realistic or representative water matrices (e.g. mine drainage, metallurgical effluents, industrial wastewater). Studies using purely synthetic solutions were included primarily when they provided mechanistic insights and/or parametric data useful for process comparison (Patil et al., 2017).

Exclusion criteria included non-peer-reviewed sources, studies lacking quantitative evaluation of Mn removal, and works not directly related to aqueous systems. The selected literature was analysed comparatively, with emphasis on dominant removal mechanisms, operational constraints, secondary waste generation (sludge or concentrate), and practicality for mining and metallurgical settings.

Manganese in mining and metallurgical wastewater

Manganese is widely encountered in mining and metallurgical wastewater due to its natural abundance in ore deposits and its mobilisation during extraction, beneficiation, and metallurgical processing. In mine drainage, Mn frequently appears alongside Fe, Al and sulphate, yet tends to persist longer during treatment because it is less readily removed by simple neutralisation compared with Fe/Al (Neculita & Rosa, 2019). Reported Mn concentrations in mining-impacted water commonly range from a few mg/L to tens of mg/L, and can be higher at specific sites. For example, an AMD stream used for staged recovery contained 41.8 mg/L Mn (with co-occurring metals) (Shekarian et al., 2022), while a pilot mine-drainage bioreactor study treated influent containing ~20 mg/L Mn(II) together with ~6 mg/L Zn(II) (Watanabe et al., 2024). Such co-contamination is important because competing ions and matrix composition influence both Mn speciation and removal performance.

In aqueous systems, manganese predominantly occurs as dissolved Mn(II) under reducing to mildly oxidising conditions. Higher oxidation states (Mn(III)/Mn(IV)) form sparingly soluble oxides/oxyhydroxides, but their formation is often kinetically limited under circumneutral conditions unless catalysed by existing MnO_x surfaces, reactive media, or microbial activity (Watanabe et al., 2024). Consequently, pH and redox potential (Eh) are key control variables: Mn(II) oxidation becomes more favourable with increasing pH, yet may remain slow without catalytic pathways. This is reflected in the operational reality that purely aeration-based or passive oxidation approaches may deliver incomplete Mn removal unless pH/alkalinity and catalytic surfaces are favourable (Neculita & Rosa, 2019; Lafont et al., 2026).

Complexation with inorganic ligands (e.g., carbonate, sulphate) and competition with major cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}) and transition metals can further shift Mn speciation and influence its reactivity and treatability. These interactions help explain why Mn can remain in solution after Fe removal and why Mn compliance often becomes the limiting step in mine water treatment systems (Neculita & Rosa, 2019; Bao et al., 2025). Table 1 summarises well-known technologies into chemical, physicochemical, membrane-based, and biological/electrochemical categories to support a structured comparison and a decision-oriented synthesis (Bao et al., 2025).

Chemical methods (neutralisation/precipitation and oxidative precipitation)

Chemical treatment remains the backbone of manganese removal in many mining and metallurgical applications because it is relatively robust, scalable, and compatible with existing infrastructure. Conventional neutralisation typically targets hydroxide precipitation, but Mn(II) requires higher alkalinity than Fe/Al to reach low dissolved concentrations. In AMD systems, Mn precipitation during “classical” hydroxide neutralisation often starts around pH ~9, while high Mn recovery may require pH ~10.5, which increases alkali consumption and sludge production (Shekarian et al., 2022). These requirements are a major reason why Mn removal is frequently staged (e.g. Fe/Al removal at lower pH followed by dedicated Mn removal at higher pH) (Bao et al., 2025).

Table 1. *Comparative decision matrix for manganese removal technologies in mining and metallurgical wastewater*

Technology group	Typical Mn range (mg/L)	Target role	Key advantages	Key limitations	Sensitivity to water matrix	Residuals / by-products	Typical application stage
Chemical precipitation (pH control)	>10-100+	Bulk removal	Simple, widely applied, cost-effective for high loads	Requires high pH for Mn, incomplete removal at low concentrations	Moderate-high (pH, alkalinity, competing ions)	Large sludge volumes	Primary treatment
Oxidative precipitation	5-100	Bulk + improved removal	Enhances Mn removal efficiency, relatively robust	Oxidant demand, kinetics can be slow without catalysts	High (Eh, pH, catalytic surfaces)	Metal-rich sludge	Primary / secondary
Adsorption	<10-50	Polishing / selective removal	High selectivity (material-dependent), flexible	Limited capacity, regeneration required	High (competing ions, ionic strength)	Spent sorbents / regeneration waste	Tertiary (polishing)
Ion exchange	<20	Polishing / selective removal	High efficiency at low concentrations	Fouling, sensitivity to competing ions, regeneration chemicals	Very high	Regeneration brine	Tertiary (polishing)
Coagulation–flocculation	Variable	Support / polishing	Improves solid–liquid separation, simple operation	Limited for dissolved Mn(II) without prior oxidation	Moderate	Chemical sludge	Secondary / polishing
Membrane processes (NF/RO)	<50 (feed-dependent)	Advanced removal / reuse	Very low residual concentrations, enables water reuse	Fouling, scaling, high energy demand	Very high	Concentrate stream	Advanced / reuse
Biological systems	<1-50	Sustainable removal	Low chemical input, potential for passive operation	Sensitive to environmental conditions, slower kinetics	High (pH, temperature, variability)	Biogenic solids	Passive / semi-passive
Electrochemical methods	1-100	Controlled removal	Reduced chemical addition, *in situ* oxidant generation	Energy demand, electrode stability, scale-up challenges	Moderate	Sludge / electrode wear products	Emerging / hybrid

Oxidative precipitation targets the conversion of soluble Mn(II) to insoluble Mn(III/IV) oxides using oxidants, such as oxygen (aeration), chlorine-based oxidants, permanganate, persulphate, or ozone. A key point is that, although Mn(II) oxidation can be thermodynamically favourable near neutral pH, reaction kinetics are often the true bottleneck, necessitating either longer contact times or catalytic surfaces/media to achieve practical rates (Neculita & Rosa, 2019; Bao et al., 2025). Within AMD contexts, oxidative precipitation has been reported to enable high Mn removal at milder pH. For instance, oxidative precipitation using permanganate has been reported to achieve ~99% Mn recovery at pH ~7 (as discussed in the context of AMD treatment and recovery) (Shekarian et al., 2022).

Oxidative precipitation can be leveraged not only for removal but for resource recovery. Shekarian et al. (2022) developed a chemical-free process using ozone oxidative precipitation, achieving >95% recovery of Co and Mn from AMD and producing a solid with ~54.6% Mn, highlighting the potential to couple treatment with value generation. Nevertheless, oxidant demand and performance remain strongly dependent on water matrix (alkalinity, organics, competing reductants), and practical design typically balances chemical consumption against residence time and downstream solids separation (Bao et al., 2025).

A persistent operational challenge across chemical approaches is the generation of Mn-bearing sludge (often mixed

with Fe/Al hydroxides/oxides). Sludge volumes, stability, and disposal options can dominate capital expenditure (CAPEX), operating expenditure (OPEX), and sustainability impacts, particularly where elevated pH operation is required for Mn (Neculita & Rosa, 2019; Bao et al., 2025). Accordingly, chemical methods are most advantageous for bulk removal at moderate-high Mn concentrations, often followed by polishing steps when very low residual Mn targets are required.

Physicochemical methods (adsorption, ion exchange, coagulation/flocculation)

Physicochemical methods are commonly applied as polishing steps or where selective removal at lower Mn concentrations is required. Adsorption performance depends on surface chemistry, available binding sites, and competition with co-ions. Recent studies show that material modification can substantially increase Mn uptake. For example, potassium permanganate-modified bamboo biochar achieved a Langmuir maximum adsorption capacity of 21.277 mg/g compared with 0.803 mg/g for the unmodified biochar (Wilamas et al., 2023).

In addition to chemically modified systems, biomass-derived adsorbents obtained from industrial residues have also demonstrated promising performance (removal efficiencies above 84.62%). For instance, raw walnut and cherry wood shavings and their corresponding biochars produced via pyrolysis exhibited Mn(II) adsorption capacities in the range of approximately 2.1-2.5 mg/g, with biochars showing improved performance due to increased surface area and porosity (Lavrova and Yavorov, 2026). While these capacities are lower than those reported for highly engineered or chemically modified sorbents, they are comparable to other low-cost lignocellulosic materials and offer advantages in terms of availability, sustainability, and process simplicity.

In complex real matrices, adsorption can remain effective but typically requires higher doses and longer contact times: pruning-derived biochar achieved a maximum Mn removal of 86.2% at pH 7, 0.2 g/L adsorbent dose, and 180 min contact time (Rabiee Abyaneh et al., 2024). Overall, these results support the use of adsorption primarily as a polishing or selective step, especially after upstream processes reduce competing loads.

Ion exchange (IX) can provide high selectivity under controlled conditions but is sensitive to competing cations typical of mine water (Ca^{2+}/Mg^{2+}). Quantitative resin performance data demonstrate both capacity and selectivity constraints. For example, Purolite S950 achieved Langmuir maximum loadings of ~37.9 - 41.5 mg/mL-resin for Mn^{2+}, with kinetics consistent with pseudo-second order behaviour and pore-diffusion control (Amengol et al., 2024). Such data are valuable for comparative assessment, but practical application must account for regeneration chemical demand and the handling of concentrated regenerant brines (Bao et al., 2025).

Coagulation/flocculation can assist Mn removal mainly when Mn is present in particulate/colloidal form or after partial oxidation generates MnO_x particles that can be aggregated and separated. In most mining/metallurgical cases, coagulation is not a stand-alone Mn(II) solution but a supporting step integrated with oxidation and solid-liquid separation (Patil et al., 2016; Bao et al., 2025). Overall, physicochemical methods are most effective when combined with upstream conditioning (pH/oxidation) and selected based on matrix composition, regeneration strategy, and secondary waste management requirements.

Membrane-based processes (UF/NF/RO and hybrids)

Membrane technologies are increasingly considered where stringent discharge limits or water reuse goals justify higher costs and operational complexity. Ultrafiltration (UF) is generally ineffective for dissolved Mn(II) unless preceded by oxidation that converts Mn into filterable particulate forms, whereas nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) can achieve high Mn rejection through size/charge exclusion (Patil et al., 2016; Bao et al., 2025).

Quantitative studies demonstrate the strong role of water chemistry in membrane performance. In a polyamide nanofiltration and ultrafiltration membrane (PA-NF/PA-UF) study using synthetic groundwater with 50 mg/L Mn, the best permeate quality for Mn was achieved at pH 9, reaching 0.4 mg/L Mn with PA-NF, while very poor performance was observed at acidic pH (e.g. 42.2 mg/L Mn in permeate at pH 3) (Norherdawati et al., 2017). The same work indicates Mn rejection increased from ~26% at pH 5 to >70% at pH 7 and >95% at pH 9, highlighting that pH-dependent speciation and membrane surface charge strongly influence Mn separation. A parametric nanofiltration study using a spiral-wound hydrophilised polyamide (HPA-400) nanofiltration membrane reported a maximum Mn rejection of 92.58% at 100 mg/L feed, 9 bar TMP, and 1.050 L/min feed flow (Patil et al., 2017).

Reverse osmosis (RO) can achieve very high Mn removal but shifts the challenge toward concentrate management and scaling control. For example, RO treatment of raw freshwater retained ~99% of Mn^{2+} (alongside Fe^{2+}), demonstrating high intrinsic rejection under controlled conditions (Livinalli et al., 2023). In mining/metallurgical matrices, however, fouling and scaling risks (sulphate, hardness, suspended solids) typically require robust pre-treatment and careful antiscalant/cleaning strategies, while the reject stream may require additional treatment or secure disposal (Bao et al., 2025). Consequently, membrane systems are most often implemented as part of hybrid systems rather than as stand-alone Mn solutions.

Biological and electrochemical approaches

Biological manganese removal leverages Mn-oxidising microorganisms that catalyse Mn(II) oxidation to insoluble MnO_x under suitable conditions. While traditionally applied in drinking water and passive systems, recent mine-relevant studies demonstrate strong performance when biogeochemical conditions are engineered appropriately. Watanabe et al. (2024) operated *in situ* continuous-flow bioreactors for mine drainage (influent ~20 mg/L Mn(II)) and achieved >98% Mn(II) removal at a hydraulic retention time of 0.5 days without organic substrate amendment, with biogenic Mn oxides accumulating on limestone carriers. Such results support the potential of semi-passive or biologically assisted systems for mine water, provided stability can be maintained across seasonal and influent variability.

Biological filtration evidence from related water treatment contexts also highlights the achievable low residual Mn under

favourable conditions. Biological granular activated carbon (GAC) filtration reduced Mn(II) from 400 µg/L to 10 µg/L after a ~20-day start-up period, outperforming sand filtration under unchlorinated conditions (Chen et al., 2023). Although this is not a mining matrix *per se*, it provides quantitative criteria for biologically mediated Mn removal and underscores sensitivity to disinfectants/oxidant residuals.

Electrochemical approaches, in particular electrocoagulation (EC), offer controlled *in situ* generation of coagulants and reactive species, potentially reducing chemical dosing and simplifying automation. Safwat et al. (2023) reported a maximum Mn removal of 96.5% after 60 min at initial pH 7 and current density 10 mA/cm^2 (with electrolyte support), while Mn removal in real wastewater reached 91.3% after 60 min, alongside substantial COD reduction. In another study, combining ultrasound with electrocoagulation achieved 89.0% Mn removal, though the authors highlight that cost and equipment considerations can limit scalability depending on configuration (Posavčić et al., 2022). The key barriers remain energy demand, electrode passivation, sludge handling, and scale-up reliability - yet EC is increasingly attractive as a flexible polishing or hybrid component when conventional precipitation alone cannot meet discharge targets (Bao et al., 2025).

Comparative discussion and selection criteria

Selecting an appropriate Mn removal strategy requires multi-criteria evaluation that balances performance with matrix compatibility, cost, and sustainability (Figure 1). Across mining and metallurgical applications, literature consistently indicates that no single technology is universally optimal. Instead, performance is strongly shaped by influent chemistry (pH, alkalinity, sulphate, hardness), co-metals, and target residual Mn levels (Neculita & Rosa, 2019; Bao et al., 2025). For high Mn loads, chemical neutralisation/oxidation remains the most common bulk approach, but may require elevated pH (often ≥9) unless oxidants/catalysts are used (Shekarian et al., 2022). Where very low residual Mn is required, adsorption/ion exchange or membranes can serve as polishing steps, though at the cost of regeneration or concentrate management (Patil et al., 2017; Livinalli et al., 2023; Amengol et al., 2024).

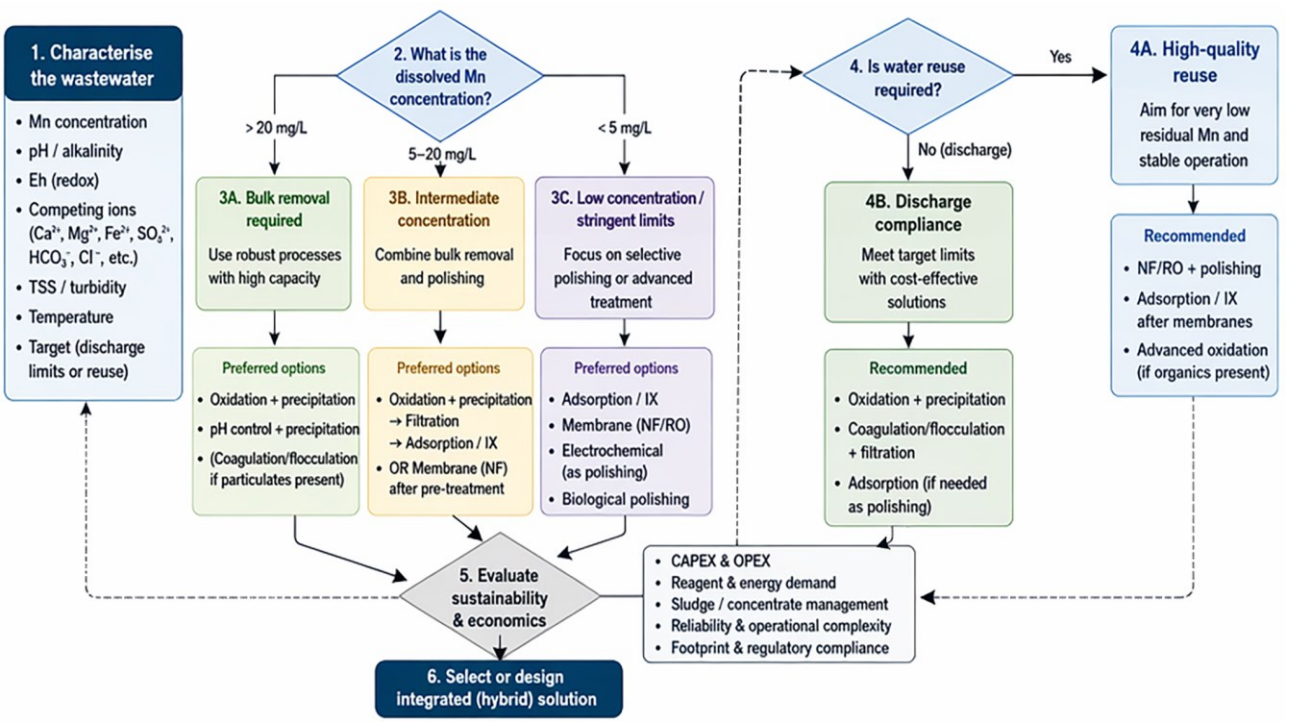


Fig. 1. Decision framework for selecting and integrating manganese removal technologies

Biological and electrochemical methods provide promising pathways to reduce chemical consumption or improve selectivity, but site-specific validation is essential. For mine drainage specifically, pilot evidence shows that biologically driven Mn oxidation can reach >98% removal under engineered conditions (Watanabe et al., 2024), while EC can deliver >90% removal within short reaction times (Safwat et al., 2023). Overall, integrated systems, consisting of bulk removal followed by targeted polishing, remain the most realistic configuration for consistent compliance under variable industrial conditions (Bao et al., 2025; Neculita & Rosa, 2019). However, the process selection should be driven by Mn concentration thresholds and matrix complexity rather than nominal removal efficiency alone.

Conclusions

Manganese removal from mining and metallurgical wastewater remains challenging due to Mn(II) persistence, kinetic limitations of oxidation near neutral pH, and strong sensitivity to water matrix composition. Chemical precipitation and oxidative precipitation are robust for bulk removal but often generate sludge and may require high pH unless oxidants/catalysts are used. Physicochemical and membrane methods can achieve deeper removal, but introduce regeneration or concentrate management constraints. Emerging biological and electrochemical approaches can reduce chemical inputs and deliver high efficiencies under controlled conditions, yet require

careful scale-up and stability assessment. Consequently, hybrid and decision-based treatment design remains the dominant direction for practical implementation.

Acknowledgements. This research is in performance of Project BG05SFPR001-3.004-0002-C02 “Development and improvement of professional and interdisciplinary education in technical and economic sciences and enhancement of the research capacity of the extractive industry through project-based doctoral studies” funded by Programme “Education”, co-funded by the European Union.

References

Amengol, B. P. C., Pires, R. C., & Leão, V. A. (2024). Effect of the type of ion-exchange resin on Mn^{2+} adsorption in the presence of competing cations. *Physicochemical Problems of Mineral Processing, 60*(2), 187844. https://doi.org/10.37190/ppmp/187844

Bao, H., Meng, X., Wu, M., & Sun, W. (2025). A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater. *Journal of Water Process Engineering, 75*, 107894. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107894

Chen, Q., Li, G., Lu, Z., Su, Y., Wu, B., & Shi, B. (2023). Efficient Mn(II) removal by biological granular activated carbon filtration. *Journal of Hazardous Materials, 458*, 131877. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131877

de Lima, J. P. M., Amaral, M. C. S., & Rezende Borges de Lima, S. C. (2025). Sustainable water management in the mining industry: Paving the way for the future. *Journal of Water Process Engineering, 71*, 107239. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107239

Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. (2020). Official Journal of the European Union.

Doyle, S., & Figueroa, L. (2024). Electrolytic manganese removal from acid rock drainage. In: B. Kleinmann, J. Skousen, & C. Wolkersdorfer (Eds.), *West Virginia Mine Drainage Task Force Symposium, 15th International Mine Water Association Congress* (pp. 151-156). International Mine Water Association.

Iyare, P. U., Ndzi, E. N., Orisakwe, O. E., & Sone, L. E. (2019). The effects of manganese exposure from drinking water on school-age children: A systematic review. *NeuroToxicology, 73*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.neuro.2019.02.013

Lafont, C., Vaxelaire, S., Gelabert, A., Joulian, C., Thouin, H., Duré, F., Charron, M., Gorny, J., Vantelon, D., Battaglia-Brunet, F., & van Hullebusch, E. D. (2026). Manganese removal in a full-scale constructed wetland for passive mine water treatment: Environmental factors and microbial communities. *Water Research, 295*, 125539. https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125539

Lavrova, S., & Yavorov, N. (2026). Potential of Wood Processing Residues as Eco-Friendly Adsorbents for Wastewater Treatment. *Materials, 19*(3), 578. https://doi.org/10.3390/ma19030578

Livinalli, N. F., Silvestre, W. P., Duarte, J., Peretti, I., & Baldasso, C. (2023). Study of reverse osmosis performance for manganese and iron removal from raw freshwater. *Chemical Engineering Communications, 210*(11), 1961–1971. https://doi.org/10.1080/00986445.2023.2169681

Mahlohla, M. B., Masindi, V., Muedi, K. L., Tekere, M., Baloyi, J. S., & Foteinis, S. (2026). Resource recovery and water reclamation from acid mine drainage: Market analysis, industry trends, and future research directions. *Desalination and Water Treatment, 325*, 101632. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2026.101632

Matebese, F., Mosai, A. K., Tutu, H., & Tshentu, Z. R. (2024). Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review. *Heliyon, 10*(3), e24730. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24730

Neculita, C. M., & Rosa, E. (2019). A review of the implications and challenges of manganese removal from mine drainage. *Chemosphere, 214*, 491–510. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.106

Nguegang, B., & Ambushe, A. A. (2025). Sustainable acid mine drainage treatment: A comprehensive review of passive, combined, and emerging technologies. *Environmental Engineering Research, 30*(4), 240592. https://doi.org/10.4491/eer.2024.592

Norherdawati, W. M. A., Abdul, W. M., & Siti, R. S. A. (2017). Iron and manganese removal by nanofiltration and ultrafiltration membranes: Influence of pH adjustment. *Malaysian Journal of Analytical Sciences, 21*(1), 149–158. https://doi.org/10.17576/mjas-2017-2101-17

Patil, D. S., Chavan, S. M., & Oubagaranadin, J. U. K. (2016). A review of technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 4*(1), 468–487. https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.028

Patil, D. S., Oubagaranadin, J. U. K., & Chavan, S. M. (2017). Studies on the removal of manganese from synthetic wastewaters by nanofiltration - A parametric and modeling study. *Desalination and Water Treatment, 88*, 93-105. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21396

Posavčić, H., Vouk, D., & Halkijević, I. (2022). The effects of ultrasound and electrocoagulation on removal of manganese from wastewater. *Engineering Review, 42*(2). https://doi.org/10.30765/er.1734

Rabiee Abyaneh, M., Nabi Bidhendi, G., & Daryabeigi Zand, A. (2024). Pb(II), Cd(II), and Mn(II) adsorption onto pruning-derived biochar: Physicochemical characterisation, modelling and application in real landfill leachate. *Scientific Reports, 14*, 3426. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54028-6

Safwat, S. M., Mohamed, N. Y., & El-Seddik, M. M. (2023). Performance evaluation and life cycle assessment of electrocoagulation process for manganese removal from wastewater using titanium electrodes. *Journal of Environmental Management, 328*, 116967. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116967

Shekarian, Y., Vaziri Hassas, B., Rezaee, M., & Pisupati, S. V. (2022). Development of a chemical-free process utilising ozone oxidative precipitation for the recovery of cobalt and manganese from acid mine drainage. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10*(5), 108533. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108533

Watanabe, M., Tum, S., Katayama, T., Gotore, O., Okano, K., Matsumoto, S., Yasutaka, T., & Miyata, N. (2024). Accelerated manganese(II) removal by *in situ* mine drainage treatment system without organic substrate amendment: Metagenomic insights into chemolithoautotrophic manganese oxidation via extracellular electron transfer.

Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(5), 113314. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113314

Wilamas, A., Vinitnantharat, S., & Pinisakul, A. (2023). Manganese adsorption onto permanganate-modified bamboo biochars from groundwater. *Sustainability, 15*(8), 6831. https://doi.org/10.3390/su15086831

Yang, Y., Li, B., Li, T., Liu, P., Zhang, B., & Che, L. (2023). A review of treatment technologies for acid mine drainage and sustainability assessment. *Journal of Water Process Engineering, 55*, 104213. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104213

SYNERGY BETWEEN TRANSPORT AND ENERGY: PHOTOVOLTAIC PANELS ON CONVEYOR BELTS

Martin Pushkarov, Danail Terziyski

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Bulgaria; E-mail: m.pushkarov@mgu.bg; d.terzyiski@mgu.bg

ABSTRACT: The integration of photovoltaic (PV) panels on belt conveyors offers a new approach for hybrid transport systems with electricity generation. The article analyses the technical requirements for the design of rubber conveyor belts, the selection of suitable photovoltaic modules, and solutions for protection against mechanical and climatic impacts. The possibilities for increasing energy efficiency through integrated monitoring and management systems are examined. Two types of structures for mounting photovoltaic panels on belt conveyor sections are studied. Examples are presented of the application in industrial sectors like mining, logistics, and other areas where such hybrid technology can increase efficiency and sustainability. The synergy between transport and energy is emphasised as an innovative model that combines functionality, energy independence, and economic feasibility.

Key words: synergy, belt conveyor, hybrid systems, sustainability, industrial innovations, innovations, transport – energy, FEM, Solidworks, Simulation.

СИНЕРГИЯ МЕЖДУ ТРАНСПОРТ И ЕНЕРГИЯ: ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ ВЪРХУ ЛЕНТОВИ ТРАНСПОРТЬОРИ

Мартин Пушкаров, Данаил Терзийски

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, България

РЕЗЮМЕ: Интеграцията на фотоволтаични (ФВ) панели върху лентови транспортьори предлага нов подход за хибридни транспортни системи с производство на електроенергия. В статията се анализират техническите изисквания към конструкцията на гумено-транспортни ленти, изборът на подходящи фотоволтаични модули и решенията за защита срещу механични и климатични въздействия. Разгледани са възможностите за повишаване на енергийната ефективност чрез интегрирани системи за мониторинг и управление на добива. Изследвани са два вида конструкции за монтаж на фотоволтаични панели върху секциите на лентовите транспортьори. Представени са примери за приложение в индустриални сектори като минното дело, логистиката и други направления, където такава хибридна технология може да повиши ефективността и устойчивостта. Подчертава се синергията между транспорт и енергия като иновативен модел, който съчетава функционалност, енергийна независимост и икономическа целесъобразност.

Ключови думи: синергия, гумено-транспортни ленти (ГТЛ), хибридни системи, устойчивост, индустриални иновации, иновации, транспорт – енергия, МКЕ, Solidworks, Simulation.

Introduction

Energy efficiency and sustainable production are among the key challenges facing the industrial sector today. Transport in a large part of industry is carried out by belt conveyors (Wang et al., 2023), which represent an essential component in the mining, metallurgical, and logistics industries, enabling efficient transport of materials over long distances. Conveyor systems are highly efficient but remain “significant consumers of electrical energy in mining enterprises” (Król et al., 2020).

These types of system are often installed outdoors and occupy considerable areas, while simultaneously requiring substantial amounts of electrical energy for their operation. On the other hand, the development of photovoltaic (PV) technologies provides the possibility for direct conversion of solar radiation into electrical energy. The possibility of integrating PV panels onto existing industrial facilities offers hybrid systems: creating a renewable energy source and improving the utilisation of available areas without additional land development, but this also leads to additional challenges to be addressed, as continuous movement, vibrations, dust, water, and temperature fluctuations impose high requirements on the mechanical and electrical durability of photovoltaic modules. In this context, designing a reliable and efficient integration requires careful selection of materials, mounting methods, and electrical configurations, as well as calculations of the expected energy efficiency.

The present paper aims to analyse the technical possibilities and limitations of installing photovoltaic panels on rubber belt conveyors, with attention given to the following factors: selection of appropriate PV technologies and panels; mounting and fastening methods resistant to operational loads; energy efficiency and potential for electricity generation; economic feasibility; and the impact on the sustainability of industrial production. Photovoltaic systems are already being implemented in a number of operating mines worldwide as an alternative energy source (Renewable and Sustainable Energy Reviews, Review of Photovoltaic and Wind Power Systems Utilised in the Mining Industry - 2017).

In recent years, increasing interest has been observed in the integration of photovoltaic systems into industrial infrastructure, including rooftops, façades, noise barriers, and transport facilities. Similar studies show that the use of already built-up or functional areas for electricity generation significantly reduces the carbon footprint and optimises the energy independence of enterprises.

The application of this approach to belt conveyors is a relatively new and insufficiently explored direction, combining the principles of mechanical and electrical engineering. In addition to the technical challenges, economic aspects are also of key importance—investment cost, payback period, and the effect on operational expenses. Conducting such an analysis is important not only for assessing the feasibility of the idea, but also for establishing a foundation for future standards and industrial applications (IEA, 2023).

Photovoltaic systems for energy conversion

Photovoltaic systems are technologies for the direct conversion of solar radiation into electrical energy through the

photoelectric effect, realised in semiconductor photovoltaic cells, most commonly based on crystalline or amorphous silicon. The system typically includes solar panels for generating direct current (DC), an inverter for the conversion to alternating current (AC), structural mounting elements for installation on a given structure, energy storage batteries (in some cases), and control systems for managing the production and consumption of the generated electricity.

They offer significant environmental and economic benefits, such as reducing the carbon footprint and energy costs, while also providing the possibility for autonomous operation, integration into the electrical grid, or operation as a supplementary system (a hybrid installation that draws power from the electrical grid while additionally supplying electricity from the photovoltaic plant).

The main disadvantage of this type of technology at present is the high initial investment cost. Figure 1 shows a schematic diagram of a photovoltaic system.

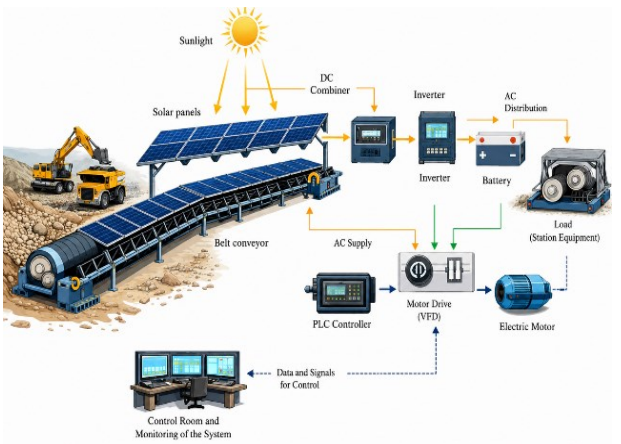


Fig. 1. Schematic diagram of a photovoltaic system

The present paper examines the installation of a photovoltaic system on rubber belt conveyors or along their route. Two types of photovoltaic (solar) panels are considered:

Rigid monocrystalline photovoltaic panels with the following technical parameters: dimensions L/H/W, mm – 1730/1118/30 mm and approximate weight of 22 kg. The product warranty from different manufacturers is about 20 years, with a 25-year power output warranty; approximate power 400–430 Wp; panel efficiency 20–22%; protection standard IP67;

Flexible monocrystalline photovoltaic panels with the following technical parameters: dimensions L/H/W, mm – 935/590/1.8 mm and approximate weight of 2.49 kg. The product warranty from different manufacturers is about 20 years, with a 25-year power output warranty; approximate power 100 Wp; panel efficiency 21%; protection standard IP67.

The photovoltaic panels described above are used on different structures mounted on a section of a rubber belt conveyor. In this study, part of the belt conveyor (one section) is considered in order to link it with a mathematical model for efficiency, the theoretically realised power from photovoltaic panel generation, the approximate installation costs, and the return on investment.

The developed approach allows evaluation of the technical applicability and economic efficiency of the system by combining engineering parameters and energy calculations within a unified analytical framework. This creates the basis for future optimisation of similar hybrid solutions in industrial conditions.

Rubber Belt Conveyors (Belt Conveyors)

Rubber belt conveyors, also referred to as belt transport conveyors, are used in many industries for transporting various materials. In the mining industry, they are applied for transporting soft and medium-hard rocks, as well as for conveying mineral resources in bulk or finely crushed form. This type of transport offers continuity, high productivity (resulting from the achievable speed), transportation at relatively steep inclination angles (12–18%), automation, centralised control, and other advantages.

The width of the conveyor belt is selected according to the mine’s requirements, typically ranging from 800 to 3600 mm, depending on the required capacity. The material transport speed is usually within the range of 1–6 m/s. In the latest conveyor systems, especially those of shorter length, the drive is implemented with frequency control to regulate the transport speed.

In the mining industry, rubber belt conveyors are classified into the following types: face conveyors, main conveyors, and stacker conveyors. The present study considers only the main conveyors, also referred to as trunk or connecting conveyors. In practice, their length can be extended or shortened, but they are generally kept in operation for long periods. Another important factor for selecting main conveyors is that they rarely have additional equipment operating together with them.

In this study, rubber belt conveyors with belt width of Bbelt=1800 mm and 2250 mm are considered, where the conveyors are constructed from separate sections along their length. Belt conveyors used in the mining industry consist of the following elements: a drive station (where the operator cabin, conveyor drives, tensioning system, and other components are usually installed), intermediate sections along their length (where idler rollers for the belt are mounted on the structure), and a return or turning station.

The element of the rubber belt conveyor considered in this paper is a single conveyor section with the following parameters:

- Overall dimensions (L/H/W, mm) – 6000/1610/3810 mm;
- Total weight of the section Gsection=3160 kg;
- Section operating with a conveyor belt width Bbelt = 1800 mm;
- Load from the section to the ground without material Gground = 0.15 kg/cm²;
- Load from the section to the ground with material Gground = 0.29 kg/cm².

Two types of structure for mounting photovoltaic panels on the belt conveyor sections are considered. The data presented are based on (Koprev & Aleksandrova, 2022).

Considered structures

In this study, an element of a transport system is examined, namely a section of a rubber belt conveyor. The section is constructed from a steel structure, on which upper supporting idler sets (roller carrying idlers), a lower supporting roller station (supporting the belt from below), and the corresponding pontoons of the section are mounted. The section is shown in Fig. 2 and is designed for a belt width of B=1800 mm; its parameters are presented above.

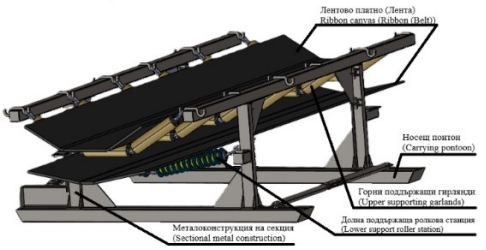


Fig. 2. Section of a rubber belt conveyor with belt width B=1800 mm

Based on the section shown in Fig. 2, two mounting options have been developed for covering the rubber conveyor belt. In this way, no additional land around the belt conveyor is used—only the existing conveyor structure.

Option 1 is presented in Fig. 3. In this option, flexible photovoltaic panels with dimensions L/H/W, mm – 935/590/1.8 mm are used, closing the space above the conveyor section diametrically. In this manner, electrical energy is generated during solar irradiation, dust emissions during conveyor operation are reduced, noise is decreased, and under adverse meteorological conditions the transported material is protected from moisture.

The approximate power that can be generated by a single flexible photovoltaic panel is about 150 W. In the presented configuration, a total of 50 flexible panels are installed. The total installed power is approximately: 50 pcs × 150 W = 7500 W.

The designed supporting structure is made of metal profiles and is intended to be mounted onto the conveyor section using mounting brackets and rubber dampers placed between the photovoltaic support structure and the conveyor section structure, in order to minimise vibrations from the operation of the transport system. The frame is designed to withstand all loads (snow, wind, and rain), as well as the self-weight of the panels, based on the standards listed below.

The weight of the metal structure together with the photovoltaic panels is Gvar1=300 kg. The total weight of the section, including the conveyor belt, the material on the belt, and the section components, is: Gtotal = Gsection + Gvar1 + Gmaterial = 3710 + 300 + 2652 = 6662 kg.

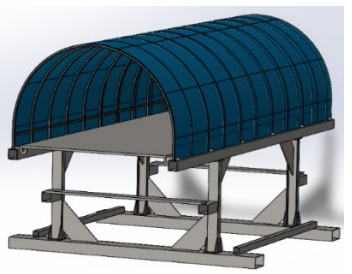


Fig. 3. Diametrical covering of a belt conveyor section with installed flexible photovoltaic panels

Option 2 is presented in Fig. 4. In this configuration, rigid monocrystalline photovoltaic panels are used with the following dimensions: L/H/W, mm – 1730/1118/30 mm – 10 panels installed of this size; and 8 panels installed with dimensions 1450/490/30 mm. These panels form a dual-pitched structure covering the space above the belt conveyor section. In this way, electrical energy is generated during solar irradiation, dust emissions during conveyor operation are reduced, noise is decreased, and under adverse meteorological conditions the transported material is kept dry.

Fig. 4. Dual-pitched covering of a belt conveyor section with installed photovoltaic panels

The approximate power generated by one photovoltaic panel is about 400 W (for the 10 panels) and 250 W (for the 8 panels installed below in a vertical arrangement). In the presented configuration, a total of 18 photovoltaic panels are installed. The total installed power is approximately: 10 pcs × 400 W = 4,000 W and 8 pcs × 250 W = 2000 W, or a total of 6000 W.

In this option, the supporting structure on which the photovoltaic panels are mounted includes one vertical section where 8 panels are mounted vertically, while the inclined dual-pitched part has an angle of 42 degrees. This angle is selected as an average optimal angle for maximum energy yield on the territory of the Republic of Bulgaria.

The designed supporting structure is made of metal profiles and is intended to be mounted onto the conveyor section using mounting brackets and rubber dampers placed between the photovoltaic support structure and the conveyor section structure in order to minimise vibrations from the operation of the transport system. The frame is designed to withstand all loads (snow, wind, and rain), as well as the self-weight of the panels, based on the standards listed below.

The weight of the metal structure together with the photovoltaic panels is Gvar2 = 600 kg. The total weight of the section, including the conveyor belt, the material on the belt, and the section components, is: Gtotal = Gsection + Gvar2 + Gmaterial = 3710+600+2652 = 6962 kg.

Experimental Study

The study is aligned with the main requirements for sizing and loading of structures and photovoltaic plants according to the following nationally applied standards:

- BDS EN 1991-1-3:2006/NA – “Snow Load” – the average value for the territory of the Republic of Bulgaria is 150–200 kg/m² (1.47–1.97 kN/m²), where the lower value applies when snow is removed and the higher value when it is not;
- BDS EN 1991-1-4:2005/NA – “Wind Load” – the average value for the territory of the Republic of Bulgaria is 0.3–0.4 kN/m²;
- For “Rain Load,” a limit of 25 mm is selected, corresponding to 0.245 kN/m².

The loads acting on the rubber belt conveyor section were determined through simulation using the Finite Element Method (FEM). The section was loaded using the *SolidWorks* software product, the *Simulation* module. For the calculation of the

original section, a simplified model was created to facilitate the computational process. As described above, two options for building a photovoltaic installation along the length and on the structure of the belt conveyor were considered, using the existing sections or the conveyor steel structure, so that no additional land areas around the conveyor are required.

Option 1 is presented in Fig. 5 – Fig. 10, where flexible photovoltaic panels are used to cover the conveyor belt. In addition to generating electrical energy from the covered conveyor, dust emissions (depending on the transported material) and operational noise are significantly reduced. The weight of one flexible photovoltaic panel is approximately 2.49 kg, and the total weight of Option 1 is Gvar1 = 300 kg. For this option, the following loads are applied: snow load Psnow = 1900 N/m², wind load Pwind = 400 N/m², rain load Prain = 250 N/m², together with the load from the transported material and the self-weight of the metal structure.

In this option, the total photovoltaic panel area is 26.19 m². It should be noted that the largest deflections and deformations from the conducted simulation studies occur in the conveyor belt itself, which is expected. The results obtained for the conveyor section structure are as follows:

- Deflection – min (0 mm); max (187.5 mm);
- Stresses – min (0.0363 kgf/cm²); max (1130.94 kgf/cm²);
- Deformation – min (0); max (0.658);
- Factor of safety (FOS) – min (2.1); max (6.60).

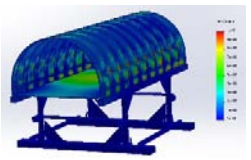


Fig. 5. Deflection in the structure due to loading.

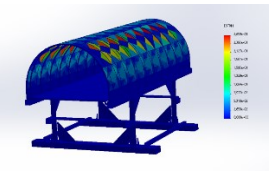


Fig. 6. Deformation in the structure due to loading.

Fig. 7. Stress in the structure due to loading.

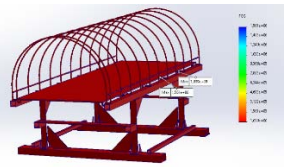


Fig. 8. Calculation of the factor of safety (FOS = 1.56).

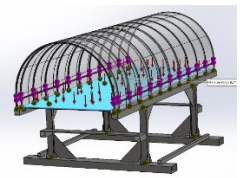


Fig. 9. Load from the material on the rubber belt $P_{мат}$=2500 N/m²

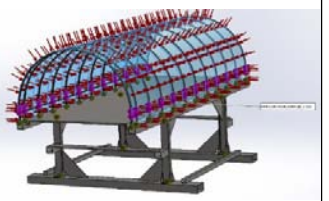


Fig. 10. Snow, wind, and rain loads acting on the roof. $P_{свд}$=2550 N/m²

Option 2 is presented in Fig. 11 – Fig. 16 where photovoltaic panels are used to cover the conveyor belt. In addition to generating electrical energy from the covered belt conveyor, dust emissions (depending on the transported material) and operational noise are significantly reduced. The weight of one photovoltaic panel is approximately 22 kg, and the total weight of Option 2 is Gvar2 = 600 kg.

For this option, the following loads are applied: snow load Psnow = 1900 N/m², wind load Pwind = 400 N/m², and rain load Prain = 250 N/m², together with the load from the transported material and the self-weight of the metal structure.

In this option, the total photovoltaic panel area is 25.03 m². It should be noted that the largest deflections and deformations from the conducted simulation studies occur in the conveyor belt itself, which is expected. The results obtained for the conveyor section structure are as follows:

- Deflection – min (0 mm); max (185 mm);
- Stresses – min (0.004319 kgf/cm²); max (1130.94 kgf/cm²);
- Deformation – min (0); max (0.00054);
- Factor of safety (FOS) – min (1.168); max (5.50).

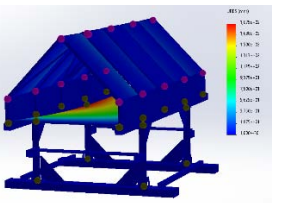


Fig. 11. Deflection in the structure due to loading.

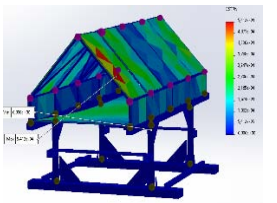


Fig. 12. Deformation in the structure due to loading.

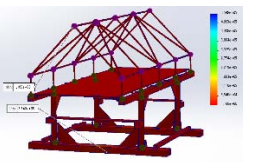


Fig. 13. Calculation of the factor of safety (FOS = 1.17).

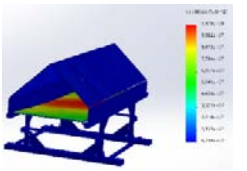


Fig. 14. Stress in the structure due to loading.

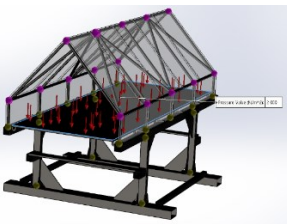


Fig. 15. Load from the material on the rubber belt. $P_{мат}$=2500 N/m²

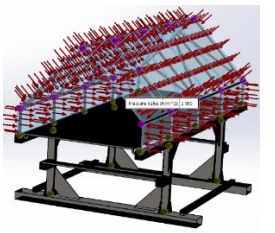


Fig. 16. Snow, wind, and rain loads acting on the roof. $P_{свд}$=2550 N/m²

Calculations for the productivity and power generated by the photovoltaic panels

Option 1 is designed to be constructed using flexible photovoltaic panels with an approximate power of 150 W per panel, with a total of 50 flexible panels installed. The total installed power is approximately: 50 pcs × 150 W = 7500 W.

The calculations are based on averaged data for the entire territory of Bulgaria. In this option, the total photovoltaic panel area is 26.19 m².

Average annual solar radiation for the territory of the Republic of Bulgaria:

- System efficiency: η_{system} = 0.85;
- Panel power: N_{system} = 50x150Wp = 7500 Wp;

- Standard irradiance value for Bulgaria: H_{static} = 1000 W/m2.

The real output power is calculated as:

$$N_{real} = N_{system} \cdot \eta_{system} \cdot \frac{H_{potentiol}}{H_{static}} = 9670.88\ W$$

Through the performed calculations, the approximate annual amount of electrical energy produced by the system is determined:

$$E_{year} = N_{system} \cdot H_{potentiol} \cdot \eta_{system} = 9670.88 \frac{kW}{h}$$

The calculation of the annual system productivity is based on a specific conveyor section with dimensions 6000 mm in length and 3810 mm in width. These values can be extended to a given total length of a belt conveyor. In practice, belt conveyors have various lengths, but many of them are approximately 200 m, 500 m, 800 m, 1300 m, 1500 m, and 2000 m. The approximate number of sections for the lengths listed above is as follows:

- 200 m conveyor length – 33 sections;
- 500 m conveyor length – 83 sections;
- 800 m conveyor length – 133 sections;
- 1300 m conveyor length – 216 sections;
- 1500 m conveyor length – 248 sections;
- 2000 m conveyor length – 333 sections.

Using these lengths, we divide them into 6 m (6000 mm) sections and calculate the approximate annual energy for each case.

$$E_{year-200m} = N_{system-33} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 411\ 476.39 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-500m} = N_{system-83} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 802\ 682.63 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-800m} = N_{system-133} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 1\ 286\ 226.38 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-1300m} = N_{system-216} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 2\ 088\ 909 \frac{kW}{h}$$

$$E_{\text{годишно}-1500m} = N_{system-248} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 2\ 398\ 377 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-2000m} = N_{system-333} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 3\ 220\ 401.38 \frac{kW}{h}$$

The calculations are based on theoretical assumptions, and it is recommended to implement a pilot section consisting of one conveyor segment in order to collect measured data and compare them with the theoretical calculations presented in this paper.

Option 2 is designed to be constructed using photovoltaic panels with an approximate power of 400 W or 250 W per panel. In this configuration, a total of 18 panels are installed. The total installed power is approximately: 10 pcs × 400 W = 4000 W and 8 pcs × 250 W = 2000 W, or a total of 6000 W.

The calculations are based on averaged data for the entire territory of Bulgaria. In this option, the total photovoltaic panel area is 25.03 m².

- Average annual solar radiation for the territory of the Republic of Bulgaria: $H_{potential}$ = 1517 kWh/m^2/year;
- System efficiency: η_{system} = 0.85
- Panel power: N_{system} = 18x333.33Wp = 6000 Wp;
- Standard irradiance value for Bulgaria: H_{static} = 1000 W/m2.

The real output power is calculated as:

$$N_{real} = N_{system} \cdot \eta_{system} \cdot \frac{H_{potential}}{H_{static}} = 7736.70\ W$$

Through the performed calculations, the approximate annual amount of electrical energy produced by the system is determined:

$$E_{year} = N_{system} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 7736.70 \frac{kW}{h}$$

The calculation of the annual system productivity is based on a specific conveyor section with dimensions 6000 mm in length and 3810 mm in width. These values can be extended to a given total length of a belt conveyor. In practice, belt conveyors have various lengths, but many of them are approximately 200 m, 500 m, 800 m, 1300 m, 1500 m, and 2000 m. The approximate number of sections for the lengths listed above is as follows:

- 200 m conveyor length – 33 sections;
- 500 m conveyor length – 83 sections;
- 800 m conveyor length – 133 sections;
- 1300 m conveyor length – 216 sections;
- 1500 m conveyor length – 248 sections;
- 2000 m conveyor length – 333 sections.

Using these lengths, we divide them into 6 m (6000 mm) sections and calculate the approximate annual energy for each case.

$$E_{year-200m} = N_{system-33} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 255\ 311.10 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-500m} = N_{system-83} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 642\ 146.10 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-800m} = N_{system-133} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 1\ 028\ 981.10 \frac{kW}{h}$$

$$E_{year-1300m} = N_{system-216} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 1\ 671\ 127.20\ kW/h$$

$$E_{year-1500m} = N_{system-248} \cdot H_{potential} \cdot \eta_{system} = 1\ 918\ 701.60\ kW/h$$

$$E_{year-2000m} = N_{system-333} \cdot H_{potewntial} \cdot \eta_{system} = 2\ 576\ 321.10\ kW/h$$

The calculations are based on theoretical assumptions, and it is recommended to implement a pilot section consisting of one conveyor segment in order to collect measured data and compare them with the theoretical calculations presented in this paper.When installing photovoltaic panels on the conveyor, the space between sections should be left uncovered to allow ventilation of the volume beneath the photovoltaic panels and, accordingly, to provide cooling for the entire belt system underneath.

The installation of photovoltaic panels on belt conveyors would lead to multiple benefits, most notably that part of the energy required for their operation could be generated by utilising the existing layout of the conveyor belt. The calculations presented above in this paper are theoretical, and the arrangement of each conveyor in practice varies; however, this does not change the fact that no additional land is required for photovoltaic installation, as only the conveyor section structure or the steel framework of the belt conveyor is used.

The main argument for initiating this study is that the territory of the Republic of Bulgaria has the following sunshine duration:

- 2000–2500 hours annually in most parts of the country;
- Up to 2800 hours annually in the southern and eastern regions (the Black Sea coast, the Plain of Upper Thrace);
- Around 1800–2000 hours in mountainous and northwestern regions.

Sunshine duration by regions in Bulgaria:

- Southeastern Bulgaria (Burgas, Sandanski, Haskovo) – 2500–2800 h/year;
- Central Bulgaria (Plovdiv, Stara Zagora) – about 2400–2600 h/year;
- Northern Bulgaria (Ruse, Pleven) – 2100–2300 h/year.
- Mountain regions (Smolyan, the Rila, the Pirin, the Stara Planina) – 1800–2000 h/year.
- Sofia – on average about 2100 hours of sunshine per year.

Economic evaluation of the variants

Description	Price	Quantity	Total price	Activity	Note
	euro	item/m./kg.	euro		
Steel structure for mounting photovoltaic panels	951.31	170 kg - 1 item	951.31	Fabrication of steel structure, delivery, and installation	var.1
Steel structure for mounting photovoltaic panels	845.27	200 kg - 1 item	845.27	Fabrication of steel structure, delivery, and installation	var. 2
Flexible photovoltaic panels – 150 W	297.6	50 items	14878.59	Delivery and installation	var. 1
Photovoltaic panels – 400 W	127.8	10 items	6391.15	Delivery and installation	var.2
Photovoltaic panels – 250 W	92	8 items	4601.63	Delivery and installation	var. 2
Control system (hybrid)	13300	1 item	13300	Delivery and installation	var. 1
Control system (hybrid)	11200	1 item	11200	Delivery and installation	var. 2
Battery	6391.1	1 item	6391.1	Delivery and installation	var. 1
Battery	5573.1	1 item	5573.1	Delivery and installation	var. 2
Inverter	2950	1 item	2950	Delivery and installation	var. 1
Inverter	2456	1 item	2456	Delivery and installation	var. 2

The estimated cost for constructing the photovoltaic power plant under Option 1 amounts to €38471.1. For Option 2, the estimated cost of constructing the photovoltaic power plant amounts to €15884.40.

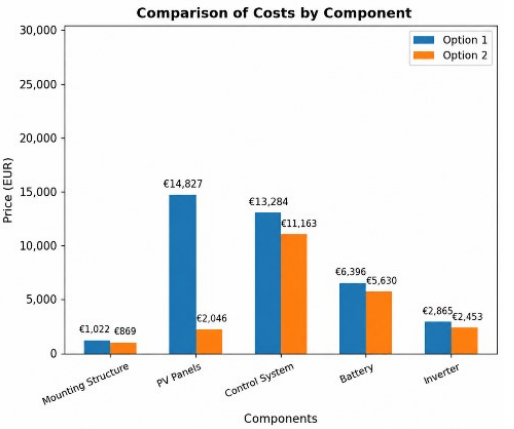


Fig. 17. Graphical representation of the costs per section for the individual components of the system

Conclusion

The conclusion confirmed by the performed calculations, the conducted study, the developed simulation models, as well as simulations carried out in different software products, is that the required investment is worthwhile. Even the smallest reduction in electricity costs on the free market represents a significant step towards sustainability and higher productivity. We preserve a large portion of land by not developing additional photovoltaic installations on it, reduce dust emissions, noise, moisture impact on the transported material, and other negative effects. The costs presented in the economic section are end-user values, and of course, with larger orders of components and parts, they may vary, potentially resulting in even greater cost efficiency.

References

International Energy Agency (IEA). (2023). *Trends in Photovoltaic Applications 2023* Report.

Konieczna-Fuławka, M. (2025). Energy-Saving Solutions Applied in Belt Conveyors. *Energies, A Literature Review.” Energies, 18(12), Article 3019*, pp. 1–16.

Koprev, I., Aleksandrova, E. (2022). *Otkrit dobiv na polezni izkopaemi*. Sofia, Izdatelska kashta “Sv. Ivan Rilski”, ISBN – 978-954-353-459-3 стр498.

Król, R. et al. (2020). Specific Energy Consumption of a Belt Conveyor System in a Continuous Surface Mine. *Energies, 13(19), 5214*, pp. 1–10.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Review of Photovoltaic and Wind Power Systems Utilised in the Mining Industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 75, August 2017, pp. 1386–1391.

Wang, L. et al. (2023). Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors. *Processes, 11(6), 1762.* Basel, Switzerland: MDPI.

MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE SUITABILITY OF COAL DEPOSITS IN THE PELAGONIAN BASIN FOR UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Radmila Karanakova Stefanovska, Zoran Panov, Risto Popovski, Blagica Doneva

Goce Delcev University, Faculty of technical and natural sciences, 2000 Shtip; E-mail: radmila.karanakova@ugd.edu.mk

ABSTRACT. Underground coal gasification (UCG) represents a modern technology for the utilisation of coal resources that are difficult to access or economically unfeasible for conventional mining. This paper presents a multi-criteria assessment of the suitability of coal deposits in the Pelagonian Basin for the application of underground coal gasification. The selection of a coal deposits suitable for UCG depends on a number of parameters related to coal properties, seam characteristics, hydrogeological conditions, and surface infrastructure. The most important factors include coal rank, seam thickness and depth, the type of overburden and underlying strata, permeability and porosity of the coal and surrounding rocks, geological characteristics, such as structural and tectonic features, groundwater level and its chemical composition, as well as proximity to surface infrastructure. For an integrated evaluation, a multi-criteria model was applied, enabling the ranking of coal deposits according to their suitability for the gasification process. The result indicates variable suitability of the analysed deposits, with certain zones standing out as having higher potential for the successful application of this technology.

Key words: underground coal gasification (UCG), Pelagonian Basin, coal, ecology, multi-criteria assessment.

МНОГОКРИТЕРИАЛНА ОЦЕНКА НА ПРИГОДНОСТТА НА ВЪГЛИЩНИТЕ НАХОДИЩА В ПЕЛАГОНИЙСКИЯ БАСЕЙН ЗА ПОДЗЕМНА ГАЗИФИКАЦИЯ НА ВЪГЛИЩА

Радмила Каранакова Стефановска, Зоран Панов, Ристо Поповски, Благица Донева

Университет „Гоце Делчев“, Факултет за природни и технически науки, 2000 Щип

РЕЗЮМЕ. Подземната газификация на въглища представлява съвременна технология за използване на въглищни ресурси, които са труднодостъпни или икономически неизгодни за конвенционален добив. В настоящата работа е представена многокритериална оценка на пригодността на въглищните находища в Пелагонийския басейн за прилагане на подземна газификация на въглища. Изборът на подходящо въглищно находище за подземна газификация на въглища зависи от редица параметри, свързани със свойствата на въглищата, характеристиките на пласта, хидрогеоложките условия и повърхностната инфраструктура. Най-важните фактори включват ранг на въглищата, дебелина и дълбочина на пласта, тип на покривните и отдолу лежащите скали, пропускливост и порестост на въглищата и околните скали, геоложки характеристики, като напр. структурни и тектонични особености, ниво на подземните води и техния химичен състав, както и близост до повърхностна инфраструктура. За цялостна оценка е приложен многокритериален модел, който позволява аранжиране на въглищните находища според тяхната пригодност за процеса на газификация. Резултатите показват променлива пригодност на анализираните находища, като определени зони се открояват с по-висок потенциал за успешно прилагане на тази технология.

Ключови думи: подземна газификация на въглища, Пелагонийски басейн, въглища, екология, многокритериална оценка.

1. Introduction

The energy situation in the world and the international marker for energy resources have drawn attention to the need for intensive and efficient implementation of the plan for ensuring a more secure energy future.

With the increasing need for energy, both in quantitative and qualitative terms, the need for the natural energy raw material base to be used in a techno-economic and ecologically optimal manners is becoming more pronounced.

Coal is still an important energy source in many countries; however, classical methods of exploitation are associated with significant economic, technical, and environmental challenges, especially when it comes to deep, thin or complex geological coal seams. In this context, underground coal gasification (UCG) is emerging as an innovative technology that enables the utilisation of coal resources *in situ*, without the need for traditional conventional exploitation methods. This should be especially relevant in our country, which does not have sufficient and structurally favorable reserves of energy raw materials. Coal deposits in this country represent the most important coal deposits in the region, with significant reserves and diverse geological conditions. The deposits from Pliocene complex taken as representative deposits are: the *Mariovo* deposit from the Mariovo basin and deposits in the Pelagon basin PJS in the *Suvodo* and *Živojno* open pits.

However, not all parts of the deposit are equally suitable for the application of underground gasification, which imposes the need for a systematic and scientifically based assessment of their suitability. Previous research conducted in the field of underground coal gasification has shown that a large number of pilot projects and tests have been conducted on almost all types of coal (from lignite to anthracite), at different depths, in layers with different lithologies, and under a variety of geological and hydrogeological conditions (Ghose, 2007). The success ranged from completely unsatadfactory to completely acceptable.

2. Determination of criterion functions for selecting a suitable site for underground gasification

Criteria that were highlighted when developing the model for the applicability of UCG are:

1) Type of coal: lower quality coal types, especially lignite and subbituminous types are recommended for UCG (Bialecka, 2009);
2) Seam thickness: research has shown that the ideal thickness of the coal seam is 5-10 m, with a minimum of 2 m. (Shafirovich, 2009)-(Thompson, 1976);

3) Depth of coal layer: greater than 12 m. This is a key factor that provides minimum conditions for performing underground coal combustion (Perkins G, 2005);
4) Ash content: not greater that 15% for idealised cases, according to English empirical recommendations. This is for idealised conditions. From the empirical data from coal in the Republic of North Macedonia, it shows ash contents much higher than those permitted, i.e. more than 30%;
5) Sulphur content: not exceeding 5%. The presence of sulphur is one of the main hypotheses (pyrite based) for the initiation of spontaneous combustion in coal;
6) Dip angle (inclination): greater than 5^0. According to research, combustion from the floor toward the roof sections of the coal seam is much easier to perform in steeply inclined seams, particularly from deeper to shallower parts;
7) Structure of the coal seam and the overburden: these are important for understanding the fracturing of the coal seam, as well as the overlying overburden layers. Determining fracture systems and the degree of fracturing are essential for the proper execution of underground combustion. More compact formations result in lower loss of the generated gases;
8) Hydrogeological conditions: the occurrence of groundwater and the permeability coefficient are important factors influencing the presence of water, which plays a key role in underground gasification;
9) Coal reserves, that cannot be mined using conventional exploitation methods at the current level of technological development;
10) Accessibility and infrastructure.

The first 5 criteria are the main criteria on which the model was defined. The remaining criteria are factors that are generally met by all analysed coal deposits which are the subject of this research.

3. Geological profile of coal deposits

3.1. The *Mariovo* coal deposit

The productive coal formation is represented by a single coal seam, which has a subhorizontal position with variable thickness (from 1.3-14.9 m) and a relative occurrence depth of 7,7 to 279 m. (Andreevski, 1995).

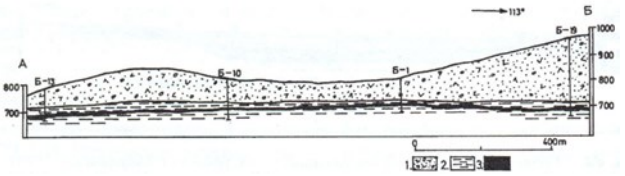


Fig. 1. Restrain geological profile of the *Mariovo* ore deposit 1-volcanic breccias and tuffs, 2-marls, 3-coal (Andreevski, 1995)

The following tables 1, 2, and 3 present the parameters in order of their importance for the correct selection of the location for underground gasification of representative coal deposits.

3.2. Coal deposit PJS in *Suvodol* open pit

The basal coal complex, with a maximum thickness of up to 150 m, is characterised by significant variability and heterogeneity, both in terms of the number of coal seams (1-13) and their thickness (0.60-21.10 m) (Andreevski, 1995).

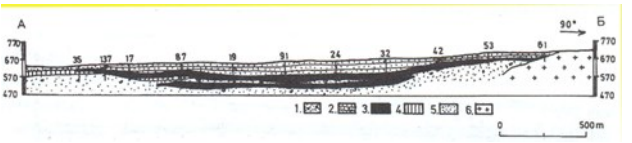


Fig. 2. Characteristic geological profile of the *Suvodol* ore deposit 1-yelow sands and gravels, 2-dry dust and sands, 3-green dry clays, 4-coal layer, 5-underlying sands, dust and coal clay, 6-green sands and dust, 7-gneiss (Andreevski, 1995)

Table 1. *General data of the Mariovo deposit* (Premogovnik Velenje, 2012)

No	Parameter	Requirement
1	Coal rank/type	Dark brown lignite
2	Seam thickness	The thickness of the coal seam ranges from 0.5 m to a maximum of 16.3 m. The average depth of the coal seam is about 7.78 m
3	Seam depth	In the extreme SW parts, it lies at a maximum depth of 280m. The calculated average depth is 116.9 m
4	Seam dip/inclination	The coal seam is sub horizontal, slightly monoclinal from east to west, with a slight dip of 1.3° towards the SW part maximum of 12 ° towards SW direction.
5	Structure of the coal seam	General fault structures with directions of extension N-S and NW-SSE, with a transverse orientation of the Mariovo basin. No local distinctly marked fault structure have been registered in the coal seam.
6	Coal composition in terms of methane gas content and explosiveness	The relative methane abundance ranges from 0.00-0.057 m³/t and the absolute meta-abundance from 0.00-0.059 m³/t. According to the degree of methane (CH_4) hazard, the „Mariovo“ deposit is classified in the Methane, I- category. The coal from the "Mariovo" deposit shows explosive characteristics, with the lower limit of explosivity proven at 150 g/m³, and it can be concluded that the coal is self-igniting and belongs to group II.
7	Hydrogeological conditions	Existence of several types of aquifers, a complex compacted karst-fissure type of aquifer with a free groundwater level in the upper coal layer, a compacted type of aquifer with a pressurized groundwater level in the lower coal layer, and aquifer in the coal bed with a pressurized level as well as artesian and sub artesian pressures in the coal bed.
8	Coal reserves	A=30.677.498 B= 32.597.016 C_1= 6.954.525 Total= 70. 229.038 t
9	Access and infrastructure	The communication links to the deposit are good, as there is an asphalt road in good condition. The "Mariovo" deposit is located between the villages of Vidiste, Polchiste, Beshiste and Manastir, but all settlements are almost completely empty.
10	Socio-economic	If we take into account that about 50 km away is the Prilep town with about 70 thousand inhabitants and a large percentage of unemployed young people, it can be assessed as a positive circumstance in terms of labor force.

Table 2. *Input data of PJS in Suvodol open pit mine* (Rudprojekt, Main Mining Project for the Opening and Exploitation of Coal from the PJS Mine “Suvodol” – Technical Project for Coal Excavation, Book II/3, 2008)

No	Parameter	Requirement
1	Coal rank/type	Dark brown lignite
2	Seam thickness	There are 1-18 coal layers with a total thickness of 0.40 m. The average thickness of the coal layers in PJS is 14.97 m. Two coal layers can be distinguished as economically interesting, namely: I-th coal layer with a relative thickness of 0.80-4.50 m, and II-th main coal layer of 8-13 m
3	Seam depth	I-th bed layer from 2.5 m to 35 m and II-th bed main layer from 50-100 m
4	Seam dip/inclination	The coal seams in the peripheral parts of the deposit, specifically in the northern, southern and eastern parts (around the underground ridge) extend to the metamorphic complex itself, on which they lie directly or emerge and dip towards the central part at an angle of 10-15°.
5	Structure of the coal seam	In the PJS "Suvodol" coal deposit, the existence of structural forms from the fold and rupture tectonics has been established. From the elements of the fold tectonics, the existence of anticlinal and synclinal forms with gentle slopes from 4-8°, which create undulation in the coal seam. From rupture structures, several faults have been established.
6	Coal composition in terms of methane gas content and explosiveness	The relative methane abundance ranges from 0.00-0.42 m³/t and the absolute methane abundance from 0.00-0.59 m³/t. According to the degree of methane (CH_4) hazard, the PJS "Suvodol" deposit is classified in the methane, I-category. The coal from PJS "Suvodol" deposit shows explosive characteristics, with the lower limit of explosiveness proven at 150 g/m³, and it can be concluded that the coal is self-igniting and belongs to the II group.
7	Hydrogeological conditions	In the PJS "Suvodol" deposit are distinguished: roof aquifer, interlayer aquifers and floor aquifer. The roof aquifer extends towards the eastern, northern and northwestern parts of the deposit. The occurrence and level of groundwater at the roof aquifer have been registered in almost all conducted exploratory boreholes and it is generally distinguished as an aquifer with free groundwater. In the interlayer aquifers, the presence of groundwater under pressure (with artesian and sub artesian levels) has generally been registered. In the floor aquifer, the presence of groundwater with quite strong pressures accompanied by the appearance of gases and a regular artesian level has been registered.
8	Coal reserves	A=42.879.248 B= 10.594.008 C_1= 1.110.934 Total= 54.583.190 t
9	Access and infrastructure	There is a very good communication link with Bitola town and the village of Novaci with a built asphalt road.
10	Socio-economic	It will enable the improvement of the overall social and economic development of this region in the country.

3.3. The Živojno coal deposit

In the basal facies of the deposit, two coal formations are developed:

- a basal coal formation that lies directly on the paleorelief,
- a productive coal formation, developed in the highest horizons of the basal facies. The formation is represented by a main coal seam, whose thickness is 4-8 m, and several underlying coal seams, which often have productive thickness but without continuity over a larger area. Of particular interest is the productive coal formation, which is developed over an area of about 30 km^2.

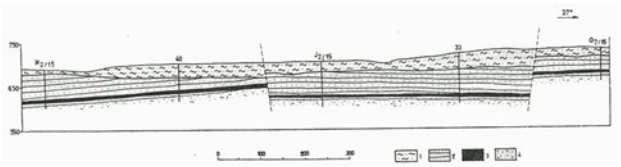


Fig. 3. Geological profile of the *Živojno* ore deposit productive upper lying coal formation, 1- clay, sand formation, 2- aleurite clay, 3-coal, 4-sands and dust (Andreevski, 1995)

Table 3. *Input data of the Živojno deposit* (Rudprojekt, Report on the classification, categorization, and calculation of coal reserves in the “Živojno” coal deposit, 2012)

No	Parameter	Requirement
1	Coal rank/type	Dark brown lignite
2	Seam thickness	The main coal seam has a thickness of 1.10-9.30 m
3	Seam depth	The calculated average depth is 94.9 m, while in some parts a maximum depth of 176.8 m has been determined.
4	Seam dip/inclination	The coal is layered with sub horizontal with a dip angle of 0-15° and locally up to 30° near the fault dislocations
5	Structure of the coal seam	This deposit has a very complex structural and tectonic structure. Generally, several large fault structures with a direction of extension NW-SSE are distinguished, which are parallel to each other and are accompanied by other smaller faults along the entire length. The faulting is expressed by the lowering or raising of dis continuous blocks.
6	Coal composition in terms of methane gas content and explosiveness	The relative methane abundance ranges from 0.01-0.012 m³/t and the absolute methane abundance from 0.004-0.044 m³/t. According to the degree of methane (CH4) hazard, the “Živojno” deposit is classified in the methane, I-category. The coal from “Živojno” deposit shows explosive characteristics, with the lower limit of explosiveness proven at 144 g/m³, and it can be concluded that the coal is self-igniting and belongs to the IV group.
7	Hydrogeological conditions	A fractured type of aquifer developed in the impermeable thick deposits in the coal bed – siltstones has also been identified. These semi-petrified rock masses are affected by intensive tectonics, accompanied by two dominant systems of fractures – normal and diagonal to the strata. Unlike “Mariovo”, the “Živojno” deposit has much thicker aquifers both in the bed and in the coal bed.
8	Coal reserves	A (t) / B(t) / C$_1$(t) For all layers 26.508.038 / 38.738.904 / 36.438.366 For main layer 16.605.843 / 29.464.515 / 27.967.491 For other layers 9.902.193 / 9.273.489 / 8.450.874
9	Access and infrastructure	The communication links to the deposit are good, because there is an asphalt road that is in a good condition. “Živojno” is located between the villages of Živojno, Bach and Gemijan, which are inhabited by a predominantly elderly population. If we take into account that the Bitola town is about 30 km away with about 100 thousand inhabitants and a large percentage of young unemployed people, it can be assessed as a positive circumstance in terms of labor force.
10	Socio-economic	Several hundred new jobs will be provided, which will directly affect the improvement of the overall social and economic developments of this underdeveloped region of the country. This could some companies that would indirectly get involved in providing services and goods for operation. A positive moment is that in the vicinity of this deposit are the already existing mines “Suvodol” and “Brod- Gneotino”, which have a workforce with extensive mining and professional experience.

Based on modern research in this area, 4 main criteria will be selected for these deposits:

- the minimum depth of the coal seam should not exceed 12 m;
- the minimum thickness of the seam should not be less than 2 meters;
- the ash content should not exceed 35%, whereby several variants of each model have been developed with ash contents of 15, 20, 25, 30, and 35%;
- and the sulphur content should be up to 5%.

Besides, 6 criteria that have been selected based on the responses to the questionnaires conducted by mining engineers from the country who works with the exploitation and design of surface coal mines.

By applying appropriate decision-making methods, the most favourable zones for the application of this technology are determined, which will form the basis for the further research and practical implementation.

4. Defining the underground coal gasification model for the selected deposits

The model was analysed based on the input data taken from the Elaboration for detailed geological explorations for Mariovo, PJS in the *Suvodol* and *Živojno* open pit deposits (Premogovnik Velenje, 2012) (Rudprojekt, Main Mining Project for the Opening and Exploitation of Coal from the PJS Mine “Suvodol” – Technical Project for Coal Excavation, Book II/3, 2008) (Rudprojekt, Report on the classification, categorization, and calculation of coal reserves in the “Živojno” coal deposit, 2012). Tabular data were taken from the exploitation boreholes, their elevations on the ground, the depth of occurrence of the coal layers, their strength (thickness), and then ash and sulphur content. Four criteria have been identified that are the main ones for solving the model:

- Criterion K1 – layer depth ≥ 12 m;
- Criterion K2 – layer thickness ≥ 2 m;
- Criterion K3 – ash content ≤ 15% (since lignites in North Macedonia have an ash content ≥ 35%, 5 models were developed with limiting values of ash content of 15, 20, 25, 30, and 35%) (Karanakova Stefanovska, 2017);
- Criterion K4- Sulphur content ≤ 5 %. The remaining 5 criteria are met for almost all deposits and are not subject to modelling.

To solve the model for the *Mariovo* deposit, a selection of exploration boreholes was performed, a total 180 indexed data were used. Some of the data also refer to the same exploration boreholes if at least 2 or more layers of coal appeared on it (Premogovnik Velenje, 2012).

According to five model studies of subvariants of the model with ash contents of 15, 20, 25, 30, and 35% (Karanakova Stefanovska, 2017) for the adopted model with an ash content of 35%, where four criteria are simultaneously satisfied, the percentage of boreholes meeting these criteria is approximately 38% (Karanakova Stefanovska, 2017).

Table 4. *Percentage of file conditions for the Mariovo deposit*

Model	Condition	Fulfilled criteria			
		4	3	2	1
1	K3<=15%	3.33	43.89	97.22	100.00
2	K3<=20%	12.22	55.56	97.22	100.00
3	K3<=25%	23.33	70.00	98.89	100.00
4	K3<=30%	32.78	86.11	98.89	100.00
5	K3<=35%	37.78	91.11	100.00	100.00

Based on the calculations of the quantities of coal that meet the requirements for underground coal gasification, the following data were obtained:

According to the Detailed geological investigation report (Premogovnik Velenje, 2012), ore reserves of category A+B+C$_1$[1] are 7 026 038 t. The total area of the coal seam is 9 488 371 m^2.

[1] The categories A, B, and C of mineral reserves are used to classify mineral (including coal) reserves according to the degree of exploration, reliability, and accuracy of the data. This classification is defined in accordance with the Law on Mineral Resources of the Republic of North Macedonia

At a coal density of 1.2 t/m^3, the average thickness of the coal layer is obtained:

$$d_{sr} = \frac{Q}{\gamma A}\ [m] = \frac{70269038}{1.2x9488371.8} = 6.17\ [m] \quad (1)$$

where:

Q = 7 026 038 [t] – ore coal reserves from A + B + C_1 category

γ = 1.2 [t/m^3] – coal density,

A = 9 488 371 [m^2] – area of coal seam.

The area of the part of the coal seam that meets the 4 criteria for underground coal gasification is 2 600 110.03 m^2. The volume of the coal seam that meets the 4 criteria is 16 046 591.4 m^3, or a mass of 19 255 909.7 t.

Of the entire *Mariovo* deposit about 27.40% meet all 4 of the specified criteria for underground coal gasification (Karanakova Stefanovska, 2017). This defines the percentages of the coal seam area (surfaces) that could be exploited and estimates the possible quantities of coal that could be exploited through underground gasification.

The model of PJS in *Suvodol* open pit is solved by selecting the exploration boreholes according to the four given criteria. For this purpose, 785 indexed data were used (Rudprojekt, 2008). According to five model studies of subvariants of the model with ash contents of 15, 20, 25, 30, and 35% (Karanakova Stefanovska, 2017) for the adopted model with an ash content of 35% where four criteria are simultaneously satisfied, the percentage of boreholes meeting these criteria is approximately 6% (Karanakova Stefanovska, 2017).

The results presented in Table 5 are for data from the PJS in the *Suvodol* open pit deposit (Karanakova Stefanovska, 2017).

Table 5. *Percent of file conditions for* PJS in the Suvodol open pit deposit

Model	Condition	Fulfilled criteria			
		4	3	2	1
1	K3<=15%	0.51	32.53	84.69	100.00
2	K3<=20%	1.40	45.03	87.37	100.00
3	K3<=25%	3.44	55.74	91.71	100.00
4	K3<=30%	4.85	64.16	94.64	100.00
5	K3<=35%	5.99	70.03	97.07	100.00

Based on the calculations of the quantities of coal that meet the requirements for underground coal gasification, the following data were obtained: According to the Detailed geological investigation report (Rudprojekt, Main Mining Project for the Opening and Exploitation of Coal from the PJS Mine “Suvodol” – Technical Project for Coal Excavation, Book II/3, 2008), ore reserves of category A+B+C_1 are 54 565 850 t. The total area of the coal seam is 3 292 440.71 m^2. At a coal density of 1.2 t/m^3, the average thickness of the coal layer is obtained:

$$d_{sr} = \frac{Q}{\gamma A}\ [m] = \frac{54565850}{1.2x329440.71} = 13.81\ [m] \quad (2)$$

where:

Q = 54 565 850 [t] – ore coal reserves from A + B + C_1 category,

γ = 1.2 [t/m^3] – coal density,

A = 3 292 440,71 [m^2] – area of coal seam.

The area of the part of the coal seam that meets the 4 criteria for underground coal gasification is 504 116.896 m^2. The volume of the coal seam that meets the 4 criteria is 6 962 303.80 m^3, or a mass of 8 354 764.56 t.

Of the entire PJS in the *Suvodol* open pit deposit, about 15% meet all 4 of the specified criteria for underground coal gasification (Karanakova Stefanovska, 2017).

The model of the *Živojno* deposit is solved by selecting the exploration boreholes according to the four given criteria. For this purpose, 48 indexed data were used (Rudprojekt, Report on the classification, categorization, and calculation of coal reserves in the “Živojno” coal deposit, 2012). For the adopted model with an ash content of 35% where four criteria are simultaneously satisfied, the percentage of boreholes meeting these criteria is approximately 79%.

Table 6. *Percentage of file conditions for the Živojno deposit*

Model	Condition	Fulfilled criteria			
		4	3	2	1
1	K3<=15%	18.75	87.50	100.00	100.00
2	K3<=20%	41.67	87.50	100.00	100.00
3	K3<=25%	70.83	91.67	100.00	100.00
4	K3<=30%	79.17	95.83	100.00	100.00
5	K3<=35%	79.17	95.83	100.00	100.00

Based on the calculations of the quantities of coal that meet the requirements for underground coal gasification, the following data were obtained: According to the Detailed geological investigation report (Rudprojekt, Report on the classification, categorization, and calculation of coal reserves in the *Živojno* coal deposit, 2012), ore reserves of category A+B+C_1 are 101684406 t. The total area of the coal seam is 8160261.805 m^2. At a coal density of 1.2 t/m^3, the average thickness of the coal layer is obtained:

$$d_{sr} = \frac{Q}{\gamma A}\ [m] = \frac{101684406}{1.2x8160261.805} = 10.38\ [m] \quad (3)$$

where:

Q = 101684406 [t] – ore coal reserves from A + B + C_1 category,

γ = 1.2 [t/m^3] – coal density,

A = 8160261.805 [m^2] – area of coal seam.

The area of the part of the coal seam that meets the 4 criteria for underground coal gasification is 4940752.936 m^2. The volume of the coal seam that’s meets the 4 criteria is 51 305 290.96 m^3, or a mass of 61 566 349.16 t. Of the entire *Živojno* coal deposit, about 60.55% meet all 4 of the specified criteria for underground coal gasification (Karanakova Stefanovska, 2017).

The analysis in Chapter 3 on the possibility of Underground coal gasification at the Mariovo, PJS in the *Suvodol* and *Živojno* open pit deposits defines the percentages of the coal seal that could be exploited with gasification. In table 7, a multi-criteria model is presented which, in addition to the percentage share of potential coal reserves suitable for UCG (first criterion), incorporates several other criteria as well (Karanakova Stefanovska, 2017).

Table 7. % of possible coal reserves suitable for UCG

Deposit	Geological coal reserves (A+B+C_1) [t]	Total area of coal seam [m^2]	Total area of coal that fullfil conditions for UCG [m^2]	Average thickness of coal seam [m]	Predicted amount of coal that can be exploited with UGC	Coal reserve utilization coefficient [%]
Mariovo	70269038	9488372	2600110	6.17	19255910	27.40
PJS in Suvodol	54565850	3292441	504117	13.81	8354765	15.31
Zivojno	101684406	8160262	4940753	10.38	61566349	60.55

5. Selection and identification of criteria for multi-criteria optimisation

Solving the multi-criteria problem involves selecting the “best” alternative from a set of available alternatives, where the term “best” can be interpreted by the decision maker as “most desirable”. Criteria that have the greatest impact on solving the model have been identified. The following 7 criteria have been selected:

- Criterion 1: Coal reserve utilisation coefficient – this criterion is defined and calculated in table 7 (Karanakova Stefanovska, 2017);
- Criterion 2: Dip angle – the basic condition is that it must be at least 5^0 (Shafirovich, 2009);
- Criterion 3: Structural-tectonic characteristics – this criterion is important from the perspective of fracture system and depends on the degree of fracturing (linear, planar, and volumetric). Based on this, a qualitative assessment has also been carried out;
- Criterion 4: Hydrogeological characteristics – the evaluation is based on the permeability coefficient, as well as on the assumed groundwater level;
- Criterion 5: Terrain configuration – this is important from the aspect of the possibility for developing mining operations, i.e. access to the deposit, conditions for further development, road construction, connection to the electrical grid, etc. The evaluation of this criterion is based on visual analysis of satellite images from Google Earth;
- Criterion 6: Cost of exploitation using conventional methods – this criterion is adopted from the Main Mining Projects and techno-economic studies for the respective deposits (Premogovnik Velenje, 2012) (Rudprojekt, Main Mining Project for the Opening and Exploitation of Coal from the PJS Mine “Suvodol” – Technical Project for Coal Excavation, Book II/3, 2008) (Rudprojekt, Report on the classification, categorization, and calculation of coal reserves in the “Živojno” coal deposit, 2012);
- Criterion 7: Possibility of applying conventional methods – the evaluation is based on the feasibility of using conventional methods according to long-term experience.

The multi-criteria model is defined using descriptive assessments which need to be transformed into numerical values. The simplest approach is to use a linear transformation scale.

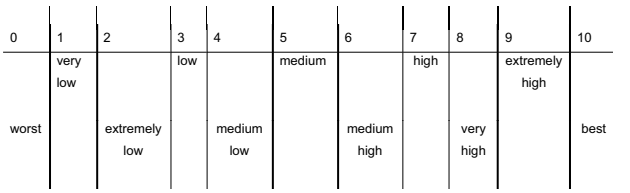


Fig. 4. Linear transformations for the quality attributes

After the transformation of attribute qualities, the input multi-criteria model is obtained, whose solution is carried out using the PROMETHEE II method. The input model prepared for solving with the multi-criteria method is presented in the table 8. After transforming the attribute qualities, table 9 is obtained:

Table 8 Input model for solving with the multi-criteria method PROMETHEE II

No	Multi criteria model	Coal reserve utilization coefficient K1	Dip angle K2	Structural-tectonic characteristics K3	Hydrogeological characteristics K4	Terrain configuration K5	Cost of exploitation K6	Possibility of applying conventional methods K7
		%	deg				EUR/t	
1	Mariovo	27.40	5	High	High	Low	15	Low
2	PJS in Suvodol	15.31	2	Low	Low	High	10.54	High
3	Zivojno	60.55	1.5	medium	Low	Medium high	23.61	Medium
	MIN/MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN	MAX
W	%	50	10	10	5	5	10	10
		0.5	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.1

Table 9 Input model after transformation of attribute qualities

No	Multi criteria model	Coal reserve utilization coefficient K1	Dip angle K2	Structural-tectonic characteristics K3	Hydrogeological characteristics K4	Terrain configuration K5	Cost of exploitation K6	Possibility of applying conventional methods K7
		%	deg				EUR/t	
1	Mariovo	27.40	5	7	7	3	15	3
2	PJS in Suvodol	15.31	2	3	3	7	10.54	7
3	Zivojno	60.55	1.5	5	3	6	23.61	5
	MIN/MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN	MAX
W	%	50	10	10	5	5	10	10
		0.5	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.1

The following are the results of solving the multi-criteria model using the PROMETHEE II method and the academic version of the VISUAL PROMETHEE software:

Table 10. *Statistical indicator*

Feature	*K1*	*K2*	*K3*	*K4*	*K5*	*K6*	*K7*
MIN	15.31	1.50	3.00	3.00	3.00	10.54	3.00
MAX	60.55	5.00	7.00	7.00	7.00	23.61	7.00
Mean value	34.42	2.83	5.00	4.33	5.33	16.38	5.00
Standard deviation	19.12	1.55	1.63	1.89	1.70	5.42	1.63

Characteristics of the criterion function

The next step is to define the criteria of the criterion function, their type, indifference and preference.

Table 11. *Characteristics of the criterion function*

Features	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Min/Max	max	max	max	max	max	min	max
W	0.50	0.10	0.10	0.05	0.05	0.10	0.10
Function type	Ordinary	Level	Level	Ordinary	Level	Ordinary	level
Indifference	-	1.00	1.00	-	2.00	-	1.00
Preference	-	3.00	3.00	-	5.00	-	3.00

Table 12. *Total values according to PROMETHEE II*

Alternative	Phi	Phi+	Phi-
Zivojno	0.3375	0.5625	0.2250
Mariovo	0.1250	0.5250	0.4000
PJS in open pit Suvodol	-0.4625	0.1875	0.6500

Diagrams of the solved model according to the PROMETHEE method

After solving the multi-criteria model, diagrams according to the PROMETHEE method can be drawn.

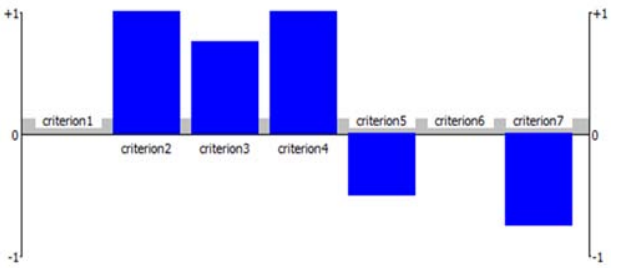


Fig. 5. Diagram of active criteria for alternative 1

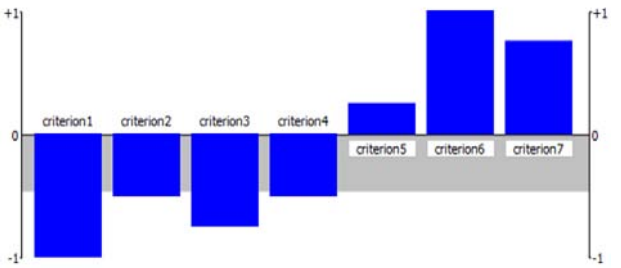


Fig. 6. Diagram of active criteria for alternative 2

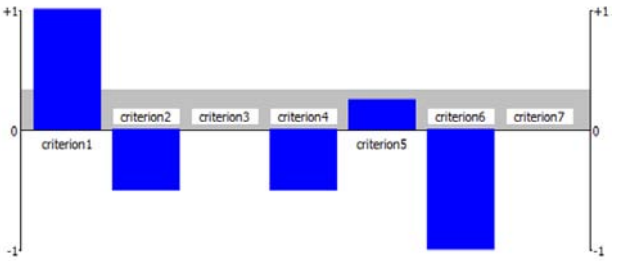


Fig. 7. Diagram of active criteria for alternative 3

The following diagram shows the PROMETHEE – GAIA analysis. GAIA (geometrical analysis for interactive aid) is an interactive geometric representation of the solution from the PROMETHEE method.

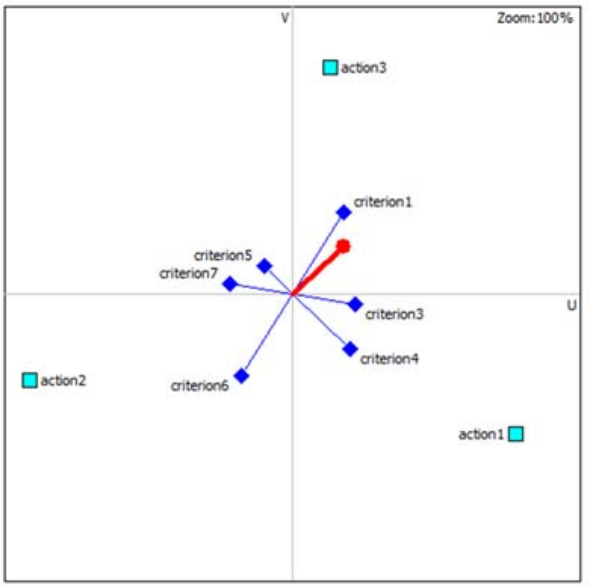


Fig. 8. GAIA diagram

From the output tables and diagrams, it can be concluded that the top ranked alternative is Alternative A3: the *Živojno* deposit, with a net flow value of 0.3375.

The results obtained from PROMETHEE II method indicate that the *Živojno* deposit has the highest priority for the implementation of underground coal gasification as an environmentally acceptable method.

Next in the ranking is the *Mariovo* deposit, while the deposit PJS in the *Suvodol* open pit has no priority, with a negative net flow value. This deposit does not show preference toward any alternative and is considered unsuitable for application of underground coal gasification technology.

6. Conclusion

The obtained results from the test model studies of the three coal deposits: *Mariovo*, PJS in the *Suvodol* open pit deposit, and *Živojno*, provide a basis for analysis and decision-making regarding the possible application of underground coal gasification. For this purpose, four main criteria, along with six additional (auxiliary) criteria, were selected for the three considered variant solutions. The selection of criteria was based both on contemporary research in this field and on responses collected through questionnaires completed by mining

engineers from the Republic of North Macedonia involved in the exploitation and design of surface coal mines.

The four main criteria are: minimum depth of occurrence of the coal seam (greater than 12 meters), minimum seam thickness (at least 2 meters), ash content (not exceeding 35%), and sulphur content (up to 5%). These four criteria enable the definition of a model used to determine how many of the total number of exploration boreholes satisfy these conditions. The analysis was conducted for five limiting values of ash content: 15%, 20%, 25%, 30%, and 35%. These represent five sub-variant solutions. In this way, for each of the three variant solutions, output tables were generated showing the percentage share of boreholes satisfying 4, 3, 2, and 1 condition(s). For the *Živojno* deposit, analysis shows that the 4 criteria are met by 79.17% of all exploration boreholes (positive and negative), i.e., about 60.55% of the total coal reserves can be exploited with underground coal gasification (Karanakova Stefanovska, 2017).

References

Andreevski, B. (1995). *Coals.* Shtip: University "St. Cyril and Methodius", Faculty of mining nad geology.

Bialecka, B. (2009). An Assessment of Prospective Reserves for Underground Coal Gasification in Poland. *Deep Mining Challenges, Taylor & Francis*, 157-168.

Karanakova Stefanovska, R. (2017). *Unconventional coal exploitation technologies with minimizing harmful gas emissions.* Stip: Goce Delcev University.

Perkins G, S. V. (2005). *A mathematical model for the chemical reaction of semi-infinite block of coal in underground coal gasification.* Energy & Fuels.

Premogovnik Velenje, T. s. (2012). *Osnovna koncepcija za eksploatacio lignita v nahajališču Mariovo, Knjiga I – revidirano.* Velenje.

Rudprojekt. (2008). *Main Mining Project for the Opening and Exploitation of Coal from the PJS Mine “Suvodol” – Technical Project for Coal Excavation, Book II/3.* Skopje.

Rudprojekt. (2012). *Report on the classification, categorization, and calculation of coal reserves in the “Živojno” coal deposit.* Skopje.

Shafirovich, E. V. (2009). The Potential for Underground Coal Gasification in Indiana. *Final Report to Indiana Center for Coal Technology Research (CCTR)*.

Thompson, P. N. (1976). Underground Gasification of Coal. . *London National Coal Board*.

EXTRACTION OF CRITICAL RARE EARTH METALS (Nd, Pr, Dy) FROM ELECTRONIC WASTE – CURRENT TECHNOLOGIES AND FUTURE PERSPECTIVES

Aleksandar Chanachev, Gospodinka Gicheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: a.chanachev@mgu.bg

ABSTRACT. On a global scale, the generation of waste from electronic and electrical devices is increasing dramatically and creates the need to search for new approaches for their recycling. The inclusion of several valuable materials and elements that are part of their composition creates conditions for systematic and in-depth study of both classical approaches that can be used for their recovery, and new, complex processes that would allow for easier and more environmentally friendly recycling. Among the materials that are particularly important for extraction in the recycling process are rare earth elements. Of these, neodymium (Nd), praseodymium (Pr), and dysprosium (Dy) are widely used in various high-tech industries: the production of hard drives, smartphones, computers, and others. They are found in very small quantities in nature and their primary extraction is also hampered by the geographical location of their deposits, which could pose difficulties in supply chains due to various geopolitical factors. This makes the search for new methods for obtaining such elements from secondary sources, namely e-waste, a particularly interesting and relevant scientific topic, both for the extraction process itself and for creating favourable conditions for sustainability and the development of a circular economy.

Key words: critical rare earth metals, electronic waste, extraction.

ИЗВЛИЧАНЕ НА КРИТИЧНИ РЕДКОЗЕМНИ МЕТАЛИ ОТ ЕЛЕКТРОННИ ОТПАДЪЦИ (Nd, Pr, Dy) – СЪВРЕМЕННИ ТЕХНОЛОГИИ И БЪДЕЩИ НАСОКИ

Александър Чаначев, Господинка Гичева

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В глобален мащаб генерирането на отпадъци от електронни и електрически устройства нараства драстично и поражда нуждата от търсенето на нови подходи за тяхното рециклиране. Включването на редица ценни за икономиката и индустрията материали и елементи, които влизат в състава им създава условия за систематично и задълбочено изучаване както на класическите подходи, които могат да се използват за оползотворяването им, така и на нови, комплексни процеси, които да позволят по-лесното и по-екологичното протичане на рециклирането. Сред материалите, които са особено важни за извличане в процеса на рециклиране са редкоземните елементи, а от тях неодимът (Nd), празеодимът (Pr) и диспрозият (Dy) намират широко приложение в различни високотехнологични производства – изработването на харддискове, смартфони, компютри и други. Те се намират в много малки количества в природата и първичното им извличане е затруднено и от географското разположение на техните залежи, което би могло да създаде затруднения във веригите на доставка поради различни геополитически фактори. Това прави търсенето на нови методи за получаване на такива елементи от вторични източници, а именно електронни отпадъци, особено интересна и актуална научна тема, както за самия процес на извличане, така и за създаване на благоприятни предпоставки за устойчивост и развитие на кръгова икономика.

Ключови думи: критични редкоземни метали, електронни отпадъци, извличане.

Introduction

Due to the rapid growth in the amount of waste generated by electrical and electronic waste, the depletion of resources from deposits of elements that are essential in modern electronics, as well as environmental protection, modern recycling technologies are being strengthened. The well-known pyrometallurgical and hydrometallurgical processes are still widely used, but in recent years, there has been an increasing trend towards various alternative methods that are more environmentally friendly, such as non-cyanide leaching, bio metallurgy, cryogenic digestion, supercritical extraction, and leaching agents that can be recycled. Such approaches significantly improve the extraction of critical metals and limit the impact on the environment. (Gulliani et al., 2023).

Recycling electrical and electronic equipment is associated with a number of difficulties in its initial preparation before the recycling process. Among these types of waste are various types of batteries, mobile phones, televisions, liquid crystal displays and others, which contain metals, plastics, metal-plastic mixtures, organics, and glass fibers, along with the raw materials that are recycled (Wang & Xu, 2015).

After the initial process of preparing the raw materials for recycling, a series of processes begins, whose aim is to extract from the electronic waste the elements that are of economic importance for various technological industries. In addition to the extraction of gold, copper, platinum, palladium, and other precious metals, various rare earth elements (REEs) are also extracted, including Nd, Pr and Dy . The group of rare earth elements is included in the category of critical raw materials (CRMs) due to their economic importance and the risks associated with their supply. For this reason, it is important to clarify what exactly we understand by critical raw materials and where we can look for the definition of this concept.

It is important to note that rare earth elements are included in the category of critical raw materials because of their high economic importance and the significant risks associated with their supply. Therefore, a clear understanding of the concept of critical raw materials is essential.

The European Commission defines critical raw materials as raw materials of essential economic importance for the European Union which at the same time are exposed to a high risk of supply chain disruption, due to the concentration of their production in a limited number of countries, various geopolitical factors, or the lack of alternative substitutes. (European Commission, 2023).

The United States Geological Survey (USGS) also provides a definition of critical raw materials, which includes the understanding that a critical mineral is a non-fuel mineral or mineral material that is of significant importance to the economic or national security of the United States, and whose supply chain is vulnerable to disruption and this would have significant

consequences for the economy or national security (USGS, 2022).

The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) also defines critical raw materials as raw materials that are critical to the green transition because they cannot be replaced in renewable and clean energy technologies and their supply is exposed to significant risks due to the high geographical concentration of production and trade (OECD, 2023).

Therefore, by all the definitions considered, neodymium (Nd), praseodymium (Pr), and dysprosium (Dy) can be classified as critical raw materials. These rare earth elements play a significant role in the production of high-performance permanent magnets used in electric vehicles, wind turbines, robotics, and many modern technologies. On the other hand, their supply chains are highly concentrated geographically and are susceptible to geopolitical and market disruptions, making them strategically important materials.

Rare earth elements and especially neodymium (Nd), praseodymium (Pr), and dysprosium (Dy), play a crucial role in modern technologies and have significant industrial applications, mainly due to their unique magnetic properties and their importance in the production of high-performance NdFeB permanent magnets (Brown, 2025).

Neodymium has a significant industrial importance, with neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets possessing the highest energy among commercially available permanent magnets, with their magnetic characteristics approaching the theoretical limit of the $Nd_2Fe_{14}B$ phase. (Gutfleisch et al., 2011).

Praseodymium (Pr) is of essential importance in technologies related to permanent magnets. Significant amounts of it are found in technological products - computers, cars, and wind turbines. (Du & Graedel, 2011).

Dysprosium (Dy) is a component of Nd-Fe-B permanent magnets, which occurs by partial substitution of Nd atoms, which leads to an increase in the anisotropy field and improvement of coercivity, and allows their application in high-temperature environments, such as traction motors of hybrid electric vehicles and wind generators (Hono & Sepehri-Amin, 2012).

Among the rare earth elements, neodymium (Nd), praseodymium (Pr), and dysprosium (Dy) are important components of a large number of high-tech and industrial productions. Their demand is constantly growing, but their supply chains and sustainability can be threatened by various factors. These factors influence the rapid development of scientific research, which seeks a way to utilise them from various types of secondary sources, including electronic waste.

Sources of Nd, Pr, and Dy in Electronic Waste

The consumption of electrical and electronic equipment is growing, which leads to a continuous increase in the waste generated by them, globally exceeding 50 million tonnes per year, and by 2030 it is expected to reach about 74.7 million tonnes (Pineda-Vásquez et al., 2024). The generated waste is an important secondary source of valuable metals and critical raw materials, and this category also includes rare earth elements, in particular neodymium, praseodymium and dysprosium. Their utilisation can reduce dependence on primary mineral resources and improve the security of supply chains (Gulliani et al., 2023).

The increasing demand for rare earth elements, and in particular neodymium (Nd), praseodymium (Pr) and dysprosium (Dy), is driven by their applications in various types of high-tech products, consumer electronics, vehicles and wind turbines. NdFeB permanent magnets represent one of the richest secondary sources, containing approximately 20–31 wt.% Nd, 4–9 wt.% Pr, and 1–8 wt.% Dy, as determined by their application. The recovery of these elements from e-waste is considered important for improving resource security, reducing dependence on mining, and supporting the transition to a circular economy (Akcil et al., 2021).

The processes related to the production of rare earth elements as primary raw materials, and not as extracted from electronic waste, is mainly concentrated in China. On the other hand, their importance for the industry is extremely great, as an excellent example in this regard are the neodymium magnets - even though they are a very small part of the total weight of hard disk drives, without their presence, their full work would be impossible (Duarte & Rodrigues, 2020; Shanthi Bhavan et al., 2023).

Table 1 shows that the highest concentration of rare earth elements and the considered neodymium, praseodymium, and dysprosium in electronic waste is observed in hard drives, with the main source of neodymium and dysprosium being the permanent magnets in them (Thompson et al., 2018; Pyrgaki et al., 2021; Good et al., 2023; Heim & Vander Wal, 2023; Liang et al., 2024).

Table 1. *Content of rare earth elements (REEs) in various electronic waste*

E-Waste	Main Components	REEs Present	Concentration (ppm)	Ref.
Hard disk drives	Permanent magnets	Nd, Dy, Pr	2500–15,000	(Heim & Vander Wal, 2023; Thompson et al., 2018)
Smartphones	Screens, speakers, vibration motors	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu,Gd, Tb, Dy, Y	10–1000	(Good et al., 2023)
Computers	Printed circuit boards,hard disk drives, Speakers	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu,Gd, Tb, Dy, Y	10–1000	(Pyrgaki et al., 2021)

Note. Adapted from “A Review of the Occurrence and Recovery of Rare Earth Elements from Electronic Waste,” by B. Liang, J. Gu, X. Zeng, W. Yuan, M. Rao, B. Xiao, and H. Hu, 2024, *Molecules, 29*(19), 4624. (https://doi.org/10.3390/molecules29194624. Licensed under CC BY 4.0.)

Electronic waste represents a valuable source of secondary rare earth materials, but the recovery of Nd, Pr, and Dy remains limited due to technical challenges, such as small quantities of magnets in electronic products, their integration into components, protective coatings, and difficulties associated with extraction (Lixandru et al., 2017).

Recycling approaches have been investigated, including hydrometallurgical processes; nevertheless, there is still a great need for environmentally sustainable methods. Maât et al. (2016) demonstrated an alternative recovery approach, which is based on hydrothermal treatment with water and sodium chloride, enabling the extraction of rare earth compounds from

Nd-Fe-B permanent magnets recovered from electrical and electronic equipment waste.

Despite their potential as a secondary resource, rare earth recycling from electrical and electronic equipment waste remains limited due to challenges related to collection, separation, and the development of economically feasible recovery processes (Binnemans et al., 2013).

Rare earth elements, and especially neodymium (Nd) praseodymium (Pr) and dysprosium (Dy), have an essential role in industry and high technology and without them many electronic and electrical devices could not function normally. Their concentration in a small number of geographical regions and their relatively small quantities make their primary extraction highly limited and supply chains unsustainable. Due to these factors, their secondary extraction from e-waste is the subject of increased scientific interest and overcoming the technical difficulties associated with this process is of essential importance.

Chemical Recovery Technologies

The chemical recovery processes of electronic and electrical waste must go through a series of steps of preliminary mechanical and physical treatment, thus separating the materials and elements that need to be extracted from the complex matrix of the waste. Because electronic waste has a complex heterogeneous composition, which includes metals, polymers, ceramics, glass, and other components, their effective separation and concentration of the target fractions are important for increasing the efficiency of their recovery at a later stage of the process itself. Pre-treatment includes both dismantling and desoldering, as well as subsequent size reduction, which is achieved by crushing and milling, as well as by sieving and physical separation of metallic from non-metallic fractions. The procedures performed in this way lead to improved access to valuable metals and compounds, which also contain rare earth elements, by increasing the release of the material and significantly reducing interference from non-metallic components. Physical separation techniques, including magnetic, are based on their density and electrostatic separation. They are widely applied due to their low operating costs and the ability to concentrate valuable fractions before hydrometallurgical or pyrometallurgical treatment begins. (Gulliani et al., 2023).

Metallurgy processes

Metallurgical processes involve the extraction, processing, and transformation of metals using chemical and physical processes. Recycling of electronic waste uses metallurgical methods that enable the extraction of valuable metals from complex waste materials. The use of pyrometallurgical processes, such as melting and smelting, performed at high temperatures are widely used industrial techniques that allow the separation of metals based on their thermophysical properties. These processes remove organic components and allow the metals to be concentrated, which is the basis for their subsequent further purification. (Gulliani et al., 2023).

Combined pyrometallurgical-hydrometallurgical approaches are a promising strategy to recover critical metals, including rare earth elements, particularly neodymium, praseodymium, and dysprosium (Gulliani et al., 2023).

Pyrometallurgy Pyrometallurgical processes are among the most established techniques for the recovery of metals from waste electrical and electronic equipment. These methods are based on the use of high-temperature operations such as melting, sintering, remelting, plasma arc furnaces, and blast furnaces. In them, the separation of metals is achieved through differences in their thermophysical properties. Rare earth elements can be extracted using pyrometallurgical approaches. It is important to note that pyrometallurgy is mainly applied as a primary treatment step. In this, organic components are removed and the metal phases are concentrated. The subsequent selective separation and purification of the individual elements require the use of processes that are hydrometallurgical.

Hydrometallurgy (leaching and metal recovery). Among the most promising approaches for extracting critical metals from electronic waste are undoubtedly hydrometallurgical processes. They have a sequence of controlled chemical reactions accompanied by high selectivity, and their impact on the environment is lower than that of pyrometallurgical methods. Two main stages usually make up hydrometallurgical processes, namely: the extraction of metals from materials that have undergone pre-treatment, and the extraction of dissolved metal ions from the leachate. Various techniques are used in the extraction - precipitation, solvent extraction, ion exchange, cementation, and electrolytic extraction (Gulliani et al., 2023).

Due to the similar chemical properties of Nd, Pr and Dy, selective separation of the rare earth elements involved must be carried out after leaching. Solvent extraction and ion exchange techniques have been the subject of much research and interest due to their ability to achieve high selectivity under controlled conditions. Precipitation methods can be used to extract metals from infiltrates, and electrowinning is one of the established techniques for the deposition of metals from acids and ammonia solutions. It is mainly applied to base metals and the question of combining it with other hydrometallurgical steps is the subject of a number of studies aimed at finding more efficient extraction routes (Gulliani et al., 2023).

Electrochemically assisted leaching, as a new approach, is a potential alternative to conventional chemical treatment. It can generate oxidising substances *in situ* and significantly limit the use of reagents that can have a negative impact on health and the environment. Adsorption and biosorption are increasingly important due to their low operating costs and potential for regeneration. They also have excellent ability to selectively precipitate metal ions from aqueous solutions.

Combined hydrometallurgical strategies such as selective separation, leaching, etc. are the basis for future development of concepts for the extraction of Nd, Pr and Dy from secondary resources (Gulliani et al., 2023).

Biometallurgy. The search for ecological alternatives places biometallurgical processes, such as bioleaching, among the most interesting and increasingly actively studied methods for extracting metals from secondary sources. Biometallurgy uses various types of microorganisms that help dissolve metals and significantly reduce the need for the use of energy resources, as well as the consumption of chemical reagents. This allows these processes to have a relatively small impact on the environment. Despite their many advantages, their application on an industrial scale is still significantly limited due to the relatively slow reaction kinetics, as well as the long processing time and the

high sensitivity of microorganisms to environmental conditions (Gulliani et al., 2023).

The basis of microbial metal extraction is the ability of microorganisms to interact with metal-containing materials through direct and indirect mechanisms. In indirect bioleaching, microorganisms, such as Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans, oxidise Fe^{2+} to Fe^{3+} and elemental sulphur to sulphuric acid, generating ferric ions and acidic conditions that promote metal dissolution. In addition, heterotrophic fungi such as Aspergillus niger produce organic acids, including citric, oxalic, and malic acids, which enhance metal dissolution through acidification and complex formation (Gulliani et al., 2023).

Microbial metabolites and organic acids can promote dissolution by forming soluble metal-ligand complexes, enhancing the availability of rare earth ions in solution. Bioleaching systems based on microorganisms such as Acidithiobacillus species can achieve significant recovery of rare metals, including reported recoveries of more than 95% of Ce, Eu, and Nd after appropriate pretreatment and sequential bioleaching processes (Gulliani et al., 2023).

The creation of a multi-stage procedure for such a type of bioleaching significantly improves the selectivity of extraction, as well as the efficiency of the entire process. The initial stages are associated with the dissolution of base metals, which favours the subsequent extraction of precious metals and rare earth elements. The oxidation-reduction potential, pH, microbial activity, and the chemical characteristics of the target metals are important in these processes. After bioleaching, subsequent steps in the process are possible (extraction with a solvent, precipitation, or ion exchange) in order to isolate individual rare earth elements due to their similar chemical properties (Gulliani et al., 2023).

Bioleaching is undoubtedly an ecological method for the secondary extraction of rare earth elements, but it has its limitations: slow dissolution rate, microbial inhibition, which is due to toxic components present in electronic waste, the formation of secondary sediments, which can passivate the surface of the materials and thus significantly reduce the extraction efficiency. Research in this area focuses on hybrid approaches that combine bioleaching with catalysts, hydrometallurgical extraction additives, or chemical additives, aiming to improve and make these methods economically viable. These developments and the prior incorporation of suitable separation technologies make biometallurgical approaches a sustainable method for extracting rare earth elements, such as Nd, Pr and Dy (Gulliani et al., 2023).

Critical Comparison and Future Perspectives

Biometallurgy finds a place in the processing of electronic waste as a promising alternative route for its recycling by using microorganisms to facilitate the dissolution of metals. Biometallurgical approaches have environmental advantages - lower energy demand, reduced consumption of hazardous chemical reagents, lower operating costs, and minimal generation of toxic emissions. This gives a significant advantage over conventional pyrometallurgical and hydrometallurgical approaches. Pyrometallurgy requires high temperatures and can result in the loss of volatile metals, and hydrometallurgy often relies on strong acids, oxidising agents, or complexing agents. Bioleaching works under milder conditions and uses naturally occurring microbial activities to extract metals (Gulliani et al., 2023).

Although with obvious environmental benefits, biometallurgy faces a number of limitations, mainly to applications on a laboratory scale, which can hardly be transferred to real, sufficiently large industrial processes due to the slow progress of the individual processes and the difficulties associated with process control. In contrast, hydrometallurgical methods can achieve high recovery efficiencies within hours or days, and bioleaching often requires several weeks to reach similar extraction levels. Thus, the extended processing time represents a major obstacle for the industrial implementation of this type of technology (Gulliani et al., 2023).

It can be easily summarised that the efficiency of biometallurgical processes is highly dependent on the microbial species, environmental conditions, and composition of the waste matrix. Acidophilic microorganisms, such as Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans, demonstrate excellent ability to recover base metals, such as Cu, Zn, Ni, and Co, through iron and sulphur oxidation mechanisms. Multi-stage bioleaching strategies, in which base metals are first removed, followed by selective recovery of noble metals, are emerging as an effective approach in e-waste treatment (Gulliani et al., 2023).

Recent developments indicate that catalytic enhancement could represent an important pathway toward improving the industrial feasibility of biometallurgy. The addition of metal catalysts, such as Cu^{2+} and Ag^{+} ions, as well as non-metallic catalysts, including graphene, nitrogen-doped carbon nanotubes, and organic acids, has demonstrated significant improvements in dissolution kinetics and metal recovery. These approaches reduce the main limitation of conventional bioleaching by accelerating microbial oxidation reactions while maintaining relatively low environmental impact (Gulliani et al., 2023).

Future research should focus on developing integrated recycling systems combining mechanical pre-treatment, hydrometallurgical enrichment, and biological recovery steps. Such hybrid approaches could overcome the individual limitations of each technology by using physical methods to increase surface accessibility, chemical methods for rapid dissolution, and microbial processes for selective recovery under environmentally benign conditions (Gulliani et al., 2023).

Advances in synthetic biology, microbial engineering, and process automation can increase the efficiency of these processes and greatly improve the scalability of biometallurgical technologies. This is linked to the development of more resistant microbial strains capable of tolerating high metal concentrations and complex composite structures from e-waste processing. These are specific guidelines that have the potential to improve recovery efficiency and significantly reduce processing time. Continuous bioreactor systems, improved microbial immobilisation techniques, and real-time monitoring of redox and pH conditions are among the most essential prerequisites that can facilitate the transition from laboratory experiments to industrial applications (Gulliani et al., 2023).

Biometallurgy is one of the most sustainable approaches for future electronic waste recycling. Its successful commercialisation requires a balance between environmental performance, metal recovery efficiency, processing time, and economic feasibility. It does not aim to completely replace conventional technologies, but seeks approaches that are expected to become an additional component within integrated

circular economy strategies for sustainable metals recovery (Gulliani et al., 2023).

Conclusions

The growing generation of waste from electrical and electronic equipment is an environmental challenge that implies the recovery of spent resources from them, which is the basis of the circular economy. Electronic waste has a complex composition, which includes valuable and critical metals, polymers, and composite structures. A large part of the substances that make them up create potential risks and damages to health and the environment. This means that conventional disposal practices are risky and do not give the possibility of extracting the valuable materials contained in them. This demand calls for effective recycling strategies that will reduce the dependence on primary mineral resources (Gulliani et al., 2023).

A detailed review of existing recycling approaches clearly shows that no single technology can provide a comprehensive solution for recovering all the valuable components that make up e-waste. Pyrometallurgical processes offer high throughput and robust operation, but are associated with high energy requirements and potential emissions. Hydrometallurgical methods provide high efficiency and selectivity of metal recovery, but typically rely on corrosive reagents and generate secondary waste streams that require additional treatment. Biometallurgical approaches represent a more environmentally friendly alternative due to their lower chemical consumption and reduced environmental impact; however, their wider application is limited by slow kinetics, microbial sensitivity, and process scalability challenges (Gulliani et al., 2023).

A sustainable WEEE management strategy should be based on maximising resource recovery while minimising environmental impacts and energy demand. The development of hybrid recycling processes, supported by advances in biotechnology, material science, and process engineering, represents a promising direction toward achieving efficient recovery of valuable metals and critical materials. The implementation of circular economy principles through reduction, reuse, and recycling strategies is essential for improving resource efficiency and reducing the environmental burden associated with electronic waste generation.

Sustainable management requires not only improvements in recycling technologies, but also a series of changes in the design and production stages of electrical and electronic equipment. Extended producer responsibility, the development of products with longer lifespans, modular structures, easier disassembly, and improved repairability, can significantly improve future recovery pathways. The transition to a circular economy of electronic waste depends on the successful integration of technological innovation, environmental considerations, and responsible industrial practices.

Acknowledgements. This work is funded by the National Science Program “Critical and strategic raw materials for a green transition and sustainable development”, approved by the Resolution of the Council of Ministers No. 508/18.07.2024 and funded by the Ministry of Education and Science (MES) of Bulgaria.

References

Akcil, A., Ibrahim, Y. A., Meshram, P., Panda, S., & Abhilash. (2021). Hydrometallurgical recycling strategies for recovery of rare earth elements from consumer electronic scraps: A review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 96*(7), 1785–1797. https://doi.org/10.1002/jctb.6739

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 51*, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Brown, A. M. (2025). Reclaiming rare earths. *Nature Reviews Chemistry, 9*, 123–124. https://doi.org/10.1038/s41570-025-00759-7

Duarte, A. C. O., & Rodrigues, R. de S. (2020). Rare earth elements: What are they, what are they for and what are their environmental effects? *Sustentare, 4*(1). https://doi.org/10.5892/st.v4i1.6154

Du, X., & Graedel, T. E. (2011). Global in-use stocks of the rare earth elements: A first estimate. *Environmental Science & Technology, 45*(9), 4096–4101. https://doi.org/10.1021/es102836s

European Commission. (2023). https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en?utm_source=chatgpt.com

Good, N. M., Kang-Yun, C. S., Su, M. Z., Zytnick, A. M., Vu, H. N., Grace, J. M., Nguyen, H. H., Park, D. M., Skovran, E., & Fan, M. (2023). Scalable bio-platform to recover critical metals from complex waste sources. *bioRxiv*. https://doi.org/10.1101/2023.09.02.556034

Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011). Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. Advanced *Materials, 23*(7), 821–842. https://doi.org/10.1002/adma.201002180

Gulliani, S., Volpe, M., Messineo, A., Volpe, R. (2023). Recovery of metals and valuable chemicals from waste electric and electronic materials: a critical review of existing technologies. *RSC Sustainability, 1*, 1085, DOI: 10.1039/d3su00034f

Hono, K., & Sepehri-Amin, H. (2012). Strategy for high coercivity in soft and hard magnetic materials. *Scripta Materialia, 67*(6), 530–535. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.06.038

Liang, B., Gu, J., Zeng, X., Yuan, W., Rao, M., Xiao, B., & Hu, H. (2024). A review of the occurrence and recovery of rare earth elements from electronic waste. *Molecules, 29*(19), 4624. https://doi.org/10.3390/molecules29194624

Lixandru, A., Venkatesan, M., Jonsson, C., Poenaru, I., Hall, B., Yang, Y., Walton, A., Güth, K., Gauß, R., & Gutfleisch, O. (2017). Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment. *Waste Management, 68*, 482–489. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.028

Maât, N., Nachbaur, V., Lardé, R., Juraszek, J., & Le Breton, J. M. (2016). An Innovative Process Using Only Water and Sodium Chloride for Recovering Rare Earth Elements from Nd–Fe–B Permanent Magnets Found in the Waste of Electrical and Electronic Equipment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 4*(9), 5006–5013. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01226

OECD, Raw Materials Critical for the Green Transition: Production, International Trade and Export Restrictions,

OECD Trade Policy Papers No. 269, OECD Publishing, Paris, 2023, DOI: 10.1787/c6bb598b-en.

Pineda-Vásquez, T., Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., & Ocampo-López, C. (2024). From E-waste to high-value materials: Sustainable synthesis of metal, metal oxide, and MOF nanoparticles from waste printed circuit boards. *Nanomaterials, 14*(1), 69. https://doi.org/10.3390/nano14010069

Pyrgaki, K., Gemeni, V., Karkalis, C., Koukouzas, N., Koutsovitis, P., & Petrounias, P. (2021). Geochemical occurrence of rare earth elements in mining waste and mine water. A review. *Minerals, 11*(8), Article 860. https://doi.org/10.3390/min11080860

Shanthi Bhavan, J., Joy, J., & Pazhani, A. (2023). Identification and recovery of rare earth elements from electronic waste: Material characterization and recovery strategies. *Materials Today Communications, 36*, 106921. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106921

Thompson, V. S., Gupta, M., Jin, H., Vahidi, E., Yim, M., Jindra, M. A., Nguyen, V., Fujita, Y., Sutherland, J. W., Jiao, Y., & Reed, D. W. (2018). Techno-economic and life cycle analysis for bioleaching rare-earth elements from waste materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6*(2), 1602–1609. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02771

USGS (U.S. Geological Survey). (2025). https://www.usgs.gov/faqs/what-a-critical-mineral?field_pub_type_target_id=All&field_release_date_value=&items_per_page=6&page=1&utm_source=chatgpt.com

Wang, J., & Xu, Z. (2015). Disposing and recycling waste printed circuit boards: Disconnecting, resource recovery, and pollution control. *Environmental Science & Technology, 49*(2), 721–733. https://doi.org/10.1021/es504833y

THE ROLE OF HUMAN CAPITAL – COMPETENCE AND PERSONAL COMPETENCIES OF PERSONNEL IN THE OPTIMISATION OF PROCESSES IN UNDERWATER MINING OF MINERAL RESOURCES

Zlatan Chervenkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: z.chervenkov@mgu.bg

Abstract: The present study investigates the role of human capital, with a particular focus on the competence and personal competencies of personnel, in the optimisation of processes in underwater mining of mineral resources. Emphasis is placed on the human factor as a critical determinant for the efficient operation of extraction processes and for the successful implementation of contemporary technological solutions. The concepts of “competence” and “competency” are contextualised within the framework of professional performance and workforce efficiency in the mining industry, with specific consideration of the distinctive characteristics of underwater mining, as well as the technical equipment and technological approaches employed. The study further examines the interrelationship between professional knowledge, education and qualification levels of specialists, individual attributes, and the capacity of personnel to respond effectively under dynamic and high-risk working conditions. These aspects acquire increased significance in the context of the ongoing expansion of automation and the integration of digitalised systems in underwater mining operations. In addition, the role of human resource management is analysed as an instrument for enhancing productivity, ensuring occupational safety, and improving the economic efficiency of mining enterprises. The study proposes a set of guidelines aimed at increasing the value of human capital and supporting the sustainable development of enterprises engaged in underwater mineral resource extraction.

Key words: underwater mining; extraction of inert materials; ballast quarries; riverbed and floodplain extraction; technologies; operational parameters; human capital; competence; competencies.

РОЛЯ НА ЧОВЕШКИЯ КАПИТАЛ – КОМПЕТЕНТНОСТТА И ЛИЧНОСТНИТЕ КОМПЕТЕНЦИИ НА ПЕРСОНАЛА ПРИ ОПТИМИЗАЦИЯТА НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ ПОДВОДЕН ДОБИВ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ

Златан Червенков

Минно – геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ: Настоящата статия разглежда ролята на човешкия капитал – компетентността и личностните компетенции на персонала в оптимизацията на процесите при подводен добив на полезни изкопаеми. В нея се обръща внимание на човешкия фактор като ключов елемент за ефективното функциониране на добивните процеси и внедряването на съвременни технологични решения. В изследването понятията „компетентност“ и „компетенция“, са адаптирани към професионалната реализация и ефективността на персонала в миннодобивната индустрия и в частност особеностите на подводния добив, както и към използваните технически средства и технологични методи. Разгледана е и връзката между професионалните знания, подготовката и квалификацията на специалистите, личностните качества и способността на персонала да реагира адекватно при динамични и рискови условия на работа. Тези качества са особено важни при прогресивно нарастващата автоматизация и внедряването на дигитализирани системи в подводния добив. Анализирана е и ролята на управлението на човешките ресурси като инструмент за повишаване на производителността, безопасността и икономическата ефективност при оптимизацията на минно-добивните предприятия. В резултат се формулират насоки за увеличаване стойността на човешкия капитал и постигане на устойчивото развитие на предприятията, осъществяващи подводен добив на полезни изкопаеми.

Ключови думи: подводен добив, добив на инертни материали, кариери за баластра, добив от поречия и заливни тераси, технологии, параметри, човешки капитал, компетентност, компетенции.

Въведение

Съвременните тенденции в развитието на минната индустрия все по-често са насочени към добив на полезни изкопаеми от морското дъно, реките и езерата и от дъното на континенталния шелф.

Подводното разработване на находища представлява сложен технологичен и организационен процес, който изисква висока степен на подготвеност и мотивираност на персонала, работещ безопасно, с прецизност и висока степен на координация между отделните звена: проектиране, планиране, добив, преработка (обогатяване), реализиране на готовата продукция и рекултивация. В основата на успешното протичане на тези процеси стои човешкият фактор (човешкия капитал) – персоналът, чиято компетентност и притежавани компетенции имат пряко отражение върху ефективността и устойчивостта на работата, както и внедряването на нови технологии в добивната дейност.

Умелото управление на човешкия ресурс в минното предприятие, разработващо едно или няколко находища по подводен способ, е съвкупност от личностни умения и качества на управляващите от една страна и анализ - опознаване, изследване и охарактеризиране на личностните качества на заетите с изпълнение на производствените процеси в минното предприятие лица от друга страна, които по същество са елементи на една или на няколко личностни компетенции. Талант, сръчност, мотивираност, прецизност, подчинение, готовност за изпълнение на експлоатационни задачи и отдаденост при работа, са едни от най – застъпените компетенции и личностни качества. Същевременно, обаче потенциалът за развитие у всеки един по отделно може да се разглежда като обект на научни изследвания, а така също и от инвеститорите (мениджърите) за разработване на концепция за преразпределение на индивидуалните задачи и задачите за работа в екип при изпълнение на основни или спомагателни дейности, в работна или ремонтно-аварийна обстановка.

В условия на нарастваща автоматизация, дистанционно управление и използване на роботизирани системи, ролята на човешките компетенции не намалява, а се трансформира. Именно личностните компетенции, заемат водещо място при оптимизацията на основните и спомагателните процеси при подводен добив на полезни изкопаеми.

Цел и задачи на изследването

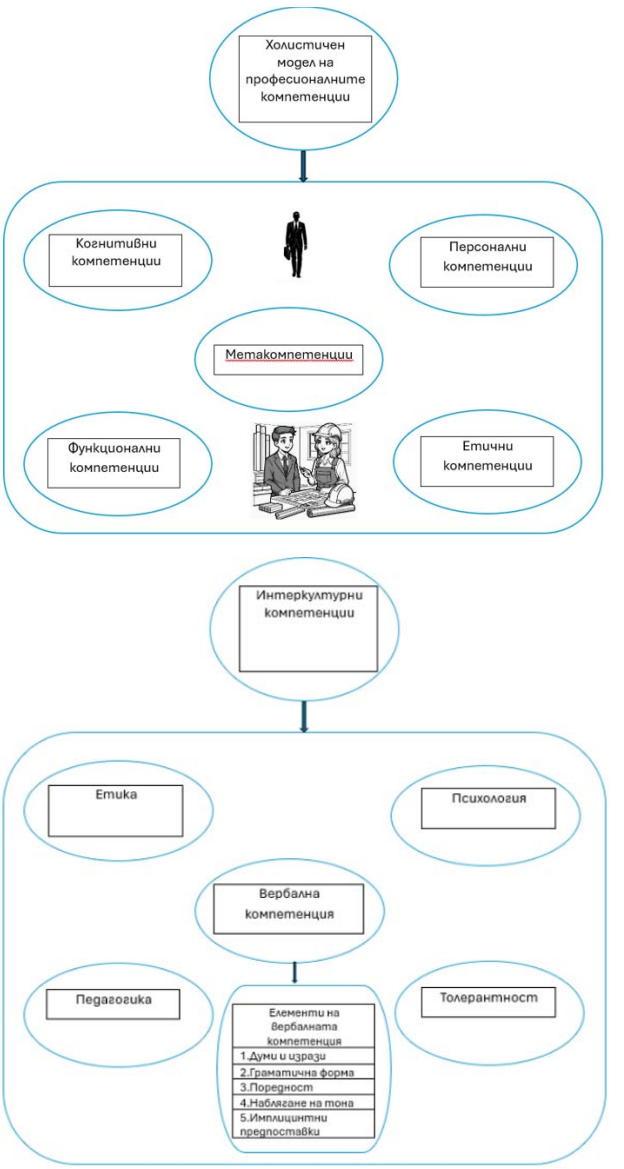
Целта на настоящото изследване е да се анализира ролята на личностните компетенции и общата персонална компетентност на „личния състав“ при оптимизацията на добивните процеси в подводни условия, както и да се изведат основните направления за развитие на човешкия капитал в тази област: систематизиране и надграждане на методите и методиките на обучение на персонала или придобиване на квалификации на заетите лица с добива на материали по подводен способ; постигане на висок икономически ефект от поощряване, прилагане на личностните компетенции и развиване на общата компетентност на работниците, служителите и ръководния състав при проектирането, планирането, организацията и осъществяването на добивните и спомагателни процеси; съобразяване на позициите и длъжностите на персонала, както индивидуално, така и при работа в екип, в зависимост от личните им компетенции и компетентност.

Задачите на изследването са свързани с правилното и ефективно управление, подготовка, квалифициране и преквалифициране на ресурса от хора – човешкия капитал, основните от които са:

1. Да се изясни същността и значението на личностните компетенции в професионалната среда на всички ангажирани в планиране и осъществяване на работните процеси.
2. Да се анализира влиянието на компетентността на персонала върху ефективността на планиране и водене на подводните добивни процеси.
3. Да се определят факторите, които подпомагат развитието на някои компетенции, общата компетентност и професионално поведение в екстремни условия.
4. Да се формулират насоки за оптимизация на човешкия ресурс в минно-добивната индустрия, в частност подводния добив на полезни изкопаеми, а от там и постигане на по-високи финансови резултати.
5. Да се набележат елементите на поведението и умението на персонала от съответните компетенции, имащи градивен ефект върху изпълнението на текущите задачи и внедряване на нови технологии в добива.
6. Стимулиране самоусъвършенстването на личностите и надграждане на професионалните умения чрез интерактивни симулации.
7. Гъвкавост при смяна на условията на средата на добив или форсмажорни обстоятелства, свързани с добива, преработката (обогатяването) или реализацията на добитото полезно изкопаемо или производните му.
8. Увеличаване степента на оптимизиране на процесите с постигане на по-висока производителност на труда чрез умело използване на личностните компетенции на персонала.

Анализ на личностните компетенции и тяхната роля в подводните добивни процеси

Фиг. 1. Личностни компетенции



Фиг. 2. Визуализация на професионалните и интеркултурните компетенции

Знанията, уменията, заложбите, талантите и личностните качества на съвременния човек, зает в една или друга степен в процесите от подводния добив и преработката (обогатяването) на полезни изкопаеми, не са по-различни от тези на хората, заети в други направления от обществения и професионален живот. Те са с огромна степен на значимост за заеманото място в обществото. Тези умения и качества се изучават, изследват и анализират в продължение на десетилетия. В древността лидерските качества в човека са забелязвани от хората с високо положение в обществото и притежателите им са използвани за влияние и управление на масите от хора. В наши дни тази съвкупност от различни по вид, по характер, по начин на придобиване и други, представляват голям интерес за работодатели, икономисти и преподаватели. Въведени и наложени са понятията „компетентност“ и „компетенция“ с цел дефиниране, изучаване и превръщане на обект за развитие и прилагане на елементите им като практически приложими модели върху хората. Те са обект на внимание на учените, като основен двигател на личностния просперитет, креативност и кариерно развитие. „Мъдрост“ е думата, която в миналото обобщава уменията и знанията на индивида, но по-скоро това е понятие без съществено обяснение на типа и степента на изученост или начетеност, опитност, вида и насоката на притежавания талант, умение и т.н.

„Растежът на съвременната икономика, базирана на знанието, става все по-малко зависим от материалните активи и съответно зависи повече от нематериалните, които се определят като човешки капитал (ЧК).“ (Чесинене и Станкевичене, 2011). Според Д. Грейсън, „човешкият капитал – повече от заводи, оборудване и инвентар – е крайъгълният камък на конкурентоспособността, растежа и производителността“ (Грейсън, 1998).

Персоналът е основен капитал – „служителите са актив на организацията и всяка инвестиция в тях се тълкува като специална инвестиция не само в текущите дейности на организацията, но и в нейното бъдещо развитие.“ (Андреев, 2019)

„Понятията „компетентност“ и „компетенция“ се зараждат през XX век, но имат дълго еволюционно развитие. Н. Чомски (САЩ) въвежда в научния апарат „компетенция“ във връзка със задълбочените си психо–лингвистични изследвания. Понятието „компетентност“ се появява доста по-късно. Използва се в теорията за управление на материалното и нематериалното производство, предприемаческата дейност, икономиката и професионалното образование, като критерий за осигуряване на необходими кадри и специалисти при съвременните условия и изискванията на бизнеса.“ (Милкова, 2015). „Компетентностите са универсалният език, на който вече разговарят институциите, организациите и специалистите на международно ниво.“ (Бизова, 2016). Ето защо, компетентността и компетенцията са с огромна степен на важност за работодателите и управителите на дружества разработващи находища по подводен способ.

Подводен добив на полезни изкопаеми – специфични особености

Подводният добив на полезни изкопаеми е сложен, но икономически и стратегически важен процес. Успешното му осъществяване зависи от правилния избор на технология на разработване и комплексна механизация, съобразяване с инженерно-геоложките условия на разработване на залежите и спазване на екологичните изисквания, както и правилата за безопасна работа.

Подводното разработване на находища за полезни изкопаеми е дейност с изключителна сложност и особена характеристика, изискваща висока степен на подготовка и адаптивност от страна на персонала. Средата е рискова, технологиите са специфични, а възможностите за директна човешка намеса са ограничени (работа под вода, забоят е на дъното на водоема, обектът на добив е невидим). В този контекст личностните компетенции придобиват съществено значение, тъй като именно те определят по какъв начин реагира конкретен специалист на непредвидени ситуации, управлява риска и взема решения под натиск.

1. Някои характерни особености на подводния добив са:
   - специфични условия на работа – добивът протича във водна среда, което усложнява достъпа, видимостта и условията на работа;
   - геоложки фактори – вида на залежите (пясъчни, чакълести, скални и глинести пластове) определя избора на метод, технология и техника;
   - ограничения – воденето на добивните дейности трябва да е съобразен с екологичните изисквания, влиянието върху водните екосистеми и устойчивостта на бреговете;
   - икономически аспект – подводният добив често пъти е по-скъп в сравнение с добива на сухо, но е незаменим в райони с високи подпочвени води и оводнени находища;
   - технически трудности – изисква се много внимание по време на работа, особено когато се работи в тежки условия като високи и стръмни брегове, нееднородност на полезното изкопаемо, наличие на глинести пластове и твърди жилни глинести включения, дълбоки водни басейни или турбулентни реки; нужна е адаптация към различни подводни минни условия и теренни особености, без да съществува възможност за пряк визуален контакт с обекта на добив.

Ето защо в последно време все повече се разчита на различни системи за следене и контрол на параметрите на добива, както и на възможности за управление и прецизиране на добивно-транспортния процес с помощта на автоматизирани системи и изкуствен интелект. Добивните машини са плаващи технически средства (ПТС) и като такива подлежат на регистрация и контрол от Дирекция „Корабна инспекция“, Изпълнителна агенция "Морска Администрация" и Министерството на транспорта. Изискват се свидетелства за специализирана квалификация за правоуправление на кораб до 40 БТ (бруто тона), както и свързаните с това специализирани разрешителни.

2. Средства и методи за подводен добив

Подводният добив се осъществява с помощта на различни по вид плаващи и наземни технически средства: Плаващи верижни многокофови багери (ПВМкБ)-Драги, Плаващи грайферни багери (ПГБ), Плаващи засмукващо-нагнетни багери (земснаряди), Наземни скрепери, Багери „Драглайн“ и еднокофови багери с долно гребане (тип „обратна лопата“) с удължена стрела.

ПВМкБ ПГБ Земснаряд Скрепер

Фиг. 3. Механизация за подводен добив

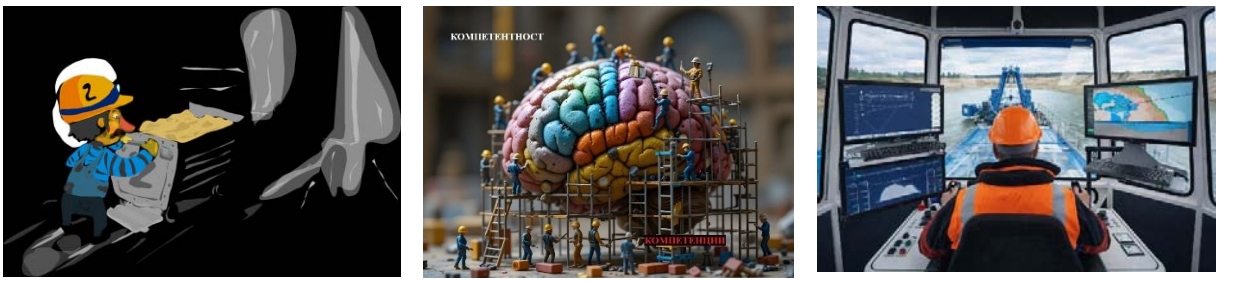
„Методите за добив на полезни изкопаеми под вода са тясно свързани с използваната комплексна механизация и по-точно с добивната машина и избраната технология. Най-често се прилага валово (общо) изземване, но в определени условия може да бъде селективно (сортиране в забоя, разделяне на кариерното поле на участъци в съответствие с качеството на суровината и др.)“(Копрев, 2016).

3. Компетентността на персонала като фактор за оптимизация

„Професионалният компетентностен модел, базиран на спецификите на работното място, представя компетентността като основа за функционалната дефиниция на „работното място“ (Бизова, 2016). Компетентността на персонала може да се разглежда като симбиоза между професионални знания и личностни качества. Тя е динамична категория, характеризираща личния състав, която се развива чрез обучение, личен пример, интерактивни семинари, разиграване на типични и нетипични казуси, обмяна на опит с аналогични находища разработвани по подводен начин, внедряване на добри производствени практики за надграждане на знанията и уменията, както и стимулиране за повишаване на вътрешната мотивация за професионално усъвършенстване. Това е основа за създаване на високо квалифициран персонал – умеещ, знаещ и можещ да изпълнява задълженията си по подводен добив на полезни изкопаеми по най-ефективен начин.

В производствените дейности при подводния добив, компетентният специалист не само притежава технически познания, но и умее да ги развива, надгражда и прилага в условия на неопределеност и на ограничена неизвестност на средата на добив. Оптимизацията на процесите зависи от способността на персонала:

- умело да управлява плаващите и наземните машини и съоръжения;
- да анализира набор от различни данни в реално време;
- да идентифицира рискове и предотвратява аварии и злополуки;
- да работи безопасно и ефективно с автоматизирани и дигитализирани системи;
- да спазва концернови, фирмени, производствени, качествени, екологични и етични стандарти;
- да способства и участва във внедряването на нови технологии.



Фиг. 4. Развитие на личностната компетентност

Развитието на компетентността на личността и основните личностни качества, необходими за ефективна работа в добивната индустрия, разработващи находища по подводен начин, включват елементите като:

- **емоционална устойчивост и самоконтрол** – способност за запазване на спокойствие и концентрация при аварийни ситуации;
- **отговорност и надеждност** – стриктно спазване на протоколите за добив, преработка и безопасност, както и свързаните с тях технологичните изисквания;
- **адаптивност и гъвкавост** – готовност за реакция при промяна на условията или при технологични и технически проблеми;
- **комуникативност и екипна работа** – ефективна координация в мултидисциплинарни екипи, често работещи дистанционно;
- **инициативност и аналитично мислене** – способност за предлагане на решения и оптимизации в реално време.

Тези качества са особено важни когато се използват сложни дигитализирани системи за автоматизирано или дистанционно управление на плаващите технически средства (ПТС) за добив под вода, където човешката грешка може да доведе до сериозни технологични, икономически и екологични последствия. Компаниите, които инвестират в развитието на компетентността на своите служители, постигат по-висока производителност, по-ниски нива на инциденти и по-добра адаптация към

технологичните промени. „В сферата на добива на полезни изкопаеми стремежът за осигуряването на висока ефективност, безопасност и намалено въздействие върху околната среда е довело до изследването и създаването на иновативни технологии и методи, позволяващи по-доброто планиране на минните работи. Новаторски подход в това отношение е внедряването на симулационни модели“ (Терзийски и колектив, 2023). „Използването на изкуствен интелект в минното планиране и развитие позволява прецизно моделиране на находища, динамичното оптимизиране на добивните планове, както и прогнозиране на различни видове рискове в реално време (разбира се използването на изкуствен интелект не премахва специалистите, а им помага за взимането на най-доброто решение за конкретния случай).“ (Терзийски и Пушкаров, 2025).

Оптимизация на подводния добив чрез управление на човешкия ресурс

Управлението на хора от други хора е дейност, възникнала още в зората на човешката цивилизация, дори преди създаването на държавата като форма за организиране на човешкото общество. Значението на качественото управление на човешкия фактор за развитието на обществото е огромно. В частност, при дружествата, експлоатиращи находища по подводен начин, също заема ключова роля. Самото понятие "управление" е ръководенето на хора, които работят за постигането на общи цели и имат общи ценности. Това е процес на планиране, организиране, координиране и контрол на дейността на дружество, извършващо подводен добив чрез осигуряване и оптимално използване на ресурси за определена организация (човешки, финансови, технологични, информационни и т.н.) за постигане на конкретни цели.

Управлението на човешките ресурси в предприятието като специфична управленска дейност е насочено към най-важния ресурс за съществуването и развитието на всяка организация – хората с техните компетенции и компетентност (способности, нагласи, ценности, морал, мотивация и поведение). Най-общо управлението на човешките ресурси може да се определи като специфична управленска дейност за привличане, задържане, мотивиране, развитие и използване на хората, ангажирани с проектирането, планирането и воденето на процесите, свързани с експлоатацията на оводнени находища. Развитието на личностните компетенции и общата компетентност следва да бъде системен процес, интегриран в управлението на човешките ресурси.

„Инвестициите във физическа подготовка на служителите показват не само икономическа полза, която включва по-големи мащаби на производителност и съответно по-високо възнаграждение поради намалена заболеваемост, но и социален ефект – по-добро качество на живот в широк смисъл.“ (Чесинене Р и Станкевичене А, 2011). „Компаниите, които игнорират човешкия капитал, ще поемат по пътя на динозаврите“ (Гейтс и Лангевин, 2010). Човешкият капитал, представляващ основно екип от високо квалифицирани и компетентни лица, е източник на конкурентно предимство за компаниите и е от съществено значение за осигуряване на успешно и устойчиво развитие на бранша и икономиката като цяло.

Очаквани резултати

Положителните резултати от човешкия ресурс, представен от висококвалифициран персонал, подготвен и обучен, надграждащ компетентността си, са много. Те неминуемо водят до желания икономически ефект за работодателите, инвеститорите, отрасъла и икономиката като цяло. Основните предимства на инвестирането в оценка и надграждане на човешкия капитал чрез повишаване на компетенциите и общата компетентност на персонала са:

- ефективно използване на заетите лица с подводен добив по критерия на изпълнени задачи;
- повишаване производителността чрез по-прецизно изпълнение на технологичните процеси по добив;
- повишаване ефективността на труда на персонала по време (човекочасове);
- повишаване чистото време на използване на комплексната механизация за подводен добив (чистото време в машиносмяна);
- намаляване времето на спомагателните операции;
- минимизиране на риска от човешки грешки и инциденти;
- намаляване процента на аварийност, а от там - намаляване разходите за части, консумативи и времето за аварийни престои;
- ефективно използване на машините по отношение натовареност;
- целесъобразно използване на енергийните мощности;
- повишена безопасност – намаляване или предотвратяване на трудови злополуки;
- подобряване на здравословните условия на труд;
- повишаване на колективната компетентност и обща икономическа ефективност на заетите лица.

Могат да бъдат посочени и други ползи от високата компетентност на персонала, осъществяващ водещите дейности при подводния добив, но дори и от изброените до тук става ясно, че човешките ресурси имат изключително значение за ефективното и рентабилно функциониране на предприятията, които го осъществяват. Машините сами по себе си са „просто метал“ или съвкупност от заемащи място технически средства без реална стойност, ако липсва квалифициран и компетентен персонал, специализиран в тяхното управление, поддръжка и превантивен контрол. Именно човешкият фактор е този, който осигурява безопасното изпълнение на производствените процеси и успешното реализиране на поставените от ръководството задачи.

Заключение

Личностните компетенции и общото професионално ниво на персонала представляват съществен стратегически фактор за успешното осъществяване на подводното разработване на находища на полезни изкопаеми. Високото технологично изпълнение на производствените процеси изисква не само задълбочени знания и практически умения, но и устойчиви личностни качества и компетенции, които да гарантират необходимата степен на безопасност, отговорност и ефективност на минно-добивната дейност.

Оптимизирането на добивните процеси е възможно единствено при задълбочено познаване на технологията на добив, специфичните особености на подводния начин на разработване на находищата, геоложките и хидрогеоложките условия на находището, както и техническите характеристики и експлоатационните възможности на използваната комплексна механизация. Съществено значение има и съобразяването с условията за разработване на находището, регламентирани в доклада за оценка на въздействието върху околната среда (ОВОС), техническата и проектната документация, както и в предписанията на контролните и инспектиращите органи и представителите на концедента – държавата, в лицето на Министерството на енергетиката. В този контекст компетенциите, свързани с обучението, професионалното развитие и усъвършенстването на личността, придобиват особено значение за ефективното внедряване на по-производителни и технологично обосновани методи и подходи при разработването на подводни или оводнени находища. Наред с това те допринасят за повишаване на общото професионално развитие на специалистите и за формиране на способности за оптимално, ефективно и рационално изпълнение на заложените технологични и производствени програми. Необходимо е системно инвестиране в човешкия капитал чрез обучение, повишаване на квалификацията, професионално сертифициране и развитие на личностните и професионалните компетенции. Човешкият фактор е основният носител на адаптивност, иновативност и устойчивост при проектирането, планирането и практическото осъществяване на подводния добив, както и при развитието на съвременната минна индустрия като цяло.

Благодарности. Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0002-C01 „Развитие и усъвършенстване на професионалното и интердисциплинарно образование в техническите и икономически науки и повишаване на научноизследователския капацитет на добивната промишленост чрез проектна докторантура“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз.

Литература

Андреев, М., (2019). *Компетентностен подход в управлението на човешките ресурси*. София: УНСС.

Бизова М., (2016). *Компетентност, компетентностен подход и разработване на компетентностни модели*. Педагог, София

Гейтс, С. & Лангевин, П., (2010). Мерки, стратегия и резултати в областта на човешкия капитал: възприятия на HR мениджърите. *Списание за счетоводен одит и отчетност 23 (януари):* 111-132. ДОИ:10.1108/ 09513571011010628

Грейсън, Д. (1998). Работни места: необходимостта от незабавно облекчение. Макмилан Прес (Macmillan Press), стр. 237–245.

Копрев, И. (2016). *Подводен добив на полезни изкопаеми*. София.

Милкова, Р. (2015). Компетентността и компетенциите на личността – стратегия на университетското образование през XXI век, Стратегии на образователната и научната политика.

Милкова, Р., Милков Л. (2025). *Компетентност и компетенции*, София.

Терзийски, Д., Александрова, Е., Кайков, Д. (2023). Приложение на специализиран софтуер за планиране на минните работи в открити рудници и кариери. Сборник с доклади: XVII Международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, 18 – 22 Септември 2023 г., Варна, с. 233-241, ISSN 2535-0854

Терзийски, Д. & Пушкаров, М., (2025). Откритите мини на бъдещето: иновациите, които трансформират минната индустрия, XVIII Международна конференция по открит добив на полезни изкопаеми, 8–12 Септември 2025 г., Варна, с. 3-10, ISSN 2535-0854

Чесинене, Р., Станкевичене, А. (2011). Ролята на човешкия капитал в създаването на стойност: теоретични прозрения, *Ekonomika* , 90(4), стр. 49–62. DOI: 10.15388/Ekon.2011.09.25.

СЕКЦИЯ

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА МИНИТЕ

SECTION

MINE MECHANISATION, ELECTRIFICATION, AND AUTOMATION

MODELLING OF THE CALCULATED SIZE FRACTION YIELD IN SEMI-AUTOGENOUS MILLS BASED ON PRODUCTION DATA

Ralitsa Boncheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, e-mail: boncheva81@gmail.com

ABSTRACT. The present study investigates the yield of the calculated size fraction in two semi-autogenous mills operating under different technological conditions and processing different types of ore. The analysis is based on computer processing of production data recorded by the process control systems. Statistical methods were applied to identify relationships between the calculated size fraction yield as the objective function and the main control parameters of the grinding process. Mathematical models were developed and evaluated in terms of adequacy and statistical significance. For each mill, the most appropriate model was selected based on approximation quality criteria. A comparative analysis of the obtained results was performed, highlighting similarities and differences in system behaviour under varying input parameters. The conclusions are aimed at improving process efficiency and optimising grinding performance.

Key words: semi-autogenous mill, yield, target size fraction, mathematical modelling, statistical analysis, process parameters.

МОДЕЛИРАНЕ НА ДОБИВА НА РАЗЧЕТНА КЛАСА ПРИ ПОЛУАВТОГЕННИ МЕЛНИЦИ НА БАЗА ПРОИЗВОДСТВЕНИ ДАННИ

Ралица Бончева

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В разработката е изследван добивът на разчетна класа от две полуавтогенни мелници, работещи при различни технологични условия и използвани за смилане на различни видове руди. Анализът е основан на компютърна обработка на производствени данни, регистрирани от системите за управление и контрол. Чрез статистически методи са установени зависимости между добива на разчетна класа като целева функция и основните управляващи параметри на процеса. Изградени са математични модели, оценени по показатели за адекватност и статистическа значимост. За всяка от мелниците е определен най-подходящият модел въз основа на критериите за качество на апроксимация. Извършен е сравнителен анализ на получените резултати, като са установени сходства и различия в поведението на системите при изменение на входните параметри. Формулирани са изводи, насочени към повишаване ефективността на процеса на смилане и оптимизиране на добива.

Ключови думи полуавтогенна мелница, добив, разчетна класа, математическо моделиране, статистически анализ, технологични параметри.

Въведение

Един от основните параметри на барабанните полуавтогенни мелници е добивът на разчетна класа.

Добив на разчетна класа се изразява с процентното съдържание на готовия продукт в обработвания материал. Характерно за него е това, че този изходен параметър определя процеса на смилане откъм качествената му страна. Добивът на разчетна класа се явява ефективен критерий, защото характеризира влиянието на всички управляващи фактори. В настоящия момент се прилагат сравнително точни методи за оценка на качеството на готовия продукт: ситов анализ, сидиментация, измерване на относителната повърхност, микроскопичен анализ, измерване на относителната повърхност, което я прави и статистически ефективна.

Следва да се посочи, че добивът и производителността на мелницата са две взаимно свързани функции и обстойното им изследване показва, че не би могло да се даде приоритет на нито едната от тях.

Определяне на управляващите параметри, влияещи върху целевата функция „добив на разчетна класа“

Първият етап при моделирането на процеса в барабанни полуавтогенни мелници е ясно формулиране на целта на изследването. След определянето ѝ се пристъпва към избор на управляващите фактори..

При избора на управляващи фактори (Nedyalkov P, 2020) трябва да се имат предвид някои изисквания, които определят и до голяма степен техния избор:

1. Всеки управляващ фактор трябва да има определена област на определяне.
2. Факторите трябва да бъдат управляеми. Това изискване означава факторите да се установят и поддържат на различни нива в дефиниционната им област.
3. Факторите трябва да се измерват с възможно най-висока точност.
4. Факторите трябва да бъдат независими – в цялото множество от фактори да няма функционално свързани фактори. При активен експеримент това изискване осигурява възможност за установяване на всеки фактор на определено ниво, независимо от нивата на останалите фактори.
5. Съвместимост на факторите – това изискване позволява да се реализират всички комбинации от нива на факторите и техните дефиниционни области, както когато се търси областта на съвместимост.

Броят на първоначално набелязаните управляващи фактори се редуцира съгласно посочените изисквания, след което се определят и отсяват съществените от несъществените управляващи фактори.

След като се оформи списъкът на съществените фактори се преминава към изпълнението на следващите етапи на моделирането (Minin I., P. Nedyalkov, S. Savov,

2021). С това обаче изборът на съществените фактори не приключва. След провеждането на експериментите при статистическия анализ на получените резултати може да се окаже, че не са включени всички съществени фактори и моделът да се окаже неадекватен, при което се налага моделирането да се върне отново в етапа на избора на управляващите фактори.

Задачата на настоящото изследване е да се намери връзката между управляващи параметри на мелници тип SAG и една целева функция посредством обработката на данни получени от системите за контрол. Като за целта те биват обработени статистически с компютърни програми. За целева функция е избран добивът на разчетна класа на мелницата - $K_{80\%}, t/h$. Управляващите параметри, които биват измервани и записвани са:

1. Скорост на въртене на барабана. Тази скорост е относителната скорост на барабана и се дава в проценти - $\psi,\ \%$ или в обороти $n,\ \min^{-1}$.
2. Дебит на постъпващата в мелницата руда за единица време - $Q,\ t/h$. Този параметър характеризира количественото натоварване на машината.
3. Дебит на постъпващата в мелницата задна вода - $Q_B,\ m^3/h$. Постъпващата в мелницата вода има предимно транспортни функции за извеждане на готовия смлян продукт от работната камера – барабана.
4. Маса на пълнежа в барабана на мелницата - $M,\ t$. Този параметър показва запълването на барабана на машината и се измерва от товарна клетка (везна) на задния лагер.
5. Износването на барабана на мелницата - $i,\ \%$. Този параметър не се получава от системите за управление, а е получен след лазерно сканиране на облицовките.

Данни за обработка

Първоначално на таблица 1 са показани данните от мелница тип - SAG 6,7 x 4,4, които са мащабирани поради изискванията за конфиденциалност. Данните в таблица 1 се отнасят за мелница SAG 6,7 x 4,4 като, добивът на разчетна класа на мелницата се измерва от системата за управление и контрол като параметър показващ колко тона за час смляна руда излиза от мелничния агрегат с 80% готов продукт.

На таблица 2 са показани данните (мащабирани поради изискванията за конфиденциалност) от системата за управление и контрол на мелница тип SAG 8,5 x 5,3. Тук системата за управление и контрол измерва добивът на разчетна класа, като процентното съдържание на готов продукт в изходящия продукт на мелничния агрегат. Освен това в таблица 2 скоростта на мелницата е показана чрез оборотите на двигателя на мелницата. Останалите параметри са показани по същия начин както и в таблица 1. Трябва да се има в предвид, че мелница SAG 8,5 x 5,3 е значително по-голяма и рудата която смила е значително по твърда и абразивна.

Таблица 1

$\psi,\ \%$ X1	$Q_B, m^3/h$ X2	$Q, t/h$ X3	$M,\ t$ X4	$i,\ \%$ X5	$K_{,80\%}, t/h$ Y
67,6	108,9	111,2	134	12,40	59,7
80,7	115,1	112,4	133	24,61	75,6
80,9	91,9	114,9	133,6	38,05	82,0
77,2	108	114,1	134,5	45,38	79,0
82,7	103,7	108,5	134,5	57,58	83,7
77,9	79,1	109,8	134,6	67,47	82,9
71,7	81,8	106,7	134,2	77,63	75,6
75,4	86,1	112,9	136,9	90,24	82,9
76,8	94,4	107,5	137,5	100	83,8
76,5	88,2	107,9	137,8	0	69,5
69,5	92,2	109,1	136,4	11,76	80,1
76,8	86,1	107,8	137,6	18,76	80,1
75,9	93,6	108,3	138,5	33,36	104,0
81,3	105,6	95,1	145	40,07	115,8
73	89,7	103,2	143,6	51,34	98,7
79,3	77,9	93,4	144,7	60,33	93,1
72,6	82,7	94,9	143,4	70,94	90,7
77,7	61,2	95	143,9	77,32	124,1
74,6	82,9	93,8	143,3	0	118,2
114,9	76,8	96,8	141,2	15,36	70,1
82,2	81,1	97,2	142,3	21,73	81,2
85,8	151,2	95,7	144,6	31,22	113,1
89	122,3	88,1	149,8	42,64	94,9
88,9	102,8	90,5	149,2	50,37	90,3
76,9	99,6	98,1	150,7	58,31	120,7
76,3	33,3	75,1	142,8	0	114,7
73,9	34,9	73,4	142,8	7,21	118,6
84,8	78,5	82,6	149,6	16,84	123,8
82,6	78,3	95,6	159,7	25,12	131,0
83,7	91,7	97,7	157,7	35,93	126,7
78,6	94,3	95,4	156,7	36,80	123,8
72,8	40,1	52,4	151,9	54,36	131,0
72,4	111,9	100,5	151,4	56,26	126,7
77,9	125,3	103,7	156,6	0,00	139,7
68,5	126,7	95,7	151,5	8,80	109,5
72,2	83,8	105,3	155,9	21,58	131,9
86,5	107,8	104,8	157,5	27,79	126,7
74,5	79,5	102,3	156,6	39,28	139,7
74,2	71,9	80,2	141,3	0	109,5
77,7	80,35	82,5	142,3	12,40	107,8

На таблица 2 са показани данните (мащабирани поради изискванията за конфиденциалност) от системата за управление и контрол на мелница тип SAG 8,5 x 5,3. Тук системата за управление и контрол измерва добивът на разчетна класа, като процентното съдържание на готов продукт в изходящия продукт на мелничния агрегат. Освен това в таблица 2 скоростта на мелницата е показана чрез оборотите на двигателя на мелницата. Останалите параметри са показани по същия начин както и в таблица 1. Трябва да се има в предвид, че мелница SAG 8,5 x 5,3 е значително по-голяма и рудата която смила е значително по твърда и абразивна.

Таблица 2

n, $\min^{-1}$ X1	$Q_B, m^3/h$ X2	$Q, t/h$ X3	M, t X4	i, % X5	$K_{-0,08}$ Y
982	311	198	77,3	26,34	59,43
1001,9	260	153	80,8	27,38	73,82
996	297	182	75,2	37,52	67,03
998	389	309	72,4	38,19	70,47
989	236	133	74,3	53,49	39,8
991	262	145	72,8	54,20	52,72
990	268	131	74,1	65,49	72,61
990	338	208	70,6	66,47	52,07
990	296	215	74,6	83,34	74,17
989	363	264	81,7	0,00	67,32
990	390	284	77,8	21,44	70,69
988	319	214	79	22,51	73,82
991	377	316	73	40,47	60,1
990	400	321	71,3	41,43	65,43
989	302	218	74,2	61,80	73,44
1057,2	367	290	71,9	62,85	71,57
1084,9	336	249	70,3	77,94	73,74
1005,6	371	292	68,5	0,00	65,88
938	362	294	68,9	21,82	72,38
969	344	273	68,8	22,91	73,35
995	348	277	68,2	35,98	74,45
927	335	261	68,1	36,81	67,7
1007	385	300	69,7	51,51	73,65
1007,2	386	304	67,1	52,62	73,83
1005,2	320	215	64,9	72,27	72,72
921	391	318	69,3	0,00	70,56
892	378	301	67,6	21,18	72,98
953	354	281	68,2	22,23	72,99
958	339	273	64,3	30,08	65,81
888	349	286	69,7	30,50	74,27
964	359	276	69	38,69	73,82
947	339	276	68,7	39,68	60
985	312	227	66	58,37	73,51
882	322	285	66,6	0,00	62,03
914	325	242	67,9	15,75	66,56
881	343	300	67,1	16,46	65,16
880	339	247	69,8	38,48	62,3
1006	384	293	68,2	39,59	67,09
978	354	262	66,9	56,11	71,38
1005,9	406	305	72,5	0,70	68,74
928	377	276	72,2	24,91	71,46
953	383	198	69,6	26,57	68,85
901	369	153	68	43,21	71,18
946	361	182	69,7	44,24	63,76
1005,1	371	309	66,4	61,21	60,56
982	385	133	66,6	62,17	56,79
1001,9	394	145	77,3	74,27	73,95
996	311	131	80,8	74,98	74,17
998	260	208	75,2	92,84	59,43
989	297	215	72,4	26,34	73,82
991	389	264	74,3	27,38	67,03
990	236	284	72,8	37,52	70,47
990	262	214	74,1	38,19	39,8
990	268	316	70,6	53,49	52,72
989	338	321	74,6	54,20	72,61

Резултати от обработката на данните от системите за управление на мелница тип SAG

Данните от мелниците SAG са обработени статистически с програмите R STUDIO (Задорожный С. С, 2023) и STATGRAFICS като се получиха множество модели. Оценката на значимостта на коефициентите на регресия е извършена по критерия на Стюдент при зададено ниво на значимост $\alpha = 0,05$ и минимум 8 степени на свобода $\nu > 8$. В използвания софтуер тази процедура се реализира чрез изчисляване на вероятността за статистическа значимост на регресионните коефициенти. Когато тази вероятност е:

$$P - Value < \alpha \quad (1)$$

тогава съответният регресионен коефициент се приема за статистически значим при избраното ниво на значимост α (доверителна вероятност).

Адекватността на регресионното уравнение е оценена чрез проверка на значимостта на критерия на Fisher..

Най-адекватен модел получен посредством използването на програмата R STUDIO се отнася за мелница SAG 6,7 x 4,4 и е показан на Таблица 4.

Таблица 3. *Параметри на модела от R STUDIO*

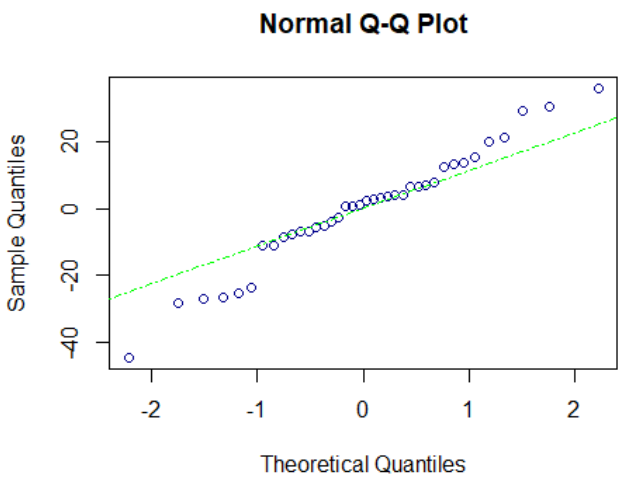
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
i	43.33029	19.47518	2.225	0.0330
Q	0.17888	0.08654	2.067	0.0467
n	6.98559	5.94125	-1.176	0.02481
M	0.43317	0.36245	1.195	0.02406
i/M	0.04537	0.04105	1.105	0.02770
Parameter	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
i	1	412153	412153	1226.8484
Q	1	7792	7792	23.1940
n	1	2438	2438	7.2567
M	1	940	940	2.7980
i/M	1	410	410	1.2219
Residuals	33	11086	336	
Статистика на модела				
R^2 =			97,45	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			97,06	%
Standard Error of Est. =			18,33	
F-statistic =			252,2	
p-value =			< 2,2e-16	

Анализът на параметрите показва, че коефициентът на детерминация R^2 е 97,45%, а коригираният коефициент на детерминация надхвърля 97%. Моделът демонстрира най-добри статистически показатели в сравнение с останалите изследвани модели. Стойността на показателя P-Value за моделите е под критичното ниво 0,05, т.е. може да се приеме, че моделите са адекватни с доверителна вероятност над 97%.

Математическият модел може да се представи във вида:

$$k = 43,3.i - 0,18.Q + 6,98.n + 0,433.M + 0,045\frac{i}{M}, 80\% \quad (2)$$

Съответствието между стойностите на модела и експерименталните данни е представено на сравнителната графика показана на фигура 1.



Фиг. 1. Корелация между експериментални данни и математичен модел за SAG 6,7 x 4,4

Най-адекватен модел получен, посредством използването на програмата STATGRAFICS се отнася за мелница SAG 8,5 x 5,3 и е показан на таблица 4.

Таблица 4. Параметри на модела от STATGRAFICS

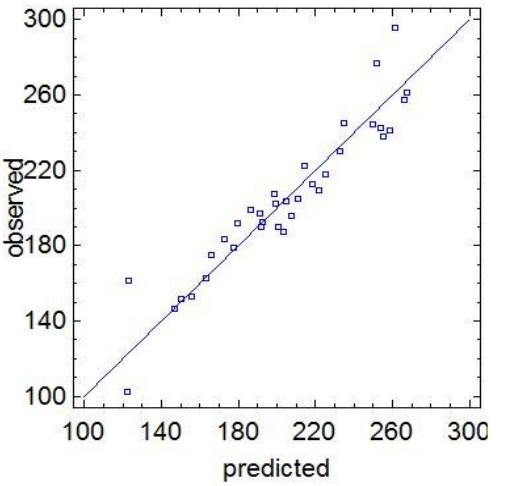
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
$\frac{M.n}{Q}$	0,29357	0,0058036	57,47	0
	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
Model	1	2245559	2245559	0
Residual	1	3232,96	67,353	
Total	45			
Статистика на модела				
R^2 =			98,59	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			98,58	%
Standard Error of Est. =			8,206	
Maen absolute error =			6,833	
Durbin – Watson statistic=			1,7432	

Анализът на параметрите на модела показва, че коефициентът на детерминация R^2 е 98,59%, а коригираният коефициент на детерминация надхвърля 98%.. Този модел има най-добри показатели на оценка спрямо всички останали. Стойността на показателя на доверителна вероятност (P-Value) за моделите е под критичната 0,05, т.е. може да се приеме, че моделите са адекватни с доверителна вероятност над 98%.

Математическият модел може да се представи във вида:

$$K_{-0,08} = \frac{M.n}{Q}, \% \quad (3)$$

Съответствието между стойностите на модела и експерименталните данни е представено на сравнителната графика показана на фигура 2.



Фиг. 2. Корелация между експериментални данни и математичен модел за SAG 8,5 x 5,3

Изводи

На база на настоящото изследване става ясно, че могат да бъдат направени следните изводи:

1. Добивът на разчетна класа и при двете мелници се влияе съществено от скоростта на въртене, дебита на постъпващата руда и масата на пълнежа.
2. При мелница SAG 6,7 x 4,4 е установено влияние на износването на облицовките върху добива на разчетна класа.
3. Увеличаването на скоростта на барабана води до увеличаване на добива на разчетна класа на мелницата поради подобряване на скоростния режим на мелницата.
4. Увеличаването на дебита на постъпващата руда води до намаляване на добива, вероятно поради редуциране на ефективните удари.
5. В изследвания интервал увеличаването на масата на пълнежа води до подобряване на добива, което може да се свърже с нарастване на относителния брой ефективни удари.

Литература

Задорожный, С. С. (2023). *Статистическая обработка данных на языке R: Учебно-методическое пособие*. Москва: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.

Nedyalkov P. (2020). Reliability function improved fitting using goodness-of-fit procedures", ISSN: 2683-0027, *Journal of Mining and Geological Sciences*, pp. 161-166, Vol.63, Part III, publ. "St. Ivan Rilski" UMG – Sofia, 2020.

Minin Iv., Nedyalkov, P., Savov, S. (2021). Research of charge load influence over tumbling mill characteristic through general utility function, ISSN: 1314-7471, pp. 819-826, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Sofia, Bulgaria 2021.

DETERMINING THE RELATIVE ENERGY CONSUMPTION OF SEMI-AUTOGENOUS MILLS THROUGH COMPUTER PROCESSING OF INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM DATA

Ralitsa Boncheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, E-mail: boncheva81@gmail.com

ABSTRACT. This study investigates the relative energy consumption of two semi-autogenous (SAG) mills operating under distinct operational conditions. The research methodology is based on the computational processing of real-time data extracted from supervisory control systems during the comminution of various ore types. Statistical analysis was performed to establish mathematical relationships between the objective function (relative energy consumption) and the corresponding control parameters logged by the automation systems. The derived mathematical models were rigorously evaluated regarding their statistical adequacy and significance. A comparative analysis was carried out to select the most appropriate regression model for each mill. Based on the analytical and graphical interpretation of the experimental data, key operational similarities and variations between the models were identified, providing insights into process optimisation.

Key words: semi-autogenous mill, relative energy consumption, mathematical model, grinding, statistical analysis.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТНОСИТЕЛНИЯ ЕНЕРГОРАЗХОД НА ПОЛУАВТОГЕННИ МЕЛНИЦИ ЧРЕЗ КОМПЮТЪРНА ОБРАБОТКА НА ДАННИ ОТ СИСТЕМИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Ралица Бончева

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

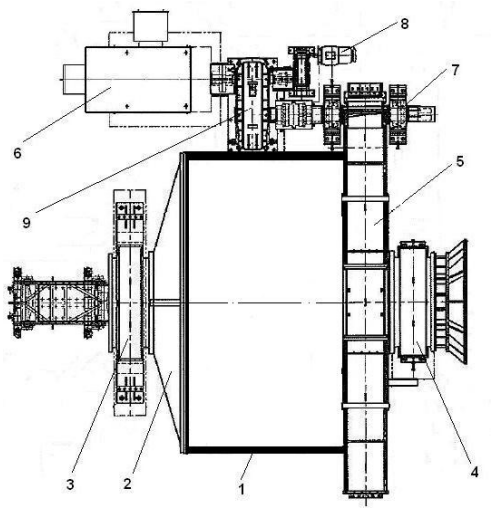
РЕЗЮМЕ. Настоящото изследване е посветено на оценката на относителния енергоразход при две полуавтогенни мелници, функциониращи в различни технологични режими. Методологията се базира на компютърна обработка на данни, генерирани от индустриалните системи за автоматизирано управление и контрол в процеса на смилане на разнообразни типове руди. Извършен е многофакторен статистически анализ за установяване на количествените зависимости между целевата функция (относителен енергоразход) и основните управляващи параметри. Получените математически модели са верифицирани по отношение на тяхната адекватност и статистическа значимост. Проведен е сравнителен анализ на прогнозните възможности на моделите, като за всеки мелничен агрегат е дефинирано оптималното регресионно уравнение. Въз основа на аналитичната и графичната интерпретация на резултатите са идентифицирани основните закономерности, рефлектиращи върху енергийната ефективност на процеса.

Ключови думи: полуавтогенна мелница, относителен енергоразход, математически модел, смилане, статистически анализ.

Въведение

Инсталираните индустриални полуавтогенни мелници са оборудвани със специализирани системи за контрол и управление, които архивират технологичните параметри на процеса в реално време за последващ анализ.

Мелниците, тип SAG (Фиг. 1), представляват барабанни полуавтогенни мелници, които се състоят от барабан 1, със страничните дъна (капаци) 2, на които са монтирани шийките лагерувани на плъзгащите лагери 3 – заден и 4 - преден.



Фиг. 1. Общ изглед на мелница тип SAG

Двигателят 6 задвижва чрез съединител редуктора 9, който е куплиран на вал – зъбното колело 7, зацепено със зъбния венец 5. Задвижването е оборудвано и с помощен двигател 8 и спирачка, използвани при техническо обслужване и ремонт на мелницата. Те работят при каскаден и водопаден скоростен режим. В барабана смилането се осъществява чрез удар, стриване и смачкване на рудата от едрите късове и топките.

Един от основните параметри на барабанните полуавтогенни мелници е относителният енергоразход.

Относителният енергоразход е количеството енергия, която е вложена за получаване на единица готов продукт. Той характеризира процеса на смилане откъм неговата енергийна страна.

Определяне на управляващи параметри влияещи на целевата функция относителен енергоразход

Първата задача при математическото моделиране на процесите в барабанните полуавтогенни мелници е точното дефиниране на целта на изследването и класификацията на технологичните фактори. Към входящите управляващи фактори се предявяват следните методологични изисквания:

1. *Определеност на дефиниционната област*: Всеки управляващ фактор трябва да притежава ясно ограничени

и технологично възможни граници на вариране (минимални и максимални стойности).

2. *Управляемост*: Факторите трябва да позволяват целенасочено установяване и стабилно поддържане на различни нива в рамките на тяхната дефиниционна област.

3. *Точност на измерване*: Стойностите на изследваните фактори трябва да се регистрират с възможно най-висока точност и минимална експериментална грешка.

4. *Независимост*: В анализираното множество не трябва да съществуват функционално свързани фактори. При провеждането на активен експеримент това изискване осигурява възможност за установяване и изменение на всеки фактор на определено ниво, независимо от нивата на останалите променливи.

5. *Съвместимост*: Изискването изключва взаимното блокиране на факторите и позволява физическото реализиране на всички комбинации от техните нива в дефиниционната област, което се явява необходимо условие при търсенето на оптимален технологичен режим.

Броят на първоначално набелязаните управляващи фактори се редуцира съгласно посочените критерии, след което се извършва детайлно отсяване на съществените от несъществените за изследването променливи.

Основната цел на настоящата разработка е установяването на количествените математически зависимости между управляващите параметри на мелници, тип SAG и дефинираната целева функция въз основа на статистическа обработка на промишлени масиви от данни, генерирани от системите за контрол. За целева функция на изследването е избран относителният енергоразход (Y).

Входящите управляващи параметри, които се измерват и архивират в процеса на работа, са:

1.Скорост на въртене на барабана (X_1). Представя се като относителна скорост в проценти от критичната ($n, \%$) или в реални обороти за минута (n, min^{-1}).

2.Дебит на входящата руда ($X_2, t/h$). Параметърът отразява текущото количествено натоварване на мелничния агрегат.

3.Дебит на технологичната (задната) вода ($X_3, \frac{m^3}{h}$). Постъпващият воден поток изпълнява предимно транспортни функции за извеждане на готовия класифициран продукт от работното пространство на барабана.

4.Маса на пълнежа в барабана на мелницата (X_4, t). Този параметър характеризира степента на общо запълване на машината и се измерва чрез товарни клетки (везни), разположени под опорния заден лагер.

5.Износването на барабана на мелницата ($X_5, \%$). Този параметър не се получава текущо от автоматизираните системи за управление, а се определя периодично въз основа на данни от детайлно лазерно сканиране на вътрешния профил на мелницата.

Данни за обработка

Първоначално в таблица 1 са представени експерименталните данни за мелничен агрегат, тип SAG 6.7x4.4, които са мащабирани с оглед спазването на изискванията за конфиденциалност. Данните в таблица 1 отразяват работата на мелница SAG 6.7x4.4, като добивът на разчетна класа се регистрира от автоматизираната система за управление и контрол. Този параметър показва производителността на агрегата по отношение на изходящия поток смляна руда (t/h), съдържащ 80% готов продукт.

Таблица 1

ψ, %	$Q_B, m^3/h$	$Q, t/h$	M, t	i, %	$E, kWh/t$
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
67,6	108,9	111,2	134	12,40	15,6
80,7	115,1	112,4	133	24,61	17,9
80,9	91,9	114,9	133,6	38,05	17,9
77,2	108	114,1	134,5	45,38	16,1
82,7	103,7	108,5	134,5	57,58	14,1
77,9	79,1	109,8	134,6	67,47	14,2
71,7	81,8	106,7	134,2	77,63	17,1
75,4	86,1	112,9	136,9	90,24	17,9
76,8	94,4	107,5	137,5	100	13,9
76,5	88,2	107,9	137,8	0	15,0
69,5	92,2	109,1	136,4	11,76	19,8
76,8	86,1	107,8	137,6	18,76	16,1
75,9	93,6	108,3	138,5	33,36	23,5
81,3	105,6	95,1	145	40,07	20,9
73	89,7	103,2	143,6	51,34	23,2
79,3	77,9	93,4	144,7	60,33	22,9
72,6	82,7	94,9	143,4	70,94	15,7
77,7	61,2	95	143,9	77,32	17,3
74,6	82,9	93,8	143,3	0	22,0
114,9	76,8	96,8	141,2	15,36	22,6
82,2	81,1	97,2	142,3	21,73	17,9
85,8	151,2	95,7	144,6	31,22	24,3
89	122,3	88,1	149,8	42,64	18,5
88,9	102,8	90,5	149,2	50,37	20,8
76,9	99,6	98,1	150,7	58,31	21,0
76,3	33,3	75,1	142,8	0	24,3
73,9	34,9	73,4	142,8	7,21	18,5
84,8	78,5	82,6	149,6	16,84	20,8
82,6	78,3	95,6	159,7	25,12	22,3
83,7	91,7	97,7	157,7	35,93	15,9
78,6	94,3	95,4	156,7	36,80	18,8
72,8	40,1	52,4	151,9	54,36	16,0
72,4	111,9	100,5	151,4	56,26	18,1
77,9	125,3	103,7	156,6	0,00	16,9
68,5	126,7	95,7	151,5	8,80	21,6
72,2	83,8	105,3	155,9	21,58	131,9
86,5	107,8	104,8	157,5	27,79	126,7
74,5	79,5	102,3	156,6	39,28	139,7
74,2	71,9	80,2	141,3	0	109,5
77,7	80,35	82,5	142,3	12,40	107,8

Аналогично, в таблица 2 са изложени мащабираните данни, получени от информационната система за управление и контрол на по-големия мелничен агрегат – тип SAG 8.5x5.3.

При втория изследван обект системата за управление и контрол изчислява относителния енергоразход като директно отношение на консумираната активна мощност към количеството готов продукт, произведен за единица време. Характерно за данните в таблица 2 е, че скоростта на въртене на мелницата е представена чрез работните обороти на главния задвижващ двигател.

Таблица 2.

n, $\min^{-1}$ X1	$Q_B, m^3/h$ X2	$Q, t/h$ X3	M, t X4	i, % X5	$E, kWh/t$ Y
982	311	198	77,3	26,34	12,65
1001,9	260	153	80,8	27,38	24,75
996	297	182	75,2	37,52	17,14
998	389	309	72,4	38,19	9,51
989	236	133	74,3	53,49	15,43
991	262	145	72,8	54,20	17,91
990	268	131	74,1	65,49	28,55
990	338	208	70,6	66,47	11,02
990	296	215	74,6	83,34	19,22
989	363	264	81,7	0,00	13,51
990	390	284	77,8	21,44	12,78
988	319	214	79	22,51	18,24
991	377	316	73	40,47	8,26
990	400	321	71,3	41,43	8,14
989	302	218	74,2	61,80	17,98
1057,2	367	290	71,9	62,85	0,00
1084,9	336	249	70,3	77,94	15,60
1005,6	371	292	68,5	0,00	10,33
938	362	294	68,9	21,82	10,48
969	344	273	68,8	22,91	12,50
995	348	277	68,2	35,98	12,67
927	335	261	68,1	36,81	10,88
1007	385	300	69,7	51,51	12,88
1007,2	386	304	67,1	52,62	11,48
1005,2	320	215	64,9	72,27	15,59
921	391	318	69,3	0,00	9,20
892	378	301	67,6	21,18	9,79
953	354	281	68,2	22,23	11,24
958	339	273	64,3	30,08	9,78
888	349	286	69,7	30,50	11,49
964	359	276	69	38,69	13,37
947	339	276	68,7	39,68	10,24
985	312	227	66	58,37	16,54
882	322	285	66,6	0,00	7,63
914	325	242	67,9	15,75	12,29
881	343	300	67,1	16,46	7,98
880	339	247	69,8	38,48	11,87
1006	384	293	68,2	39,59	11,78
978	354	262	66,9	56,11	13,92
1005,9	406	305	72,5	0,70	10,51
928	377	276	72,2	24,91	12,19
953	383	198	69,6	26,57	10,67
901	369	153	68	43,21	9,69
946	361	182	69,7	44,24	11,40
1005,1	371	309	66,4	61,21	10,69
982	385	133	66,6	62,17	12,65
1001,9	394	145	77,3	74,27	24,75
996	311	131	80,8	74,98	17,14
998	260	208	75,2	92,84	9,51
989	297	215	72,4	26,34	15,43
991	389	264	74,3	27,38	17,91
990	236	284	72,8	37,52	28,55
990	262	214	74,1	38,19	11,02
990	268	316	70,6	53,49	19,22
989	338	321	74,6	54,20	13,51

Останалите технологични параметри са идентични по структура с тези от таблица 1. Необходимо е да се отчете, че мелничният агрегат SAG 8.5x5.3 се характеризира с по-големи габаритни размери и преработва руда с по-висока якост и абразивност.

Резултати от обработката на данните от системите за управление на мелница тип SAG

Данните от мелниците SAG са обработени статистически с програмите R Studio (Задорожный С., 2023) и STATGRAPHICS (Халафян, 2010), в резултат на което бяха генерирани редица регресионни модели. Оценката на статистическата значимост на регресионните коефициенти е извършена по критерия на Стюдент (t-критерий) при избрано доверително ниво $\alpha = 0,05$ и минимален брой на степените на свобода $\nu > 8$. В софтуерната среда тази процедура се базира на изчисляване на вероятността за значимост (P-value). При изпълнение на условието:

$$P - Value < \alpha \quad (1)$$

съответният регресионен коефициент се приема за статистически значим (където α е нивото на значимост).

Адекватността на получените регресионни уравнения като цяло е оценена чрез проверка на глобалната хипотеза по критерия на Фишер (F-критерий) (Hill & Lewicki, 2006).

Най-висока степен на адекватност сред моделите, генерирани в среда на R Studio за мелница SAG 6.7x4.4, демонстрира регресионното уравнение, чиито параметри са систематизирани в таблица 3.

Таблица 3. Параметри на модела от R STUDIO

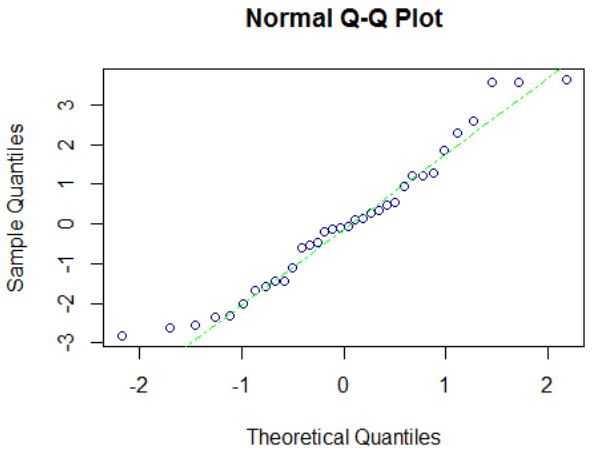
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
i	-13.775327	3.355908	4.105	0.000301
Q	-0.128460	0.029744	-4.319	0.000167
n	2.733458	0.794242	3.442	0.001777
M	0.192564	0.046812	4.114	0.000294
i/M	-0.009283	0.005663	-1.639	0.111937
Parameter	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
i	1	11794.4	11794.4	3151.1633
Q	1	64.7	64.7	17.2735
n	1	466.8	466.8	124.7112
M	1	57.1	57.	15.2653
i/M	1	10.1	10.1	2.6876
Residuals	29	108.5	3.7	
Статистика на модела				
R^2 =			99,13	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			98,98	%
Standard Error of Est. =			1,935	
F-statistic =			662,3	
p-value =			< 2,2e-16	

Анализът на параметрите показва, че коефициентът на множествена детерминация възлиза на 99,13%, а неговата коригирана стойност надхвърля 98,98%, което е индикатор за изключително висока представителност. Изчислените равнища на доверителна вероятност (P-value) за модела са значително под критичната граница от 0,05, което потвърждава неговата адекватност с доверителна вероятност над 97%.

Математическият модел може да се представи във вида:

$$E = -13,77.i - 0,128.Q + \\ +2,73.n + 0,192.M - 0,009.\frac{i}{M}, \quad kW \qquad (2)$$

Степента на съответствие между прогнозните стойности на модела и реалните експериментални данни е илюстрирана графично на фигура 2.



Фиг. 2. Корелация между експерименталните данни и прогнозния математически модел за мелница SAG 6,7x4,4

Най-адекватен модел получен посредством използването на програмата STATGRAPHICS се отнася за мелница SAG 8,5 x 5,3 и е показан на Таблица 4.

Таблица 4. Параметри на модела от STATGRAPHICS

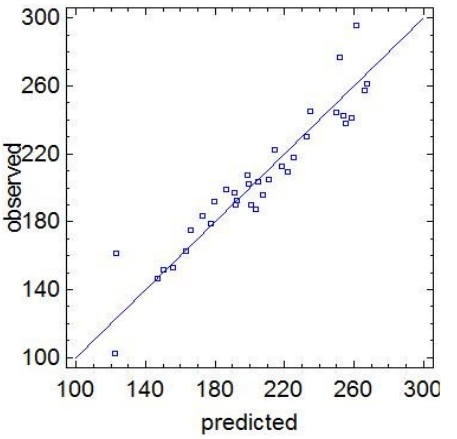
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
Q	-0,0559	0,00677	-0,27041	0
$P.i$	$0,497.10^{-4}$	$0,176.\ 10^{-5}$	2,8137	0,007
M	0,24687	0,0687	4,6749	0
n	0,008	0,0036	3,191	0,031
	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
Model	4	6636,7	1461,34	0
Residual	45	72,564	1,624	
Total	49			
Статистика на модела				
R^2 =			98,75	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			98,68	%
Standard Error of Est. =			1,273	
Mean absolute error =			0,951	
Durbin – Watson statistic=			1, 462	

Отчетените коефициенти на детерминация ($R^2 = 98{,}75\%$) и коригирана детерминация ($R^2_{\text{кор}} > 98\%$) доказват отличните статистически и прогнозни качества на този модел спрямо останалите изследвани варианти. Стойностите на P-value за коефициентите се намират под критичния праг от 0,05, което потвърждава високата надеждност и статистическа адекватност на модела с доверителна вероятност над 98%.

Математическият вид на изведения модел се дефинира чрез уравнението:

$$E = 0,059.Q + 0,497.10^{-4}.P.i + \\ +0,268.M + 0,801.10^{-2}.n, \quad kWh/t \qquad (3)$$

Визуалното съответствие между експериментално регистрираните стойности и изчислените по теоретичния модел данни е представено чрез корелационната диаграма на фигура 3.



Фиг. 3. Корелация между експерименталните данни и прогнозния математически модел за мелница SAG 8,5 x 5,3

Изводи

Въз основа на проведените теоретико-експериментални изследвания и компютърната обработка на промишлени масиви от данни могат да бъдат формулирани следните основни изводи с научна и научно-приложна значимост:

1. Многофакторна обусловеност на енергийната ефективност: Доказано е, че относителният енергоразход и при двата типа мелнични агрегати (SAG 6.7x4.4 и SAG 8.5x5.3) е комплексна функция от динамичните параметри на режима (скорост на въртене, количествено натоварване с руда, дебит на технологичната вода), геометричното състояние на работното пространство (износване на облицовките) и индиректно измерваната маса на вътрешномелничния пълнеж.

2. Енергетична и производителна динамика на скоростния режим: Установено е, че интензифицирането на скоростта на въртене на барабана рефлектира в пропорционално нарастване на добива на разчетна класа. Това се явява пряко следствие от физическата закономерност, при която полезната мощност е функция от ъгловата скорост и съпротивителния момент на мелещата среда при прехода от каскаден към водопаден режим на смилане. Генерираните модели позволяват определянето на критичния баланс, при който прирастът в производителността компенсира повишената консумация на електроенергия.

3. Влияние на вътрешномелничното запълване: Нарастването на масата на пълнежа в барабана води до закономерно повишаване на относителния енергоразход. Това се обяснява с увеличаването на общия инерционен

момент и необходимостта от по-голяма мощност за повдигане на материала до точката на откъсване. Практическата стойност на този извод се състои във възможността за оптимизиране на контрола над товарните клетки с цел предотвратяване на претоварването на мелницата, което драстично влошава специфичните енергийни показатели.

4. Мащабен геометричен ефект при износване на облицовките: Идентифициран е специфичен мащабен ефект: при по-малкия мелничен агрегат (SAG 6.7x4.4) износването на облицовките води до изразено намаляване на относителния енергоразход, докато при по-големия агрегат (SAG 8.5x5.3) това влияние е статистически незначително. Явлението се дължи на факта, че при по-малкия диаметър относителният прираст на полезния вътрешен обем вследствие на износването е по-съществен. Това оптимизира траекторията на движение на мелещите тела и подобрява ефективността на раздробяването на тон готов продукт.

5. Практическа приложимост на моделите в индустриална среда: Изведените високоадекватни регресионни уравнения притежават висок прогнозен потенциал (с коефициенти на детерминация над 98%). В практически план те могат да бъдат интегрирани директно в софтуерните системи за експертно управление на обогатителните фабрики. Моделите позволяват в реално време да се прогнозира относителният енергоразход при промяна на физико-механичните свойства на входящата руда (якост и абразивност), осигурявайки на операторския състав възможност за своевременна корекция на дебита на захранване и оптимизация на специфичните разходи за енергия.

Литература

Задорожный, С. С. (2023) *Статистическая обработка данных на языке R: Учебно-методическое пособие*. Москва: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.

Халафян, А. А. (2010). *STATISTICA 6. Статистический анализ данных*. Москва: Бином-Пресс.

Hill, T., & Lewicki, P. (2006). *Statistics: Methods and Applications. A Comprehensive Reference for Science*, Industry, and Data Mining. StatSoft

POWER STORAGE AND MANAGEMENT SYSTEMS FROM MICROBIAL FUEL CELLS

Ivaylo Valev, Kiril Dzhustrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: Ivailo_val@abv.bg

ABSTRACT. Microbial fuel cells (MFCs) offer an environmentally sustainable approach for generating electrical energy from wastewater. A primary limitation to their practical applicability is the low output voltage and power, which makes the direct supply of electronic or other devices unfeasible. A solution to this challenge is provided by power management systems (PMS). These electronic systems optimise the output power of MFCs, store the harvested energy, and condition it for practical applications through the use of power converters and efficiency-oriented control algorithms. This work presents a review of contemporary approaches, designs, results, and challenges in the field.

Key words: microbial fuel cells (MFC), power management systems (PMS), Maximum Power Point (MPP), DC/DC converter, supercapacitor (SC), energy efficiency.

СИСТЕМИ ЗА СЪХРАНЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ ОТ МИКРОБНИ ГОРИВНИ КЛЕТКИ

Ивайло Вълев, Кирил Джустров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Микробните горивни клетки (МГК) предлагат екологично чист начин за производство на електрическа енергия от отпадъчни води. Основен проблем за практическата им приложимост е ниското напрежение и мощност, което прави невъзможно директното захранване на електронни или други устройства. Решение на този проблем представляват системите за управление на мощността. Тези електронни системи оптимизират изходната мощност на МГК, акумулират енергията и я подготвят за реални приложения чрез преобразуватели и алгоритми за максимална ефективност. Тази работа представя обзор на съвременни подходи, архитектури, резултати и предизвикателства в областта.

Ключови думи: микробни горивни клетки (МГК), системи за управление на мощността, точка на максимална мощност, DC/DC преобразувател, суперкондензатор, енергийна ефективност.

Въведение

Микробните горивни клетки (Microbial Fuel Cells – MFC) представляват биоелектрохимични системи (BES), които преобразуват химичната енергия на различни субстрати в електрическа енергия, чрез метаболитната активност на микроорганизмите. Тази технология привлича значителен научен интерес позволявайки едновременно пречистване на отпадъчни води и производство на електричество (Erbay et al., 2013).

Огромен набор от микроорганизми могат да произвеждат електрически ток и да пренасят електрони към анодите на различни видове BES (Logan et al., 2019).

MFC могат да произвеждат електрическа енергия от много различни субстрати, включително от сложна органична материя в отпадъчните води (Capodaglio et al., 2013). Биоразградимият субстрат се окислява на анода и електроните се прехвърлят през външна верига към катода, където реакцията на редукция на кислорода (ORR) завършва веригата, произвеждайки електрическа енергия (Logan et al., 2019; Kumar et al., 2017).

MFC могат да бъдат направени с относително евтини материали и прости конфигурации (Wang et al., 2019; Feng and Cheng, 2016; Choi et al., 2018), но липсата на стандартизирани условия е довела до резултати, които не могат да бъдат директно сравнени поради разлики в конфигурацията на реакторите (Logan et al., 2015; Yang et al., 2017).

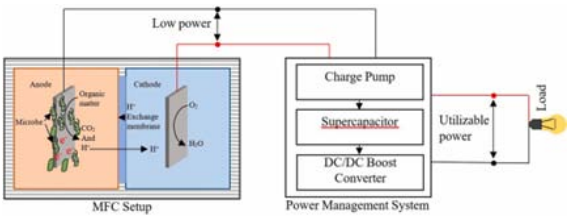
MFC са изследвани като обещаващ възобновяем източник на енергия, въпреки че производството и използването на енергия от тях не е проста задача поради малката изходна мощност и ниското изходно напрежение, което ограничава директното им приложение в практиката (Erbay et al., 2013).

BES имат потенциал за устойчиво производство на енергия, особено за автономни системи и IoT устройства, но техните електрически характеристики изискват усъвършенствани системи за управление на мощността (Power management system - PMS) с цел приложението им за практическа употреба.

Основният принцип на работа на PMS е да съхранява генерираната електрическата енергия в капацитивен товар (суперкондензатор), като модифицира параметрите й, за да постигне необходимото ниво, преди да я подаде към товара (Alipanahi et al., 2019). Повечето от изходните напрежения на MFC са в диапазона от 300–900 mV (Tang et al., 2015; Donovan et al., 2011), докато повечето потребителски електронни устройства изискват над 3,3 V за своята работа.

Основни компоненти на системите за управление на мощността (PMS) за BES

Този преглед се фокусира главно върху системите за управление на мощността (PMS), които могат да се използват заедно с MFC за подобряване на енергийната им мощност с цел захранване на различни видове електронни уреди. PMS са съставени от няколко електронни компоненти, които работят заедно, за да преобразуват ниските електрически входни параметри в използваема изходна мощност. Основната конфигурация на PMS включва главно зарядна помпа (капацитивен преобразовател на напрежение), суперкондензатор и усилвател. Интегрирането на тези основни системи за управление на захранването позволяват подобряване на изходните характеристики на MFC за стабилно и сигурно захранване на малки уреди. (Dutta et al., 2022).



Фиг. 1. Принципна конфигурация на PMS интегрирана в MFC включваща зарядна помпа, суперкондензатор и усилвател. (Dutta et al., 2022)

Таблица 1. *Основни компоненти и функциите им в PMS*

Компонент	Функция
MPPT (Maximum Power Point Tracking)	Оптимизира работа на МГК по напрежение и ток за максимално производство на енергия
Supercapacitor /суперкондензатор/	Енергийно акумулиране, съхранява генерираната енергия
DC-DC Boost converter (импулсен преобравувател)	Повишава напрежението до подходящо работно ниво за товара
Контролни алгоритми	Управляват и поддържат енергийния поток

Системата за акумулиране на енергия и контролирането на работната точка на MFC, чрез проследяване на точката на максимална мощност (MPPT) е от съществено значение за максимизирането на събраната енергия, което изисква сложна система за управление, която консумира значително количество енергия. Въпреки че тази управляваща мощност е критичен фактор поради същественото ѝ влияние върху общата ефективност, тя до голяма степен е пренебрегвана (Dutta et al., 2022).

Maximum Power Point Tracking (MPPT) за Микробни горивни клетки (MFC): теория, приложения и съвременни подходи

За реални приложения, като автономни сензорни мрежи, портативни устройства или подпомагане на инфраструктурни системи е необходимо максимално ефективно извличане и управление на енергията. Тук на помощ идва MPPT – технология за динамично управление, която оптимизира електрическото натоварване, така че MFC да работи при *точката на максимална мощност* (MPPT) (Parka and Renb, 2012).

Поради ограниченията, като ниската изходна мощност и ниското изходно напрежение от MFC се разработват различни енергийни управляващи системи (PMS), които включват алгоритми за MPPT. Целта на MPPT е да поддържа работната точка на системата в положение, при което се извлича максималната възможна електрическа мощност от горивната клетка (Alaraj et al., 2017).

Характеристики на мощността при MFC

Изходната мощност на MFC зависи от множество фактори, включително концентрацията на субстрата, активността на микроорганизмите, вътрешното съпротивление, условията на околната среда и др..

Въз основа на анализа на съпротивленията на електродите, катодът често е идентифициран като основен фактор за вътрешното съпротивление на клетката (Dominguez-Benetton et al., 2012; Rossi et al., 2019).

За всяко конкретно състояние съществува една оптимална работна точка, при която произведената мощност е максимална – т.нар. Maximum Power Point (MPP).

Тази точка се определя от връзката между напрежението и тока на клетката. Промени в биохимичните процеси или външното натоварване могат да доведат до значителни колебания в характеристиките на системата. Поради тази динамика поддържането на оптималната работна точка е сложно и изисква адаптивни алгоритми за управление (Parka and Renb, 2012).

Принцип на Maximum Power Point Tracking

MPPT представлява алгоритъм за управление, при който чрез промяна на еквивалентното натоварване се регулира напрежението и токът на горивната клетка, така че системата да работи в точката на максимална мощност. Това обикновено се реализира чрез DC-DC преобразуватели, които адаптират импеданса на товара към вътрешния импеданс на MFC (Alaraj and Park, 2019).

Повишаване и стабилизация на напрежението чрез DC-DC преобразуватели

Поради ниското входно напрежение, PMS използват DC-DC преобразуватели за повишаване напрежението до използваеми стойности (Zhang et al., 2012).

DC-DC преобразувателите са електронни устройства, които преобразуват едно ниво на постоянно напрежение в друго. Основните типове включват:

- Boost (повишаващи) – увеличават входното напрежение;
- Buck (понижаващи) – намаляват напрежението;
- Buck-boost – комбинирана топология;
- Flyback - той действа като Buck-boost конвертор със свързан индуктор, който съхранява енергия, осигурявайки множество, електрически изолирани изходни напрежения.

При MFC най-често се използват boost преобразуватели поради ниското входно напрежение.

Zhang et al., (2015) в свои изследвания показват, че високоефективни boost преобразуватели могат да повишат напрежението от порядъка на 0.4–0.7 V до стабилни нива, подходящи за електронни устройства, с ефективност до 85%.

DC-DC преобразувателите изпълняват ключова роля при извличането на максимална мощност от MFC. Те:

- действат като адаптивен товар (еквивалентно съпротивление);
- позволяват оптимизация на работната точка;
- увеличават ефективността на енергийното извличане;

Параметри като индуктивност, коефициент на запълване (duty cycle) и честота на превключване имат съществено влияние върху добива на енергия и ефективността (Wang et al., 2017).

Alaraj et al., (2014) докладват, че чрез прилагане на съвременни решения използващи синхронни flyback преобразуватели, постигат намаляване на загубите и повишават ефективността на преобразуване с над 30% спрямо класическите схеми.

Основната идея е да се следи произведената мощност и чрез алгоритмична оптимизация да се открие

максималната стойност на тази функция. След като бъде намерена, контролерът постоянно коригира работната точка, за да компенсира измененията в системата (Alaraj and Park, J., 2019).

DC-DC преобразувателите и PMS намират приложение в:

- безжични сензорни мрежи;
- мониторинг на околната среда;
- пречистване на отпадъчни води с енергийно възстановяване;
- автономни IoT устройства.

Тези системи позволяват използването на MFC като устойчив енергиен източник в отдалечени или труднодостъпни райони.

Основните предизвикателства включват:

- много ниско входно напрежение (под 0.5 V);
- ниска ефективност при малки мощности;
- сложност на управляващите схеми.

Бъдещите изследвания са насочени към:

- ултра-нискоенергийни DC-DC преобразуватели;
- интелигентни PMS с адаптивно управление;
- интеграция с IoT системи.

Суперкондензаторите в системите за управление на мощността: приложение и значение за MFC

Основни ограничения при приложението на MFC са ниска плътност на мощността, високо вътрешно съпротивление и нестабилният изходен ток.

Тези ограничения налагат използването на допълнителни устройства за съхранение на енергията, като батерии или суперкондензатори (Poli et al, 2020).

Суперкондензаторите представляват ключов елемент в съвременните системи за съхранение и управление на енергията, благодарение на високата си плътност на мощността, дълъг експлоатационен живот и бързи процеси на зареждане/разреждане.

Суперкондензаторите играят важна роля в системите за управление на мощността чрез: акумулиране на енергия от маломощни източници, осигуряване на импулсна мощност и стабилизиране на напрежението.

В PMS, суперкондензаторите често се използват като буфер между източника на енергия и консуматора. Те позволяват съхранената енергия да бъде освобождавана при необходимост, като по този начин повишават ефективността на системата. Изследвания показват, че предварително заредени суперкондензатори могат значително да увеличат входната мощност към PMS и да подобрят работата на системата (Li et al, 2022).

Електродите в MFC се използват като суперкондензаторни електроди, постигащи висока максимална мощност (Santoro et al., 2016).

Интеграция на суперкондензаторите в MFC

Външна интеграция – при този подход суперкондензаторът се свързва външно към MFC и служи като енергиен буфер. Това позволява акумулиране на произведената енергия и отдаване на по-висока мощност при нужда.

Изследвания показват, че външната интеграция е гъвкава и мащабируема технология за подобряване на мощностните характеристики на MFC (Poli et al., 2017).

Вътрешна интеграция (суперкондензативни MFC) – тук електродите на MFC изпълняват едновременно функция на суперкондензатор. Тези системи се наричат суперкондензативни микробни горивни клетки (SC-MFC).

Основните предимства на SC-MFC са: комбинирано съхранение и генериране на енергия, намаляване на вътрешното съпротивление и повишената мощност.

SC-MFC могат да генерират импулсна мощност с порядък по-висок от тази при стандартна работа (Soavi and Santoro, 2020).

Интеграцията на суперкондензатори влияние върху енергийните характеристики на MFC и водят до: увеличаване на пикова мощност; подобрена ефективност на енергийното извличане, а също така и до по-добра съвместимост с електронни устройства.

Например, увеличаването на катодната площ в SC-MFC води до значително повишаване на мощността и намаляване на вътрешното съпротивление (Jeremiah et al., 2016).

Според Santoro et al., (2016), добавянето на суперкондензативни електроди позволява бързо самозареждане в рамките на секунди.

Хибридните системи, като SC-MFC намират приложение в автономни сензорни системи, пречиствателни станции за отпадъчни води, нискомощни електронни устройства и IoT системи.

Особено перспективни са приложенията в отдалечени райони, където се изисква устойчиво и самоподдържащо се енергийно решение.

Предизвикателства и бъдещи перспективи

Въпреки значителния напредък, съществуват редица предизвикателства като:

- ограничена енергийна плътност;
- деградация на електродите;
- необходимост от оптимизация на материалите.

Бъдещите изследвания са насочени към:

- разработване на нови електродни материали (графитен, проводими полимери и др.);
- оптимизация на архитектурата на системите;
- мащабиране на технологиите.

Видове контролни алгоритми, функции и приложението им в MFC

Ефективността на работа на MFC изисква прецизен контрол върху редица параметри като pH, температура, концентрация на субстрата, електрохимични характеристики и много други фактори.

Изборът на подходящи видове контролни алгоритми и техните функции, както и приложението им в системи с MFC е от изключителна важност за работата им.

Един от основните проблеми при MFC е тяхната нестабилност и зависимост от множество външни фактори. Поради това внедряването на ефективни контролни алгоритми е от съществено значение за оптимизиране на производителността и устойчивостта на системата (Lovley, D., 2006).

Функции на контролните алгоритми в MFC

Контролните алгоритми изпълняват няколко ключови функции:

- *Стабилизация на процеса* – поддържане на постоянни условия за оптимална микробна активност;

- *Оптимизация на ефективността* – максимизиране на електрическата мощност и ефективността на преобразуване;
- *Управление на смущения* – компенсиране на външни влияния, като температурни промени или вариации в субстрата;
- *Автоматизация* – намаляване на необходимостта от човешка намеса.

Основни видове контролни алгоритми

Пропорционално-интегрално-диференциален (PID) контрол - е един от най-широко използваните методи в индустриалната автоматизация. Той комбинира три компонента:

- Пропорционален (P)
- Интегрален (I)
- Диференциален (D)

Функцията му може да се изрази чрез:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

Където $e(t)$ е грешката между желаната и действителната стойност (Åström and Murray, 2010).

В MFC PID контролерите се използват за регулиране на pH, температура и дебит на субстрата. Те осигуряват бърза реакция и стабилност, но могат да имат ограничения при силно нелинейни системи каквито са MFC.

Адаптивен контрол - адаптивните алгоритми се настройват автоматично спрямо променящите се условия в системата. Те са особено полезни при биологични процеси, където параметрите се изменят динамично. Основните им характеристики са: самонастройване, устойчивост към смущения, а също така са подходящи за нелинейни системи. Приложението им в МГК е с цел управление на микробната активност и електрохимичната ефективност при променливи натоварвания (Ioannou and Baldi, 2010).

Размити (Fuzzy) контролни алгоритми - тези алгоритми позволяват управление при несигурност и непълна информация. Вместо точни математически модели се използват правила от типа „ако–тогава“. Предимствата на тези контролни алгоритми е, че те са подходящи за сложни и нелинейни системи и не изискват точен математически модел. Приложението на този вид алгоритми при МГК се използва за регулиране на биологичните процеси, където традиционните модели са трудни за формулиране (Lotfi, 1996).

Моделно-предиктивен контрол (MPC) - използва математически модел на системата, за да предскаже бъдещото ѝ поведение и да оптимизира управляващите сигнали. Основни предимства са: оптимизация в реално време, управление на многопараметрични системи, ограничения върху входовете и изходите.

Приложението на MPC в MFC е оптимизиране на производството на електрическа енергия чрез контрол на натоварването и концентрацията на субстрата (Camacho and Bordons, 2007).

Невронни мрежи и интелигентни алгоритми

Изкуствените невронни мрежи (ANN) се използват за моделиране и управление на сложни нелинейни процеси. Предимствата на тези мрежи е възможността за обучение от данни и висока точност при сложни системи. Приложението на ANN в MFC е, че те могат да предсказват производителността и да оптимизират параметрите на работа (Haykin, 2009).

Предизвикателства при приложението на контролни алгоритми

Въпреки напредъка, съществуват редица предизвикателства, като нелинейност на биологичните процеси, липса на точни модели, забавяне във времето (time delay), шум в измерванията и др., които изискват комбиниране на различни контролни стратегии.

Бъдещи тенденции са в развитието на различни подходи, като хибридни контролни системи, интелигентни алгоритми с машинно обучение и IoT интеграция за дистанционно управление, които ще подобрят ефективността и мащабируемостта на MFC.

MPPT алгоритми за MFC

В литературата са предложени различни алгоритми за MPPT при MFC системи. Някои от най-често използваните са:

- *Hysteresis-based MPPT* **-** този метод използва хистерезисен контролер, който регулира съпротивлението на товара чрез цифрово управлявани потенциометри. Системата динамично следи максималната мощност и поддържа работната точка близо до нея в реално време (Park and Ren 2012).
- *Incremental Conductance метод* **-** този подход използва производната на мощността спрямо напрежението, за да определи посоката на търсене на MPP. При съвременните системи се използват променливи стъпки, които подобряват точността и ефективността на алгоритъма (Fernandez and Younas, 2024).
- *Extremum Seeking Control* **-** този алгоритъм използва оптимизационни техники за откриване на максимума на функцията на мощността и позволява непрекъснато адаптиране към промените в биохимичните условия на MFC (Alaraj et al, 2017).

Енергийно управление и ефективност

При MFC системите особено важно е консумираната мощност от самата MPPT система да бъде минимална, тъй като произведената електрическа енергия е много малка (обикновено в диапазона на mW).

Разработени са интегрирани схеми за управление, които могат динамично да следят MPP и да оптимизират извличането на енергия независимо от колебанията в изходното напрежение на клетката. Такива системи могат значително да подобрят ефективността на енергийното извличане и да позволят захранването на нискомощни електронни устройства, например безжични сензори (Erbay et al., 2014).

Wang et al., (2012) представят експериментални изследвания на активни системи за извличане на енергия, които могат да увеличат значително добитата енергия в сравнение с пасивните методи, като същевременно подобряват кулоновата ефективност на процеса

Предизвикателства и бъдещи изследвания

Основните предизвикателства при MPPT за MFC включват:

- нисък изходен ток и напрежение на MFC, което ограничава самостоятелната работа и ускорява загубите в управлението;

- нестабилност на биологичната система, водеща до чести промени във вътрешното съпротивление и точките MPP;
- сложност при управлението и потребление на мощност, което само по себе си трябва да бъде значително по-малко от енергията, която MFC може да достави.

Бъдещите изследвания включват разработка на алгоритми с ниска консумация, по-добри модели на динамиката на MFC за MPPT и интеграция с интелигентни енергийни системи за автономни IoT приложения.

В Таблица 2 са представени примери на постигнати резултати от световната литература.

Таблица 2. Приложни системи и ефективност на PMS

Изследване	*Метод*	*Резултат*
Fernandez Feito et al. (2024)	MPPT управление на до 5 МГК	Над 87% ефективност при преобразуване на енергията
Nguyen et al. (2019)	Switched-capacitor PMS	До 85% ефективност и предотвратяване на обратни напрежения
Erbay et al. (2014)	Монолитен PMS с MPPT	Успешно захранване на безжичен сензор

Основни видове архитектура

Архитектура с директно буфериране чрез суперкондензатор

Изследвани са различни варианти на PMS за MFC за периодично захранване на електронни товари (устройства). На Фиг. 2(a) е представена базова архитектура на PMS, представляваща директно свързване на суперкондензатор, който играе ролята на буфер за енергия, за да се увеличи и контролира електрическият потенциал, генериран от MFC (Shantaram, 2005; Donovan, 2008), след това натрупаната енергия се подава към DC/DC повишаващ преобразувател (boost converter), който осигурява стабилизирано напрежение към товара. В този случай постижимото напрежение на суперкондензатора за съжаление е ограничено от изходното напрежение на MFC, което обикновено е много ниско (обикновено по-ниско от 0,8 V), което означава, че само ограничена енергия може да се съхранява и използва на цикъл на зареждане/разреждане.

Основните предимства на този подход включват:

- простота на реализацията;
- ниска цена;
- висока надеждност.

Въпреки това, директното свързване към суперкондензатора може да доведе до неефективно извличане на енергия поради липса на оптимално съгласуване на импеданса между MFC и товара (Degrenne, et al., 2012). Освен това, при ниски входни напрежения стартирането на DC/DC преобразувателя може да бъде затруднено (Doms, et al., 2009).

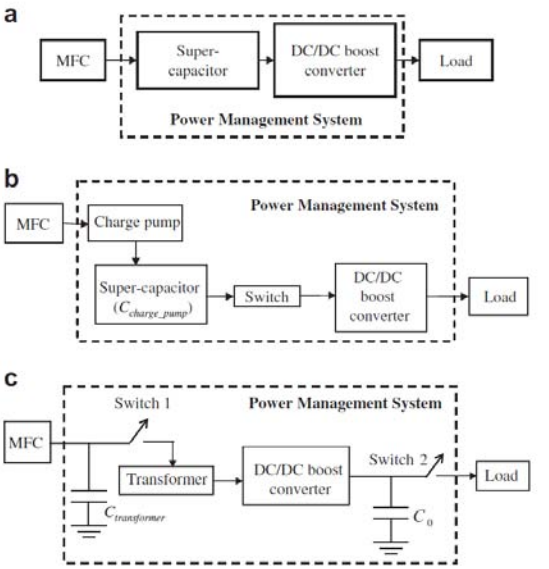
Архитектура с charge pump и управлявано зареждане

За да се преодолее този недостатък на ограниченото съхранение на енергия, е предложена усъвършенствана архитектура, която включва зарядна помпа (*charge pump)* за повишаване на входното напрежение за суперкондензатора (Meehan et al., 2012), както е показано на Фиг. 2(b) - без директна връзка между MFC и суперкондензатора. След натрупване на достатъчно енергия, чрез ключ (*switch*) тя се подава към DC/DC преобразувателя.

Тази конфигурация предлага няколко съществени предимства:

- възможност за стартиране при много ниски входни напрежения;
- по-добро извличане на енергия от MFC;
- намаляване на загубите при преходни режими.

Недостатък е по-високата сложност и увеличените загуби в charge pump веригата (Ramadass and Chandrakasan, 2011). Освен това, управлението на ключа изисква допълнителна логика или енергийно автономен контролер.



Фиг. 2. Схеми на различни PMS за MFC: (a) тип кондензатор-преобразувател, (b) тип зарядно-помпен кондензатор-преобразувател и (c) тип кондензатор-трансформатор-преобразувател. (Zhang et al., 2012)

Архитектура с трансформатор и двустепенно превключване

Схемата на Фиг.2(c), въвежда използването на трансформатор за първоначално повишаване на напрежението, комбиниран с два ключа (Switch 1 и Switch 2) и буферен кондензатор C_0.

Такъв тип PMS работи с нисковолтови изходи от MFC; трябва обаче да се посочи, че работи добре само ако изходното напрежение на MFC е достатъчно високо, за да задейства зарядна помпа, а цикълът на зареждане/разреждане на системата може да е дълъг, тъй като скоростта на зареждане е ограничена от зарядната помпа. За да се намали допълнително входното напрежение на PMS, без да се жертва скоростта на зареждане, е въведен трансформатор в PMS, дизайнът на която включва: кондензатор – трансформатор - преобразувател (Yang et al., 2012), както е показано на Фиг. 2(c), с един суперкондензатор за задвижване на DC/DC преобразувател, а другият (C0) за задвижване на товара на импулси с високо напрежение и мощност. Тази PMS работи

добре, въпреки че изходното напрежение на MFC е едва 0,18 V (Zhang et al., 2012)

Работният принцип включва:

- натрупване на енергия в магнитното поле на трансформатора;
- прехвърляне на енергията към DC/DC преобразувателя;
- допълнително буфериране в изходния кондензатор.

Предимствата на този подход са:

- по-висока ефективност при ниски входни напрежения;
- по-добро управление на енергийния поток;
- възможност за импедансно съгласуване.

Недостатъците включват по-сложен дизайн, необходимост от прецизно управление на ключовете и потенциални загуби в магнитните компоненти (Szarka, et al., 2012; Wang, et al., 2015).

Сравнителен анализ на разгледаните схеми

Изборът на архитектура зависи от конкретното приложение, наличната мощност на MFC и изискванията към товара.

Таблица 3. Сравнение на основни критерий на разгледаните схеми

Критерий	Фиг. 2a	Фиг. 2b	Фиг. 2c
Сложност	ниска	средна	висока
Ефективност	средна	висока	много висока
Стартиране при ниско напрежение	ограничено	добро	отлично
Цена	ниска	средна	висока

Системите за управление на енергията са критичен компонент при използването на MFC в реални приложения. Докато базовите решения (Фиг. 2a) са подходящи за прости системи, по-сложните архитектури (Фиг. 2b и 2c) предлагат значително по-добра ефективност и надеждност при ниски входни напрежения. Бъдещите изследвания следва да се фокусират върху интеграцията на интелигентни алгоритми за управление и минимизиране на загубите.

Заключение

PMS представляват ключов елемент за практическата употреба на MFC, като източник на електрическа енергия. Комбинацията от MPPT, енергийно акумулиране и преобразуватели повишава мощността и стабилността на системата, като дава възможност за реални приложения в автономни устройства. Продължаващите изследвания целят още по-ефективни алгоритми и интеграции с IoT платформи.

Maximum Power Point Tracking играе ключова роля за подобряване на енергийната ефективност на MFC. Поради ниското напрежение и силно променливите работни условия на MFC системите, MPPT алгоритмите позволяват оптимално извличане на електрическа енергия, чрез адаптиране на импеданса на товара и динамично управление на работната точка.

Развитието на енергийно ефективни MPPT алгоритми и интегрирани системи за управление е от съществено значение за бъдещото приложение на MFC в автономни енергийни системи и интелигентни сензорни мрежи.

Контролните алгоритми играят ключова роля за ефективната работа на MFC. Различните методи — от класически PID до интелигентни алгоритми — предлагат разнообразни решения в зависимост от сложността на системата. Комбинирането на различни подходи представляват най-перспективната посока за бъдещо развитие.

Суперкондензаторите предлагат ефективно решение за подобряване на мощностните характеристики на MFC. Интеграцията им в системите за управление на мощността позволява преодоляване на основните ограничения на MFC и разширява възможностите за практическото приложение. Хибридните системи SC-MFC са обещаваща посока за устойчиво енергийно бъдеще.

DC-DC преобразувателите са ключов елемент в реализацията на ефективни PMS за MFC. Те позволяват преодоляване на ограниченията, свързани с ниското напрежение и мощност, като по този начин разширяват приложимостта на MFC технологиите в реални инженерни системи.

Благодарности

Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0008-C01 Смарт PHD Lab 5.0 „Проектни докторантури за интелигентен растеж в областта на телекомуникациите, изкуствения интелект, автоматизацията и мехатрониката“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз

Литература

Alaraj, M., Park, J., (2019). Net power positive maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cell, , Journal of Power Sources Volume 418, Pages 225-232, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.042

Alaraj, M., Radenkovic, M., Park, J., (2017). Intelligent energy harvesting scheme for microbial fuel cells: Maximum power point tracking and voltage overshoot avoidance, Journal of Power Sources 342, 726-732, http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.104

Alaraj, M., Ren, Z. J., & Park, J. D., (2014). Microbial fuel cell energy harvesting using synchronous flyback converter, *Journal of Power Sources*, *247*, 636-642, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.017

Alipanahi, R., Rahimnejad, M., Najafpour, G., (2019). Improvement of sediment microbial fuel cell performances by design and application of power management systems Int. J. Hydrogen Energy, 44, pp. 16965-16975, 10.1016/j.ijhydene.2019.04.162

Åström, K. J., & Murray, R. M., (2010). *Feedback Systems*, Princeton University Press.

Camacho, E. F., & Bordons, C., (2007). *Model Predictive Control*. Springer

Capodaglio, A., Molognoni, D., Dallago, E., Liberale, A., Cella, R., Longoni, P., Pantaleoni, L., (2013). Microbial fuel cells for direct electrical energy recovery from urban wastewaters, Sci. World J., https://doi.org/10.1155/2013/634738.

Choi, S., Kim, B., Chang, I.S., (2018). Tracking of Shewanella one idensis MR-1 biofilm formation of a microbial electrochemical system via differential pulse voltammetry, Bioresour. Technol. 254, 357-361, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.047. DOI: 10.1201/b10384-41

Degrenne, N., Buret, F., Allard, B., Bevilacqua, P., (2012). Electrical energy generation from microbial fuel cells, *Journal of Power Sources*, Volume 205, Pages 188-193. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.082Get rights and content

Dominguez-Benetton, X., Sevda, S., Vanbroekhoven, K., Pant, D., (2012). The accurate use of impedance analysis for the study of microbial electrochemical systems, Chem. Soc. Rev. 41, 7228-7246, https://doi.org/10.1039/c2cs35026b.

Doms, I., Buret, F., Morel, F., Adami, S-E., Labrousse, D., Allard, B., Zaoui, A., (2009). Self-starting boost converters for low-voltage energy harvesting.” *IEEE Transactions on Power Electronics*, DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063865

Donovan, C., Dewan, A., Heo, D., Beyenal, H., (2008). Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell Environ. Sci. Technol. 42, 8591-8596.

Donovan, C., Dewan, A., Peng, H., Heo, D., Beyenal, H., (2011). Power management system for a 2.5 W remote sensor powered by a sediment microbial fuel cell, J. Power Sources, 196, pp., 1171-1177, 10.1016/j.jpowsour.2010.08.099

Dutta, A., Jacob, C., Das, P., Corton, E., Stom, D., Barbora, L., Goswami, P., (2022). A review on power management systems: An electronic tool to enable microbial fuel cells for powering range of electronic appliances, Journal of Power Sources Volume 517, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230688

Erbay, C., Carreon-Bautista, S., Sanchez-Sinencio, E., Han, A., (2014). High Performance Monolithic Power Management System with Dynamic Maximum Power Point Tracking for Microbial Fuel Cells, *Environmental Science & Technology* Vol 48/Issue 23, DOI: https://doi.org/10.1021/es501426j

Feito, F., Younas T., Dinsdale R., (2024). Evaluation of a comprehensive power management system with maximum power point tracking algorithm for multiple microbial fuel cell energy harvesting, Bioelectrochemistry, DOI: 10.1016/j.bioelechem.2023.108597

Feng, H., Liang, Y., Guo, K., Chen, W., Shen, D., Huang, L., Zhou, Y., Wang, M., Long, Y., (2016). TiO_2 nanotube arrays modified titanium: a stable, scalable, and costeffective bioanode for microbial fuel cells, Environ. Sci. Technol. Lett. 3, 420-424, https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00410.

Fernandez, R., Younas, T., (2024). Evaluation of a comprehensive power management system with maximum power point tracking algorithm for multiple microbial fuel cell energy harvesting, Bioelectrochemistry Volume 155, 108597, https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2023.108597

Haykin, S., (2009), Neural Networks and Learning Machines. University, Hamilton, http://dai.fmph.uniba.sk/courses/NN/haykin.neural-networks.3ed.2009.pdf, https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.03.009

Ioannou, P., Baldi, S., (2010). Robust Adaptive Control, DOI: 10.1201/b10384-41

Jeremiah, H., Santoro, C., Francesca Soavi, Serov, A., Ieropoulos, I., Arbizzani, C., Atanassov, P., (2016). Supercapacitive microbial fuel cell: Characterization and analysis for improved charge storage/delivery performance, Bioresource Technology Volume 218, Pages 552-560, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.105

Kumar, A., Hsu, L., Kavanagh, P., Barriere, F., Lens, P., Lapinsonniere, L., Lienhard, J., Schroder, U., Jiang, X., Leech, D., (2017). The ins and outs of microorganism-electrode electron transfer reactions, Nat. Rev. Chem. 1

Li, S., Zhao, Z., Li, B., Wei T., Jiang, H., Yan, Z., (2022). Supercapacitors accumulating energy harvesting from stacked sediment microbial fuel cells and boosting input power for power management systems, International Journal of Hydrogen Energy Volume 47, Issue 19, Pages 10689-10700, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.081

Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., Rabaey, K., (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology, Environ. Sci. Technol. 40, 5181-5192, https://doi.org/10.1021/es0605016.

Logan, B., Rossi, R., Ragab, A., Saikaly, P., (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems, Nat. Rev. Microbiol. 17, 307-319, https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x.

Logan, B., Wallack, M., Kim, K., He, W., Feng, Y., Saikaly, P., (2015). Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities, Environ. Sci. Technol. Lett. 2, 206-214, https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00180.

Lotfi A. Zadeh, (1996). Ieee transactions on fuzzy systems, Vol. 4, No. 2, 103 Fuzzy Logic = Computing with Words, Life Fellow, IEEE

Lovley, D., (2006). Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches, 17(3):327-32. Doi: 10.1016/j.copbio.2006.04.006.

Meehan, A., Gao, H.W., Lewandowski, Z., (2011). Energy Harvesting with Microbial Fuel Cell and Power Management System, IEEE Trans. Power Electron. 6 (1), 176-181.

Nguyen, C., Tartakovsky, B., Woodward, L., (2019). Harvesting energy from Multiple Microbial Fuel Cells with a high-conversion efficiency PMS for MFCs. ACS Omega, 4, 18978–18986, DOI: 10.1021/acsomega.9b01854

Park, J., Renb, Z., (2012). Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells, Journal of Power Sources 205, 151–156, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.053

Poli, F., Santoro, C., Soavi, F., (2023). Improving microbial fuel cells power output using internal and external optimized, tailored and totally green supercapacitor, Journal of Power Sources Volume 564, 232780, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232780

Poli, F., Seri, J., Santoro, C., & Soavi, F., (2020). Boosting Microbial Fuel Cell Performance by Combining with an External Supercapacitor: An Electrochemical Study, *Chem Electro Chem*, *7*, 893-903, https://doi.org/10.1002/celc.202000083

Ramadass, Y., Chandrakasan, A., (2011). Voltage scalable switched capacitor energy harvesting system.” *IEEE Journal of Solid-State Circuits,* DOI: 10.1109/PESC.2007.4342378

Rossi, R., Cario, B.P., Santoro, C., Yang, W., Saikaly, P.E., Logan, B.E., (2019). Evaluation of electrode and solution area-based resistances enables quantitative comparisons of factors impacting microbial fuel cell performance, Environ. Sci. Technol. 53, 3977-3986, https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06004.

Santoro, C., Soavi, F., Serov, A., Arbizzani, C., Atanassov P., (2016). Self-powered supercapacitive microbial fuel cell: The ultimate way of boosting and harvesting power, Biosensors and Bioelectronics Volume 78, Pages 229-235, https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.11.026

Shantaram, A., Beyenal, H., Raajan, R., Veluchamy, A., Lewandowski, Z., (2005). Wireless Sensors Powered by Microbial Fuel Cells, Environ. Sci. Technol. 395037-5042.

Soavi, F., and Santoro, C., (2020). Supercapacitive operational mode in microbial fuel cell, Current Opinion in Electrochemistry Volume 22, Pages 1-8.

Szarka, G., Stark B., Burrow S., (2012). Transformer-based energy harvesting circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*.

Tang, N., Hong W., Ewing T., Beyenal H., Kim, J., Heo D., (2015). A self-sustainable power management system for reliable power scaling up of sediment microbial fuel cells IEEE Trans. Power Electron., 30(9) pp. 4626-4632, 10.1109/TPEL.2015.2397931

Wang, H., Park, J., Ren, Z., (2012). Active Energy Harvesting from Microbial Fuel Cells at the Maximum Power Point without Using Resistors, *Environmental Science & Technology* Vol 46/Issue 9

Wang, H., Ren, Z., & Park, J. D., (2012). Power electronic converters for microbial fuel cell energy extraction: Effects of inductance, duty ratio, and switching frequency, *Journal of Power Sources*, *220*, 89-94, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.092

Wang, X.I.N., Cheng, S., (2009). Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells, Environ. Res. 43, 6870-6874.

Yang, F., Zhang D., Shimotori, T., Wang, K.-C., Huang, Y., (2012). Study of transformer-based power management system and its performance optimization for microbial fuel cells, Power Sources 205, 86-92.

Yang, W., Kim, K.Y., Saikaly, P.E., Logan, B.E., (2017). The impact of new cathode materials relative to baseline performance of microbial fuel cells all with the same architecture and solution chemistry, Energy Environ. Sci. 10, 1025-1033, https://doi.org/10.1039/c7ee00910k.

Zhang, D., Yang, F., Shimotori, T., Wang, K., Huang, Y., (2012). Performance evaluation of power management systems in microbial fuel cell-based energy harvesting applications for driving small electronic devices, Journal of Power Sources Volume 217, Pages 65-71, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.013

Zhang, Xu., Ren, H., Pyo S., Lee J., Kim J., Chae J., (2015). A high-efficiency DC-DC boost converter for a miniaturized microbial fuel cell, 10.1109/TPEL.2014.2323075

AUTOMATED CONTROL OF A ZONAL SPRINKLER FIRE EXTINGUISHING SYSTEM IN ENCLOSED SPACES

Volodya Dzharov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: volodya.dzharov@mgu.bg
Acad.Emil Djakov Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia; E-mail: volodyadzharov@gmail.com

ABSTRACT: Fires in confined spaces pose a serious threat to people, buildings and technological equipment due to limited evacuation options, intense smoke generation, and rapid spread of high temperatures. The article presents an automated control system for a zone sprinkler fire extinguishing system designed to protect confined spaces. The proposed solution uses multi-sensor monitoring of environmental parameters through temperature, smoke, and gas sensors, with decision-making being carried out using an automated control algorithm. The system provides automatic determination of the affected fire zone and selective activation of the corresponding sprinkler section. The system architecture, control algorithm, and experimental results are presented. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach and show the possibility of increasing the reliability and efficiency of automated fire extinguishing systems.

Key words: fire protection, sprinkler system, automation, multisensory detection, zonal control.

АВТОМАТИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЗОНАЛНА СПРИНКЛЕРНА ПОЖАРОГАСИТЕЛНА СИСТЕМА В ЗАТВОРЕНИ ПРОСТРАНСТВА

Володя Джаров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
Институт по електроника „Акад. Емил Джаков“, Българска академия на науките, 1784 София

РЕЗЮМЕ. Пожарите в затворени пространства представляват сериозна опасност за хората, сградите и технологичното оборудване поради ограничените възможности за евакуация, интензивното димообразуване и бързото разпространение на високите температури. В статията е представена автоматизирана система за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система, предназначена за защита на затворени пространства. Предложеното решение използва многосензорно наблюдение на параметрите на средата чрез температурен, димен и газов сензор, като вземането на решение се реализира чрез алгоритъм за автоматизирано управление. Системата осигурява автоматично определяне на засегнатата пожарна зона и селективно активиране на съответната спринклерна секция. Представени са архитектурата на системата, алгоритъмът на управление и резултатите от проведените експериментални изследвания. Получените резултати потвърждават ефективността на предложения подход и показват възможността за повишаване на надеждността и ефективността на автоматизираните пожарогасителни системи.

Ключови думи: пожарна защита, спринклерна пожарогасителна система, автоматизирано управление, многосензорно откриване на пожар, зонално управление.

I. Въведение

Пожарите в затворени пространства представляват сериозна опасност за хората, сградите и технологичното оборудване. Към тази категория се отнасят подземни паркинги, транспортни тунели, складови помещения, производствени халета, технически помещения и други обекти с ограничени възможности за евакуация и естествена вентилация. При възникване на пожар високите температури и бързото разпространение на дим значително затрудняват евакуацията и увеличават риска от материални щети, поради което се налага използването на надеждни автоматизирани системи за пожарна защита (Кърцелин и др., 2020), (Makedonska et al., 2025).

Автоматичните пожарогасителни системи представляват основен елемент на съвременните средства за активна пожарна защита. Тяхното проектиране, изграждане и експлоатация се регламентират чрез европейски стандарти, въведени като български държавни стандарти (БДС), които определят основните технически и експлоатационни изисквания към тези системи (БДС EN 54-1 – БДС EN 54-31, 2020).

През последните години се наблюдава интензивно развитие на автоматизираните системи за откриване и пожарогасене. Наред с традиционните решения все по-широко приложение намират интелигентни методи, базирани на компютърно зрение, обработка на изображения и многосензорен анализ, които повишават надеждността на откриване и намаляват времето за реакция при възникване на пожар (Gurung et al. 2024).

Съществено място в съвременните пожарогасителни инсталации заемат стационарните спринклерни системи, чиито конструктивни особености, проектиране, монтаж и експлоатация са регламентирани в действащите стандарти и технически нормативни документи (БДС EN 12259-1, 2006; БДС EN 12845, 2020; БДС EN 671-1, 2002; NFPA 13), European Committee for Standardization (2018).

Съвременните тенденции в развитието на противопожарните системи са насочени към внедряване на автоматизирано управление, многосензорно откриване на пожар и интелигентни алгоритми за вземане на решения. Разработват се системи, използващи програмируеми микроконтролерни платформи и различни комбинации от сензори за ранно откриване и локализиране на пожарните събития (Sathiabalan et al. 2021).

Анализът на литературните източници показва, че въпреки значителния напредък в областта на автоматичните пожарогасителни системи, изследванията, свързани с автоматизираното управление на зонални спринклерни системи в затворени пространства, все още са ограничени. Това налага разработването на системи, които съчетават многосензорно откриване на пожар, автоматично определяне на засегнатата зона и селективно управление на пожарогасителния процес. Комбинираното използване на температурни, димни и пламъчни (или газови, ако това е

използвано в твоята разработка) сензори повишава достоверността при откриване на пожар и позволява своевременно активиране на съответната пожарогасителна зона (Alqourabah et al., 2021).

Различните подходи за автоматично пожарогасене включват системи с чисти пожарогасителни агенти, водна мъгла, инертни газове и водни спринклерни системи. Сред тях спринклерните пожарогасителни системи се отличават с висока надеждност, сравнително проста конструкция и възможност за бързо локализиране на пожара, поради което намират широко приложение при защитата на затворени пространства (Milanoski 2021).

През последните години значителен интерес представлява използването на методи на размитата логика, безжични сензорни мрежи, технологии на Интернет на нещата (IoT) и алгоритми с елементи на изкуствен интелект за прогнозиране на пожарния риск, наблюдение на параметрите на средата и подпомагане на процеса на вземане на решения в автоматизираните пожарогасителни системи (Basu et al., 2019; Saxena et al., 2025; AlQahtani et al., 2025).

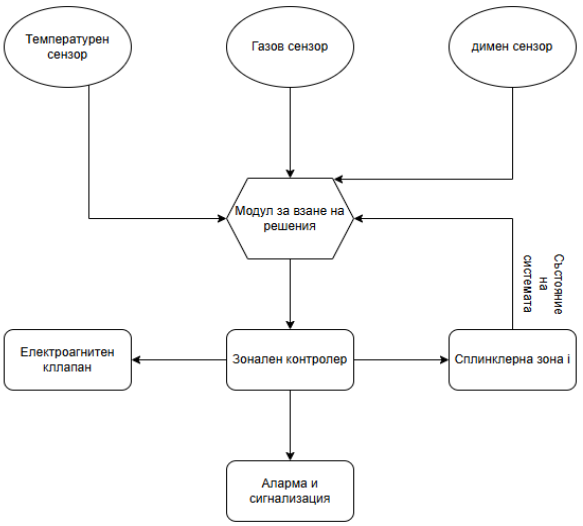
Тези технологии създават предпоставки за разработването на интелигентни системи, осигуряващи по-висока надеждност, по-бърза реакция и възможност за дистанционен мониторинг и управление на противопожарните инсталации.

В настоящата статия е представена разработена автоматизирана система за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства. Предложеното решение използва многосензорно наблюдение чрез температурен, димен и газов сензор, като въз основа на разработен алгоритъм се определя режимът на работа на системата и се активира съответната пожарогасителна зона. Представени са архитектурата на системата, алгоритъмът за управление и резултатите от проведените експериментални изследвания.

II. Архитектура на разработената система

Разработената автоматизирана система е предназначена за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства. Основната ѝ задача е да осигури своевременно откриване на пожар, определяне на засегнатата зона и автоматично управление на съответната пожарогасителна секция. При изграждането на системата е използван модулен принцип, който позволява лесно разширяване и адаптиране към различни обекти и експлоатационни условия. Архитектурата включва модул за събиране на данни от температурен, димен и газов сензор, управляващ контролер, модул за обработка и анализ на получената информация, изпълнителни механизми за управление на електромагнитните клапани и модул за звукова и светлинна сигнализация. На фиг. 1 е представена архитектурата на разработената автоматизирана система за управление.

Както се вижда от фиг. 1, информацията от трите типа сензори постъпва към управляващия контролер, където се обработва съгласно разработения алгоритъм за управление.



Фиг. 1. Архитектура на автоматизирано управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства.

В зависимост от измерените стойности и предварително зададените прагове, системата определя текущото състояние на защитавания обект и автоматично преминава в нормален, предупредителен или авариен режим на работа. При установяване на пожар се активира единствено спринклерната секция, съответстваща на засегнатата зона, като едновременно с това се включват средствата за звукова и светлинна сигнализация.

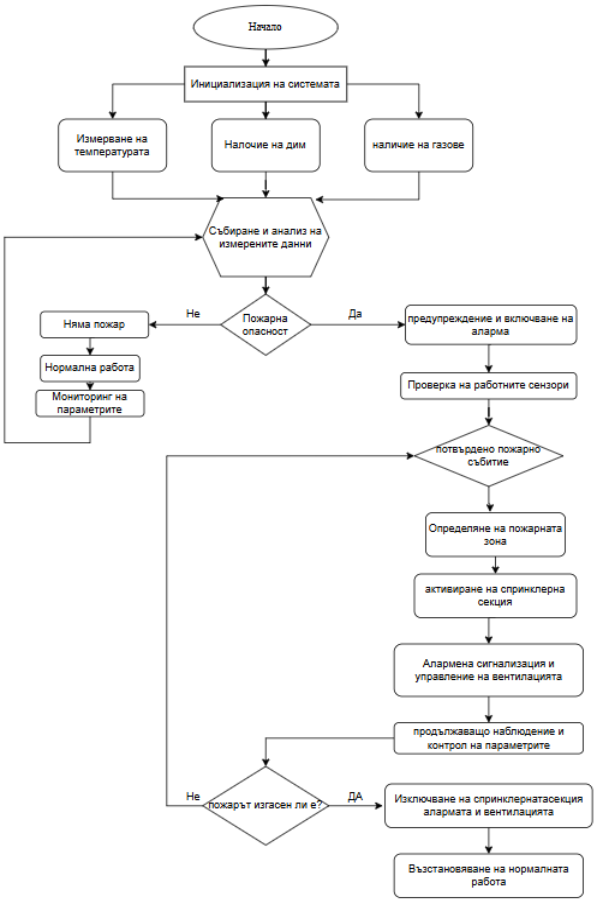
Предложеният подход позволява ограничаване на пожарогасителното въздействие само до зоната, в която е възникнал пожарът, което допринася за намаляване разхода на вода, ограничаване на вторичните материални щети и повишаване ефективността на пожарогасителната система.

III. Алгоритъм за управление на зоналната спринклерна пожарогасителна система

Ефективността на разработената автоматизирана система се определя от алгоритъма за управление, който осигурява непрекъснато наблюдение на състоянието на защитаваното пространство, обработка на информацията от сензорите и автоматично вземане на решение за активиране на съответната пожарогасителна зона. Алгоритъмът е разработен с цел осигуряване на надеждно откриване на пожар, минимизиране на вероятността от фалшиви сработвания и ограничаване на пожарогасителното въздействие само до засегнатата зона.

На фиг. 2 е представена блоковата схема на разработения алгоритъм за управление.

Както се вижда от фиг. 2, след инициализиране на системата се извършва непрекъснато измерване на параметрите на средата чрез температурен, димен и газов сензор. Получените данни се сравняват с предварително зададени прагови стойности, въз основа на които се определя текущият режим на работа на системата.



Фиг. 2. Блокова схема на алгоритъма за автоматизирано управление на зонална спринклерна пожарогасителна система

При липса на отклонения, системата функционира в нормален режим като осъществява непрекъснат мониторинг на наблюдаваните параметри. При регистриране на стойности, достигащи предварително определените предупредителни прагове, системата преминава в предупредителен режим, при който се активира звукова и светлинна сигнализация и се извършва повторна проверка на входните данни.

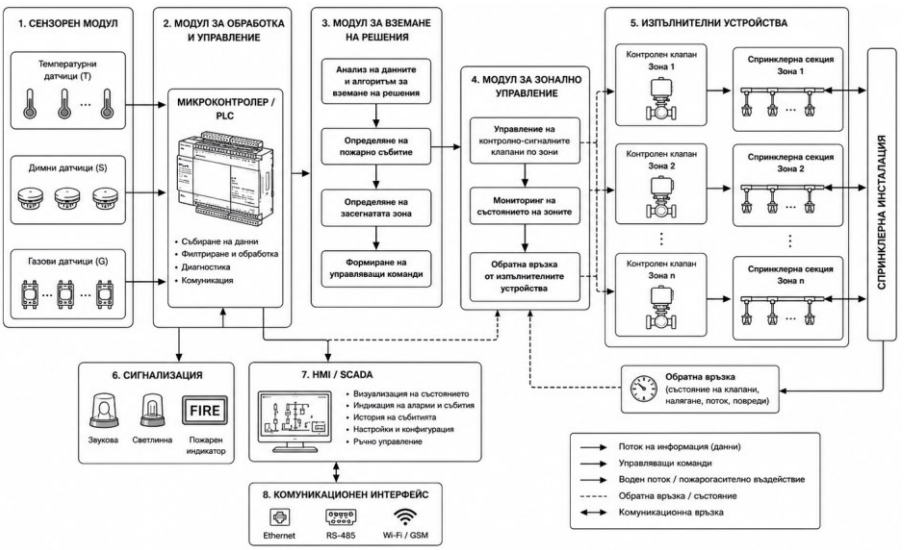
При едновременно потвърждение на пожарното събитие чрез анализ на измерените параметри, системата преминава в аварийен режим, при който автоматично се активира електромагнитният клапан на съответната спринклерна зона и се включват средствата за аварийна сигнализация. След отстраняване на причините за аварийното състояние системата се връща към нормален режим и възстановява непрекъснатия мониторинг на защитаваното пространство.

Разработеният алгоритъм осигурява последователна обработка на входната информация, надеждно определяне на пожарното събитие и селективно управление на отделните пожарогасителни зони, което повишава ефективността на системата и намалява вероятността от нежелани сработвания.

Комбинираният анализ на информацията от температурния, димния и газовия сензор повишава достоверността при откриване на пожар и позволява значително намаляване на вероятността от фалшиви сработвания в сравнение със системи, използващи само един тип датчик.

IV. Експериментално изследване на автоматизираната зонална спринклерна пожарогасителна система

За реализиране на експерименталната автоматизирана система е приложен модулен принцип на изграждане, при който отделните функционални задачи са разпределени между взаимосвързани модули. Сензорният модул осигурява непрекъснато наблюдение на параметрите на средата, а получената информация постъпва в управляващия контролер за обработка и анализ. Въз основа на измерените стойности и предварително зададените прагови условия се определят текущото състояние на системата, засегнатата пожарна зона и необходимото управляващо въздействие. Управляващите сигнали се подават към съответните изпълнителни устройства и средствата за сигнализация, като едновременно с това се осигуряват визуализация, комуникация и обратна връзка за състоянието на системата. Модулният принцип на работа на експерименталната автоматизирана зонална спринклерна пожарогасителна система е представен на фиг. 3.



Фиг. 3. Функционално-модулна структура на експерименталната автоматизирана зонална спринклерна пожарогасителна система

Както се вижда от фиг. 3, системата е организирана в последователно свързани функционални модули, осигуряващи целия процес от регистрирането на параметрите на средата до формирането и изпълнението на управляващото въздействие. Информацията от температурните, димните и газовите датчици се обработва от микроконтролерния модул, след което модулът за вземане на решение определя режима на работа и засегнатата пожарна зона. Модулът за зонално управление формира управляващите сигнали към съответните електромагнитни клапани и спринклерни секции. Системата включва също средства за звукова, светлинна и пожарна сигнализация, HMI/SCADA визуализация и комуникационен интерфейс. Обратната връзка от изпълнителните устройства позволява контрол на тяхното състояние и потвърждаване на изпълнените управляващи команди.

За оценяване на работоспособността на системата са проведени експериментални изследвания при три основни режима на работа – нормален, предупредителен и авариен. Обобщените състояния на системата при отделните режими са представени в табл. 1.

Таблица 1. *Режими на работа и състояние на автоматизираната зонална спринклерна пожарогасителна система*

Режим	Температура	Дим	Газ	Аларма	Спринклер
Нормален	T<Tкр	Не	Не	Не	Не
Предупредителен	T≈Tкр	Да	Не	Да	Не
Авариен	T>Tкр	Да	Да	Да	Да

От данните, представени в табл. 1, се установява, че разработената автоматизирана зонална спринклерна пожарогасителна система функционира в три основни режима – нормален, предупредителен и авариен. В нормален режим всички наблюдавани параметри се намират в допустимите граници и системата осъществява непрекъснат мониторинг без активиране на изпълнителните механизми. При регистриране на стойности, достигащи предварително зададените предупредителни прагове, се активира звукова и светлинна сигнализация, като системата продължава да извършва наблюдение и повторна оценка на входните данни. При потвърдено пожарно събитие алгоритъмът преминава в авариен режим, при който автоматично се задейства електромагнитният клапан на съответната спринклерна зона и се активира пожарогасителният процес.

За по-детайлна оценка на работата на разработената система са проведени експериментални изпитвания при различни комбинации на входните параметри. Получените резултати при нормална работа са представени в табл. 2.

Таблица 2. *Измерени параметри и състояние на системата при нормален режим на работа*

Параметър	Стойност	Състояние
Температура	24°C	Нормална
Газ	Под прага	Безопасно
Дим	0	Няма дим
Аларма	Изключена	Изключена

Данните в табл. 2 показват, че при нормален режим на работа всички контролирани параметри се намират в допустимите граници. Температурата е значително под критичната стойност, не се регистрира наличие на дим, а концентрацията на газ е под зададения праг на безопасност. При тези условия алармената сигнализация и спринклерната секция остават неактивни, а системата продължава да функционира в режим на непрекъснат мониторинг.

При регистриране на стойности, близки до предварително зададените прагове, системата преминава в предупредителен режим. Резултатите от изпитването при този режим са представени в табл. 3.

Резултатите, представени в табл. 3, показват, че при достигане на предварително зададените предупредителни прагове системата своевременно преминава в предупредителен режим. В този режим се активират светлинната и звуковата сигнализация, без да се задейства спринклерната пожарогасителна система. Това позволява ранно известяване за потенциална опасност и предоставя възможност за предприемане на превантивни действия преди възникването на реално пожарно събитие. По този начин се намалява вероятността от ненужно задействане на пожарогасителната система и се повишава надеждността на нейното функциониране.

Таблица 3. *Измерени параметри и състояние на системата при предупредителен режим*

Параметър	Стойност	Състояние
Температура	48°C	Близо до критичната
Газ	Под прага на безопасност	Контролирано
Дим	Наличие на дим	Предупреждение
Аларма	Включена	Активна
Спринклер	Изключен	Неактивен

При едновременно регистриране на стойности, надвишаващи зададените аварийни прагове, системата автоматично преминава в авариен режим, при който се активира съответната спринклерна зона. Резултатите от проведените експериментални изследвания при този режим са представени в табл. 4.

Таблица 4. *Измерени параметри и състояние на системата при авариен режим*

Параметър	Стойност	Състояние
Температура	65°C	Над критичната
Газ	Над прага на безопасност	Опасно
Дим	Наличие на дим	Пожар
Аларма	Включена	Активна
Спринклер	Включен	Активен

Резултатите, представени в табл. 4, показват, че при едновременно регистриране на стойности, надвишаващи предварително зададените аварийни прагове, разработената система надеждно идентифицира възникването на пожарно събитие и автоматично

преминава в авариен режим на работа. В резултат на това се активира електромагнитният клапан на съответната спринклерна зона, включват се звуковата и светлинната сигнализация и се осигурява своевременно започване на пожарогасителния процес. Проведените експериментални изследвания потвърждават, че алгоритъмът за многосензорно управление осигурява надеждно вземане на решение, бърза реакция на системата и селективно управление на засегнатата пожарна зона.

Обобщените резултати от проведените експериментални изследвания потвърждават правилното функциониране на разработената автоматизирана система при всички изследвани режими на работа. Комбинираното използване на температурен, димен и газов сензор повишава надеждността при откриване на пожар, а предложеният алгоритъм осигурява своевременно и селективно управление на спринклерната пожарогасителна система. Получените експериментални резултати са в съответствие с други изследвания, при които системи, базирани на Arduino UNO, демонстрират висока надеждност при откриване и автоматизирано потушаване на пожар в реално време (Raquin et al., 2026). Резултатите също показват, че разработеното решение е приложимо за защита на различни затворени пространства и създава предпоставки за повишаване на ефективността на автоматизираните пожарогасителни системи.

Заключение

В настоящата статия е представена разработка на автоматизирана система за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система, предназначена за защита на затворени пространства. предложената система използва комбинирана обработка на информацията от температурен, димен и газов сензор, което осигурява надеждно откриване на пожарни събития и автоматично определяне на засегнатата пожарна зона.

Разработеният алгоритъм за управление реализира последователна обработка на входните данни и автоматично превключване между нормален, предупредителен и авариен режим на работа. благодарение на селективното управление на спринклерните секции се осигурява локализиране на пожарогасителното въздействие само в засегнатата зона, което допринася за намаляване на разхода на вода и ограничаване на вторичните материални щети.

Проведените експериментални изследвания потвърждават работоспособността на разработената система и ефективността на предложения алгоритъм при различни режими на работа. получените резултати показват, че комбинираният анализ на информацията от използваните сензори повишава надеждността при откриване на пожар и намалява вероятността от фалшиви сработвания.

Разработеното решение може да бъде използвано като основа за изграждане на интелигентни автоматизирани системи за пожарна защита на подземни паркинги, транспортни тунели, складови помещения, производствени сгради и други затворени пространства. като бъдещо направление на изследването се предвижда интегриране на технологии от типа интернет на нещата (iot), безжични сензорни мрежи и алгоритми с елементи на изкуствен интелект за повишаване на функционалността и ефективността на системата.

Благодарности. Настоящото изследване е финансирано по договор **МЕМФ № 184-30.03.2026 г.**, със средства от държавния бюджет за присъщата научна дейност на държавните висши училища.

Литература

AlQahtani, A. A. S., et al. (2025). *A comprehensive review and bibliometric analysis of IoT-based fire safety systems*. *Fire, 11*(2).

Alqourabah, H., Muneer, A., & Fati, S. M. (2021). A smart fire detection system using IoT technology with automatic water sprinkler. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 11(4), 2994–3002. https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp2994-3002

Basu, S., Pramanik, S., Dey, S., Panigrahi, G., & Jana, D. K. (2019). Fire monitoring in coal mines using wireless underground sensor network and interval type-2 fuzzy logic controller. *International Journal of Coal Science & Technology*.

European Committee For Standardization. (2018). *EN 54-14: Fire detection and fire alarm systems – guidelines for planning, design, installation, commissioning, use and maintenance*.

Gurung, K., Maharjan, S. R., Pokhrel, S., Sigdel, Y., & Bhatta, B. (2024). Fire detection and extinguishing system. *International Journal on Engineering Technology, 2*(1), 60–70.

Makedonska, D., Vladkova, B., Kostadinova, N., Dinchev, Z., & Valev, B. (2025). Design and construction of a stand for sprinkler nozzle testing. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 68*.

National Fire Protection Association. (2022). *NFPA 13:Standard for the installation of sprinkler systems*.

Raquin, E. F., Ramirez, A. P., Meredor, K. R., Francisco, A. M., Guillena, K. N., & Fabro, B. C. (2026). Automated fire suppression system. *International Journal of Research and Scientific Innovation, 13*(1), 661–674. https://doi.org/10.51244/IJRSI.2026.13010057

Sathiabalan, N. A., et al. (2021). Autonomous robotic fire detection and extinguishing system. *Journal of Physics: Conference Series, 2107*.

Saxena, K., Kalyan, N. B., Aswath, A., et al. (2025). Real-time monitoring of underground mines with IoT and machine learning integration. *Journal of Mines, Metals and Fuels, 73*(6), 1559–1568.

Кърцелин, Е., Александров, Р., & Върбов, Ц. (2020). Използване на rcd устройствата като противопожарни средства. В *Proceedings Of National Scientific And Technical Conference With International Participation “Automation in Mining Industry and Metallurgy” (BULCAMC'20)*.

Миланоски, М. (2021). *TCMB112 Инфраструктурно изграждане на мрежи*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28625.15205

БДС EN 54-1 – БДС EN 54-31. Пожароизвестителни системи. Съставни части на пожароизвестителни системи и системи за управление на дим и топлина. Български институт за стандартизация.

БДС EN 12259-1:1999+A1:2001+A3:2006. *стационарни пожарогасителни инсталации. съставни части на спринклерни и инсталации за разпръскване на вода. част 1: спринклери*. Български институт за стандартизация.

БДС EN 12845:2015+A1:2020. *стационарни пожарогасителни инсталации. автоматични спринклерни инсталации. проектиране, монтиране и поддържане*. Български институт за стандартизация.

БДС EN 671-1:2002. *стационарни противопожарни инсталации. инсталации с маркуч. част 1: макари с полутвърд маркуч*. Български институт за стандартизация.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS FOR A LABORATORY CONVEYOR BELT MODEL BASED ON *ARDUINO UNO* AND *ARDUINO OPTA PLC*

Volodya Dzharov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: volodya.dzharov@mgu.bg
Acad. Emil Djakov Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia; E-mail: volodyadzharov@gmail.com

ABSTRACT. The paper presents a comparative analysis of two control systems for a laboratory conveyor belt model, implemented respectively with the *Arduino Uno* microcontroller platform and the *Arduino Opta* programmable logic controller. Two functionally equivalent systems were developed, implementing identical algorithms for electric drive control, sensor signal processing, and emergency interlocking. An experimental comparison was carried out in terms of dynamic characteristics, reliability, communication capabilities, and applicability in laboratory and industrial conditions. The obtained results show that *Arduino Uno* is an effective and cost-efficient solution for laboratory research and education, whereas *Arduino Opta* provides higher functional reliability and greater opportunities for integration into industrial automation systems.

Key words: Arduino Uno, Arduino Opta, conveyor belt, laboratory test bench, electric drive

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЛАБОРАТОРЕН МОДЕЛ НА ГУМЕНО-ТРАНСПОРТНА ЛЕНТА, БАЗИРАНИ НА ARDUINO UNO И PLC ARDUINO OPTA

Володя Джаров
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
Институт по електроника „Акад. Емил Джаков“, Българска академия на науките, 1784 София

РЕЗЮМЕ. В статията е представен сравнителен анализ на две системи за управление на лабораторен модел на гумено-транспортна лента, реализирани съответно с микроконтролерната платформа Arduino Uno и програмируемия логически контролер Arduino Opta. Разработени са две функционално еквивалентни системи, реализиращи идентични алгоритми за управление на електрозадвижването, обработка на сигналите от датчиците и аварийни блокировки. Извършено е експериментално сравнение по отношение на динамичните характеристики, надеждността, комуникационните възможности и приложимостта в лабораторни и индустриални условия. Получените резултати показват, че Arduino Uno представлява ефективно и икономично решение за лабораторни изследвания и обучение, докато Arduino Opta осигурява по-висока функционална надеждност и възможности за интеграция в индустриални системи за автоматизация.

Ключови думи: *:* Arduino Uno, Arduino Opta, гумено-транспортна лента, лабораторен стенд, *електрозадвижване.*

Въведение

В предходно изследване (Dzharov, 2025) е разработена система за аварийно управление на лабораторен модел на гумено-транспортна лента чрез програмируем логически контролер Arduino Opta, в която са реализирани функции за мониторинг на технологичния процес, обработка на сигналите от датчиците и аварийно спиране на електрозадвижването.

Лентовите транспортьори са сред най-широко използваните средства за непрекъснат транспорт на насипни и късови материали в минната, металургичната и преработвателната промишленост. Поради това тяхното моделиране, управление и оптимизация са предмет на интензивни научни изследвания (Antoniak, 2007; Antoniak, n.d.; Bajda & Hardygóra, 2019; Guo et al., 2022; Salawu et al., 2020).

В практиката на инженерното образование все по-голям интерес представлява разработването на лабораторни стендове, базирани на нискобюджетни микроконтролерни платформи, което поставя въпроса за възможностите на Arduino Uno като алтернатива на индустриалните PLC контролери при реализиране на системи за управление.

Разработването на съвременни системи за електрозадвижване, изградени върху различни типове електрически машини и управляващи структури, е обект на активни научни изследвания. Анализът на архитектурата на електрозадвижванията и принципите за тяхното управление представлява важна основа при проектирането на ефективни системи за автоматизация (Костов & Александров, 2024; Zabchev & Alexandrov, 2025).

Arduino Uno се използва широко в учебния процес благодарение на ниската си цена, лесното програмиране и големия набор от свободно достъпни библиотеки. От друга страна, Arduino Opta представлява индустриален програмируем логически контролер, разработен за приложения, изискващи висока надеждност, съвместимост със стандарта IEC 61131-3, Ethernet комуникация, Modbus TCP/RTU и интеграция със SCADA системи. Това обуславя необходимостта от сравнително изследване на двете платформи при управление на един и същ лабораторен модел.

Основната цел на настоящото изследване е да бъде извършен сравнителен анализ на Arduino Uno и PLC Arduino Opta при управление на лабораторен модел на гумено-транспортна лента, като се оценят техните функционални възможности, технически характеристики, надеждност и приложимост в лабораторни и индустриални условия.

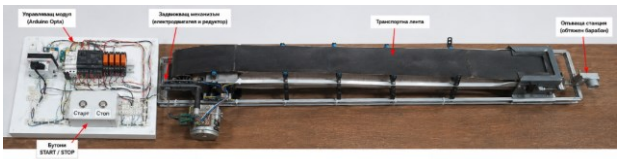
За реализиране на поставената цел са решени следните задачи:

- разработване на система за управление с Arduino Uno;
- използване на съществуващия лабораторен модел с Arduino Opta;
- реализиране на идентични алгоритми за управление;
- експериментално сравнение на работата на двете системи;

- анализ на предимствата и ограниченията на всяка платформа.

1. Архитектура на лабораторния стенд и реализиране на управление с Arduino Uno

Лабораторният стенд е разработен с цел експериментално изследване на алгоритми за управление на гумено-транспортни ленти и позволява реализиране на различни режими на работа, включително пускане, спиране, регулиране на скоростта и контрол на технологичните параметри. Конструктивно стендът представлява умален модел на промишлена транспортна система, състоящ се от постояннотоково електрозадвижване, транспортна лента, задвижващ механизъм, опъваща станция, ролкоопори, система от датчици и управляващ модул. Общият изглед на лабораторния стенд е представен на фиг. 1.



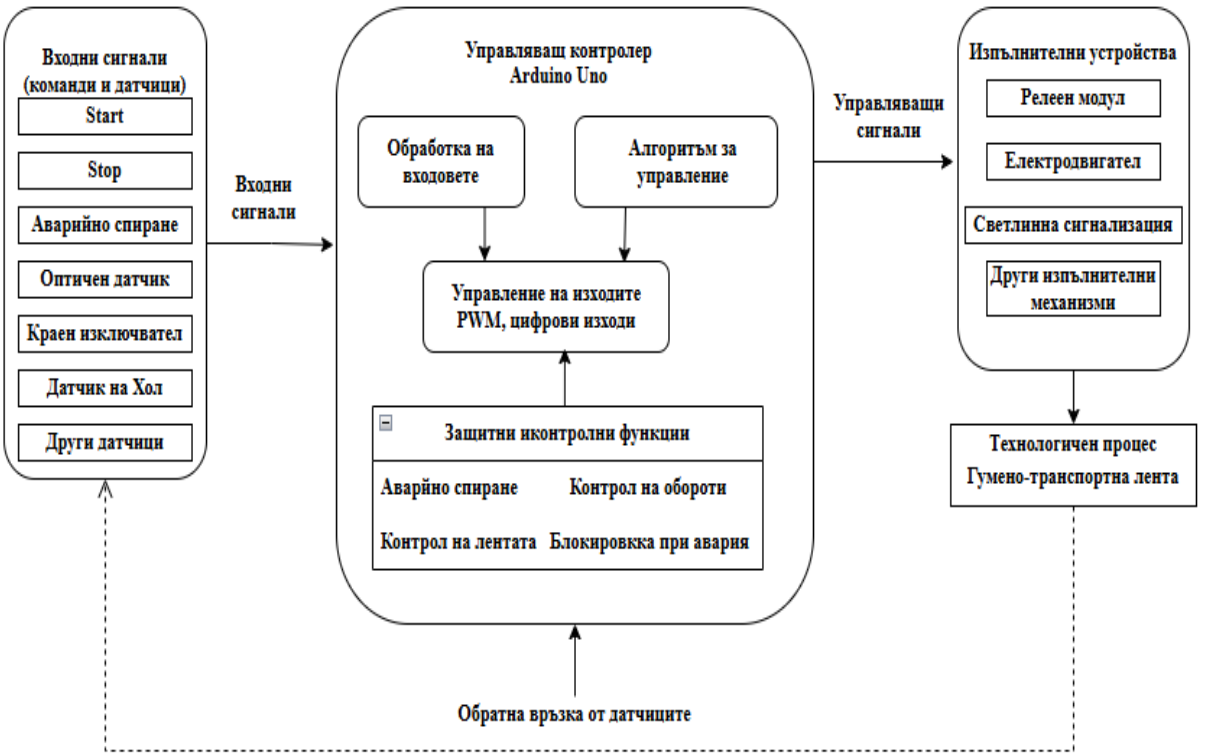
Фиг. 1. Лабораторен модел на гумено-транспортна лента и основни функционални възли

Лабораторният модел е изграден така, че да възпроизвежда основните функционални характеристики на промишлените лентови транспортьори при значително намалени габаритни размери. Управляващият модул осигурява обработката на входните сигнали от бутоните за управление и датчиците, както и формирането на управляващи сигнали към електрозадвижването. Задвижващият механизъм се състои от постояннотоков електродвигател с редуктор, който осигурява необходимия въртящ момент за движение на транспортната лента. Опъващата станция поддържа необходимото натягане на лентата, а ролкоопорите осигуряват нейното устойчиво движение по трасето.

Лабораторният стенд е проектиран така, че да позволява лесна подмяна на управляващата платформа, без да се променя механичната конструкция или изпълнителните механизми. Това дава възможност при еднакви експериментални условия да бъдат сравнени различни системи за управление, като единствената променлива величина е използваната управляваща платформа. В настоящото изследване това позволява обективно сравнение между Arduino Uno и PLC Arduino Opta при реализиране на идентични алгоритми за управление.

За реализиране на разработената система за управление като централен управляващ модул е използвана платката Arduino Uno, базирана на микроконтролера ATmega328P с тактова честота 16 MHz. Контролерът обработва сигналите от командните бутони и измервателните датчици, изпълнява алгоритъма за управление и формира управляващи въздействия към изпълнителните устройства.

Управлението на постояннотоковия двигател се реализира чрез широчинно-импулсна модулация (PWM), което позволява плавно регулиране на скоростта на транспортната лента. Този подход осигурява стабилна работа на електрозадвижването, подобрява качеството на регулиране и създава предпоставки за намаляване на енергопотреблението на транспортната система (Bajda & Hardygóra, 2019, 2021); (Palmero-González et al., 2025).



Фиг. 2. Архитектура на системата за управление на лабораторния модел на гумено-транспортна лента, базирана на Arduino Uno

За по-ясно представяне на взаимодействието между входните устройства, управляващия контролер и изпълнителните механизми е разработена функционална блокова диаграма на системата за управление. Тя илюстрира потока на информацията от входните сигнали, обработката им в Arduino Uno и формирането на управляващите въздействия към изпълнителните устройства. Блоковата диаграма на разработената система е представена на фиг. 2. Тя показва взаимодействието между входните устройства, управляващия контролер и изпълнителните механизми. Всички входни сигнали от командните бутони и датчиците постъпват към Arduino Uno, където се обработват съгласно разработения алгоритъм за управление. Въз основа на резултатите от обработката контролерът формира управляващи сигнали към постояннотоковия електродвигател, релейния модул и останалите изпълнителни устройства. Наред с основния алгоритъм са реализирани защитни и контролни функции, включващи аварийно спиране, контрол на оборотите, наблюдение на състоянието на транспортната лента и блокировка при възникване на аварийни ситуации. Реализираната обратна връзка от измервателните датчици осигурява непрекъснат мониторинг на технологичния процес и повишава надеждността на системата за управление.

След реализиране на системата за управление с Arduino Uno беше извършено сравнение с разработената по-рано система, базирана на PLC Arduino Opta (Dzharov, 2025). За осигуряване на обективна оценка и коректност на експерименталните резултати и при двете реализации е използван един и същ лабораторен стенд, като са запазени без промяна датчиците, изпълнителните механизми и алгоритъмът за управление. По този начин единствената независима променлива в проведеното изследване е типът на използвания управляващ контролер.

За реализиране на управлението са дефинирани идентични входни и изходни сигнали, осигуряващи връзката между контролера, измервателните датчици и изпълнителните устройства. Входните сигнали включват командите за пускане, спиране и аварийно спиране, както и сигналите от датчиците за контрол на движението и състоянието на транспортната лента. Изходните сигнали управляват електрозадвижването, светлинната сигнализация и останалите изпълнителни механизми.

Таблица 1. *Съпоставка на входно-изходните сигнали при Arduino Uno и Arduino Opta*

Функция	Arduino Opta	Arduino Uno
START бутон	DI1	D2
STOP бутон	DI2	D3
Авариен стоп	DI3	D4
Оптичен датчик	DI4	D5
Краен изключвател	DI5	D6
Датчик на Хол	DI6	D7
PWM управление на двигателя	A0/PWM	D9 (PWM)
Светлинна сигнализация	DO1	D10
Управление на реле	Relay 1	D11 + релеен модул

От данните, представени в табл. 1, се вижда, че двете системи използват еднакъв набор от входни и изходни сигнали, което гарантира идентични условия при провеждане на експерименталните изследвания. Това позволява различията в получените резултати да бъдат свързани единствено с особеностите на използваните управляващи платформи, а не с изменения в периферните устройства или алгоритъма за управление.

Съпоставката на входно-изходните сигнали показва, че и двете хардуерни платформи разполагат с необходимите ресурси за реализиране на разработената система за управление. Основните различия са свързани с конструктивното изпълнение на изходните вериги, комуникационните възможности и пригодността за работа в индустриална среда. Arduino Opta разполага с вградени релейни изходи и индустриални комуникационни интерфейси, докато при Arduino Uno е необходимо използването на външен релеен модул за управление на изпълнителните механизми.

Въпреки тези конструктивни различия, разработената система за управление с Arduino Uno реализира същите основни функционални възможности като системата, базирана на PLC Arduino Opta. Това позволява да бъде направена обективна оценка на приложимостта на нискобюджетните микроконтролерни платформи при управление на лабораторни електрозадвижвания.

След извършения сравнителен анализ на използваните хардуерни платформи е разработен математически модел на постояннотоковото електрозадвижване, използвано в лабораторния модел на гумено-транспортната лента. Моделът служи като основа при синтеза на алгоритъма за управление, настройката на PID регулатора и анализа на динамичните характеристики на системата. Освен при проектирането на системи за управление, математическите модели на постояннотоковите двигатели намират приложение и при диагностиката на електрически машини, като чрез анализ на параметрите на котвената верига и роторните намотки може да се оцени техническото състояние на електрозадвижването и да се открият възникващи неизправности (Zabchev & Alexandrov, 2025).

Електрическото равновесие на котвената верига се описва със зависимостта:

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (1)$$

където:

- U_a– напрежение на котвата;
- R_a– съпротивление на котвената намотка;
- L_a– индуктивност на котвената намотка;
- i_a– ток на котвата;
- e– противо-електродвижещо напрежение.

Противо-електродвижещото напрежение се определя от:

$$e = K_e \omega \quad (2)$$

където:

- K_e– константа на двигателя;
- ω– ъглова скорост.

Механичното уравнение на двигателя има вида:

$$J\frac{dw}{dt} = M_e - M_c \quad (3)$$

където:

- J– момент на инерция;
- M_e– електромагнитен момент;
- M_c– товарен момент.

Електромагнитният момент се определя чрез:

$$M_e = K_t i_a \quad (4)$$

където:

- K_t– моментна константа на двигателя.

При пренебрегване на индуктивността на котвената намотка ($L_a \approx 0$)математическият модел може да бъде представен чрез предавателна функция от първи ред:

$$G(s) = \frac{k}{Ts+1} \quad (5)$$

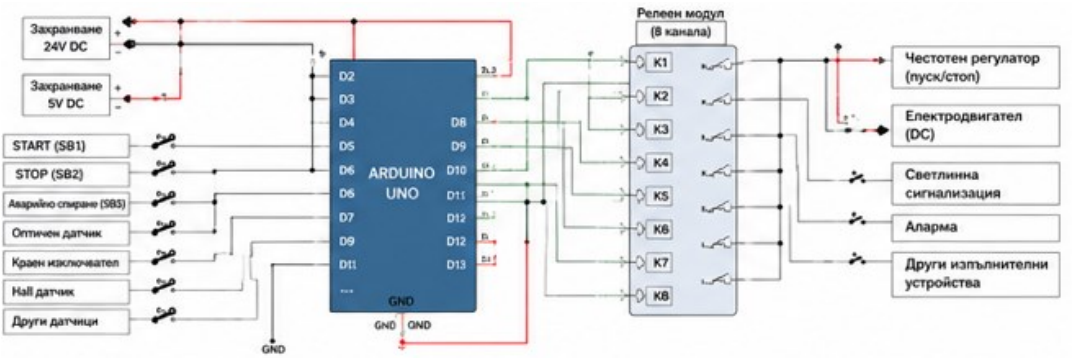
където:

- K– коефициент на усилване;
- T– електромеханична времеконстанта на системата.

Полученият математически модел е използван при разработването на функционалната структура на системата за управление и при синтеза на PID регулатора. Въз основа на него е изградена блокова схема, която описва взаимодействието между входните устройства, управляващия контролер, изпълнителните механизми и защитните функции. Чрез тази структура се осъществява обработка на сигналите от измервателните датчици, изпълнение на алгоритъма за управление и формиране на управляващи въздействия към електрозадвижването и останалите изпълнителни устройства.

Използването на един и същ математически модел и идентична структура на управление при двете платформи гарантира, че различията в експерименталните резултати се дължат единствено на особеностите на използваните управляващи устройства, а не на различия в алгоритъма за управление.

След определяне на функционалната структура и входно-изходните сигнали е разработена електрическата схема на системата за управление с Arduino Uno (Фиг.3).



Фиг. 3. Електрическа схема на системата за управление с Arduino Uno

От електрическата схема на фиг. 3 се вижда, че Arduino Uno осъществява обмен на информация с входните устройства чрез цифровите входове, а управлението на изпълнителните механизми се реализира посредством осемканален релеен модул. Командните бутони START, STOP и аварийно спиране, както и сигналите от оптичния датчик, крайния изключвател и Hall датчика, се използват за формиране на логическите условия в алгоритъма за управление. Изходните сигнали управляват честотния регулатор, постояннотоковия електродвигател, светлинната сигнализация, алармената индикация и останалите изпълнителни устройства. Предложената схема осигурява надеждно функциониране на лабораторния модел и позволява реализиране на всички предвидени режими на работа.

За анализ на динамичните характеристики на електрозадвижването и за синтез на PID регулатора е разработен математически модел на използвания постояннотоков двигател.

2. PID управление на постояннотоковия двигател

За осигуряване на плавно регулиране и стабилизиране на скоростта на транспортната лента е разработен пропорционално-интегрално-диференциален (PID) регулатор. Основната задача на регулатора е да минимизира грешката между зададената и действителната скорост на постояннотоковия двигател, като осигури бърз преходен процес, минимално пререгулиране и висока устойчивост при промяна на натоварването.

В разработената система зададената скорост се определя от оператора, а действителната скорост се измерва чрез Hall датчик, монтиран към задвижващия механизъм. Получената информация се обработва от микроконтролера Arduino Uno, който изчислява управляващото въздействие съгласно PID алгоритъма и формира PWM сигнал за управление на постояннотоковия двигател.

PID регулаторът се описва със зависимостта:

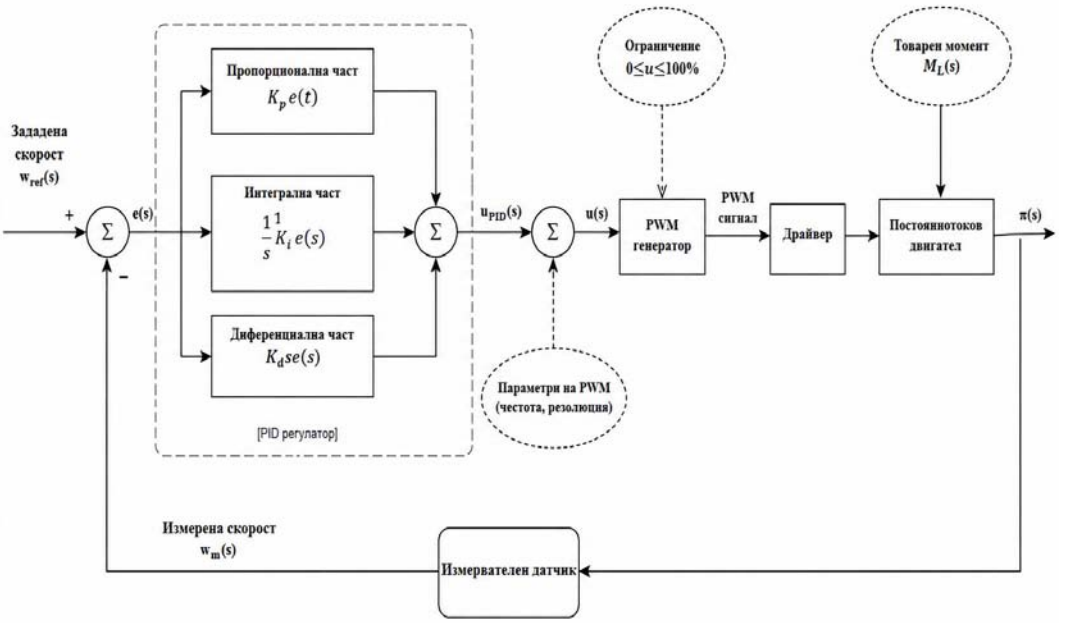
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

където:

- $e(t)$– грешка между зададената и измерената скорост;
- K_p– пропорционален коефициент;
- K_i– интегрален коефициент;
- K_d– диференциален коефициент.

Пропорционалната съставка осигурява бърза реакция на системата към измененията на зададената стойност, интегралната съставка елиминира статичната грешка, а диференциалната съставка подобрява динамичните характеристики, като намалява пререгулирането и повишава устойчивостта на системата при преходните процеси.

За по-ясно представяне на принципа на регулиране е разработена структурна схема на системата за управление с PID регулатор, представена на фиг. 4.



Фиг. 4. Структурна схема на PID управление на постояннотоковия двигател

От структурната схема се вижда, че системата използва отрицателна обратна връзка по скорост. Измерената стойност от Hall датчика непрекъснато се сравнява със зададената стойност, като полученият сигнал за грешка постъпва към PID регулатора. Въз основа на изчисленото управляващо въздействие Arduino Uno формира PWM сигнал, чрез който се регулира скоростта на постояннотоковия двигател. По този начин се компенсират измененията в натоварването и се осигурява поддържане на постоянна скорост на транспортната лента.

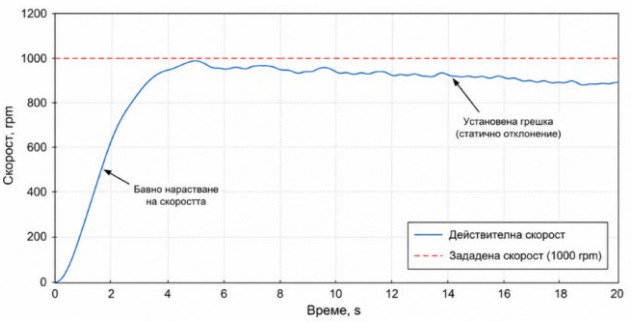
PID алгоритъмът е реализиран в програмната среда Arduino IDE, като структурата и принципът на регулиране са идентични с използваните при системата, базирана на PLC Arduino Opta (Dzharov, 2025). Използването на един и същ алгоритъм за управление при двете хардуерни платформи гарантира, че установените различия в експерименталните резултати се дължат единствено на особеностите на използваните управляващи устройства, а не на различия в алгоритъма за регулиране.

По този начин се създават еднакви условия за експериментално сравнение на динамичните характеристики, качеството на регулиране и функционалните възможности на системите, реализирани с Arduino Uno и PLC Arduino Opta.

3. Експериментални резултати и анализ

За оценка на работата на разработената система за управление са проведени експериментални изследвания върху лабораторния модел на гумено-транспортната лента. Целта на изпитванията е да се оцени влиянието на PID регулатора върху динамичните характеристики на електрозадвижването и да се извърши сравнителен анализ между системите за управление, реализирани с Arduino Uno и PLC Arduino Opta.

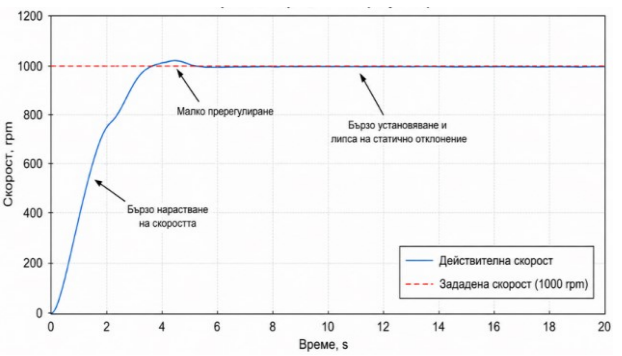
Първоначално е изследван преходният процес при управление без обратна връзка по скорост. В този режим коефициентът на запълване на PWM сигнала се задава предварително, без автоматична корекция спрямо действителната скорост на двигателя. Полученият преходен процес е представен на фиг. 5.



Фиг. 5. Преходен процес на системата за управление без PID регулатор

От представените резултати се установява, че при управление без PID регулатор скоростта на постояннотоковия двигател достига зададената стойност сравнително бавно, като се наблюдава статична грешка и значително време за установяване. Липсата на обратна връзка не позволява автоматично компенсиране на измененията в натоварването, вследствие на което скоростта се изменя под въздействието на външни смущения. Получените резултати показват, че управлението само чрез предварително зададен PWM сигнал не осигурява необходимата точност и устойчивост при регулиране на скоростта.

За подобряване на динамичните характеристики на системата е реализиран PID регулатор, който използва информацията от Hall датчика за непрекъснато измерване на скоростта и автоматично регулиране на коефициента на запълване на PWM сигнала. Полученият преходен процес е представен на фиг. 6.



Фиг. 6. Преходен процес на системата за управление с PID регулатор

От фиг. 6 се вижда, че използването на PID регулатор значително подобрява динамичните характеристики на системата. Скоростта достига зададената стойност за по-кратко време, пререгулирането е ограничено до приблизително 5%, а след кратък преходен процес системата се установява без съществени колебания. Получените резултати потвърждават, че PID регулаторът осигурява висока устойчивост, минимална установена грешка и ефективно компенсиране на измененията в натоварването.

За количествена оценка на разработената система е извършено сравнение между управлението без PID регулатор, управлението с PID регулатор, реализирано с Arduino Uno, и разработената в предходно изследване система с PLC Arduino Opta (Dzharov, 2025). Основните експериментално определени показатели са представени в табл. 2.

Таблица 2. *Сравнителен анализ на динамичните и техническите характеристики на системите за управление с Arduino Uno и PLC Arduino Opta*

Показател	Без PID (Arduino Uno)	С PID (Arduino Uno)	Arduino Opta [1]
Време за установяване	≈ 2.5 s	≈ 0.8 s	≈ 0.8 s
Пререгулиране	няма контрол	≈ 5 %	≈ 5 %
Установена грешка	по-голяма	≈ 0 %	≈ 0 %
Устойчивост при натоварване	ниска	висока	висока
Управление чрез PWM	Да	Да	Да
Използван контролер	Arduino Uno	Arduino Uno	Arduino Opta
Аналогови входове	6	6	8
Цифрови входове/изходи	14	14	8 DI / 4 Relay DO
Подходящ за промишлена среда	Не	Не	Да
Цена	ниска	ниска	висока

Анализът на резултатите, представени в табл. 2, показва, че внедряването на PID регулатора води до съществено подобрение на качеството на регулиране независимо от използваната хардуерна платформа. Времето за установяване намалява от приблизително 2,5 s до около 0,8 s, установената грешка практически се елиминира, а устойчивостта на системата при изменение на натоварването значително се повишава.

Сравнението между Arduino Uno и PLC Arduino Opta показва, че при използване на идентичен алгоритъм за управление и еднакви условия на експеримента двете платформи осигуряват практически еднакви динамични характеристики. Основните различия се проявяват в конструктивното изпълнение, комуникационните възможности и пригодността за работа в индустриална среда. Arduino Opta разполага с вградени релейни изходи, индустриални комуникационни интерфейси и поддръжка на стандарта IEC 61131-3, което го прави по-подходящ за промишлени приложения. От своя страна Arduino Uno представлява икономично и ефективно решение за лабораторни изследвания, учебни цели и разработване на прототипи, като същевременно осигурява показатели за качество на регулиране, съпоставими с тези на PLC Arduino Opta.

Заключение

В настоящата статия е разработена и експериментално изследвана система за управление на лабораторен модел на гумено-транспортна лента, базирана на микроконтролерната платформа Arduino Uno. Реализирано е PWM управление на постояннотоков двигател с PID регулатор, осигуряващ стабилно регулиране на скоростта и подобрени динамични характеристики.

Проведените експериментални изследвания показват, че използването на PID регулатор води до намаляване на времето за установяване, ограничаване на пререгулирането и практически елиминиране на установената грешка. Получените резултати потвърждават ефективността на предложения алгоритъм за управление.

Извършеният сравнителен анализ показва, че при използване на идентичен алгоритъм за управление Arduino Uno осигурява динамични показатели, съпоставими с тези на PLC Arduino Opta. Основните различия между двете платформи са свързани с комуникационните възможности, конструктивното изпълнение и приложимостта им в индустриална среда. Arduino Uno представлява ефективно и икономично решение за лабораторни изследвания и обучение, докато Arduino Opta е по-подходящ за промишлени приложения.

Като бъдещо направление на изследването се предвижда интегриране на SCADA система за мониторинг и архивиране на технологичните параметри, както и разработване на адаптивни алгоритми за управление на електрозадвижването.

Благодарности: Настоящото изследване е финансирано по договор МЕМФ № 184-30.03.2026 г., със средства от държавния бюджет за присъщата научна дейност на държавните висши училища.

Литература

Antoniak, J. (2007). *Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym* (3rd ed.). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. ISBN 978-83-7335-396-1.

Antoniak, J. (n.d.). *Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach*. Śląsk Publishers. ISBN 9321607098.

Bajda, M., & Hardygóra, M. (2019). Laboratory tests of operational durability and energy-efficiency of conveyor belts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 261*, 012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/261/1/012002

Bajda, M., & Hardygóra, M. (2021). Analysis of the influence of the type of belt on the energy consumption of transport processes in a belt conveyor. *Energies, 14*, 6180.

Bugaric, U., Tanasijević, M., Polovina, D., Ignjatović, D., & Jovančić, P. (2014). Reliability of rubber conveyor belts as a part of the overburden removal system—Case study: Tamnava-East Field Open Cast Mine. *Technical Gazette, 21*, 925–932.

Dzharov, V. (2025). Emergency mode of control of rubber belt conveyors via PLC system Arduino Opta. *International Journal of Recent Technology and Applied Science, 7*(2), 104–116. https://doi.org/10.36079/lamintang.ijortas-0702.914

Guo, X., Liu, X., Zhou, H., Stanislawski, R., Królczyk, G., & Li, Z. (2022). Belt tear detection for coal mining conveyors. *Micromachines, 13*(3), 449. https://doi.org/10.3390/mi13030449

Jonak, J., & Gajewski, J. (2006). Operating diagnostics and monitoring issues of selected mining belt conveyors. *Eksploatacja i Niezawodność, 4*, 74–78.

Kostov, G., & Александров, Р. (2024). Структура на система на електрозадвижване с превключваем реактивен двигател. *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, 67*, 228–235. https://doi.org/10.5281/zenodo.13762846

Krol, R., Kawalec, W., & Gladysiewicz, L. (2017). An effective conveyor belt for underground transportation systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95*, 042047.

Palmero-González, M. A., Batuecas, E., Fernández-Torrijos, M., & Marugán-Cruz, C. (2025). Environmental comparison of dry and hybrid condensing systems in concentrating solar power tower plants. *Energy Conversion and Management, 340*, 119978. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119978

Rzeszowska, A., Jurdziak, L., Błazej, R., & Lewandowicz, P. (2025). Analysis of uncertainty in conveyor belt condition assessment using time-based indicators. *Applied Sciences, 15*, 7939. https://doi.org/10.3390/app15147939

Salawu, G., Bright, G., & Onunka, C. (2020). Modelling and simulation of a conveyor belt system for optimal productivity. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 11*(1), 115–121.

Zabchev, A., & Alexandrov, R. (2025). Determination of the resistances in the rotor's coils of a mine locomotive motor. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal, 6*. https://doi.org/10.58903/dw18921671

Шейретов, Х. (2016). Изследване влиянието на различни фактори върху натоварването на ролките на лентови транспортьори. *Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, 59*, III.

DEVELOPMENT OF AN OSINT TOOL FOR GEOLOCATION ANALYSIS BASED ON COORDINATE TRIANGULATION

Ivan Drankov, Yoana Konstantinova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ivan.drankov@mgu.bg; y.y.konstantinova@gmail.com

ABSTRACT. This paper presents the development of an OSINT tool for estimating a target’s geographic location through coordinate triangulation from image metadata. The tool extracts GPS data from digital images, normalises and validates the collected coordinates, and applies spatial analysis methods, such as radius-based intersection, weighted centroid calculation, and Delaunay triangulation. The results are visualised on an interactive map, supporting automated geolocation analysis in OSINT investigations.

Keywords: OSINT, geolocation, triangulation, metadata, digital forensics.

РАЗРАБОТВАНЕ НА OSINT ИНСТРУМЕНТ ЗА ГЕОЛОКАЦИОНЕН АНАЛИЗ, БАЗИРАН НА КООРДИНАТНА ТРИАНГУЛАЦИЯ

Иван Дрънков, Йоана Константинова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата публикация представя разработването на OSINT инструмент за определяне на географското местоположение на обект чрез координатна триангулация на база метаданни от изображения. Инструментът извлича GPS данни от цифрови изображения, нормализира и валидира събраните координати и прилага методи за пространствен анализ като анализ на пресичащи се радиуси, изчисляване на претеглен центроид и Delaunay триангулация. Получените резултати се визуализират върху интерактивна карта, подпомагаща автоматизирания геолокационен анализ в рамките на OSINT разследванията.

Ключови думи: OSINT, геолокация, триангулация, метаданни, дигитална криминалистика.

Introduction

The increasing volume of publicly available information has significantly expanded the possibilities for intelligence gathering through open-source intelligence techniques. Modern smartphones, cameras, and mobile devices generate large amounts of metadata that may contain valuable information regarding the location, time, and context of captured digital content. Geolocation through metadata analysis has become an important component of cyber investigations, law enforcement activities, digital forensics, and threat intelligence operations. In many cases, investigators are required to determine the approximate location of an individual, based on multiple photographs from different sources. Manual processing of such information is time-consuming and often requires specialised knowledge and software tools. The objective of this research is to develop an automated OSINT tool capable of extracting geolocation metadata from digital images and estimating the most probable location of a target through coordinate triangulation and spatial analysis.

Metadata Extraction

Location data can be extracted from multiple different sources, e.g. GPS data, metadata, IP address, Apps, etc. This research will focus on metadata solely from camera shots with attached metadata from a built-in GPS module on the device which took the picture. “Direct data sources, such as GPS, conventional geodetic measurements, and process monitoring, are described as data received from devices specifically designed for data collection” (Dimitrov et al., 2021).

This ensures the most accurate data for analysing near exact location. “Taking into account all data points, the maximum radial error for the Standard and Experimental phones was 11'533 m and 27'259 m” (Ryser et al., 2024).

The first step of the tool is to extract useful metadata from the input media files. In this implementation, the main focus is on GPS metadata stored in digital images. The tool scans a selected folder and processes supported file formats, such as JPG, JPEG, HEIC and other common image formats.

For GPS information like latitude, longitude and accuracy, date and time of creation, etc., the proposed system extracts this information if it is present. The feature is implemented with some help from Exif Tool due to the range of supported image formats and structured output of metadata. Python EXIF parser is used as a redundant feature for standard image files.

Once metadata is extracted, the coordinates are normalised into decimal degree format, as the GPS data might be stored in different formats, like in degree, minute, and second degrees. After normalising, the tool validates the information it extracts. Files which do not contain GPS Data, files which have nonsensical coordinates and files with duplicate coordinates in pairs are rejected from the core analysis.

Rejected files are not deleted from the workflow. They are stored in a separate rejected log together with the reason for rejection. This makes the analysis traceable and allows the analyst to check which files were accepted and which were excluded.

The accepted records are converted into evidence points. Each point contains the file name, coordinates, timestamp, extraction method, and uncertainty values. These evidence points are then used in the next stages of the tool for clustering, coordinate hypothesis generation and visualisation.

Implementation

In the case of Open-Source Intelligence, locations are mostly used to locate an object or a threat. The focus of this tool is to locate objects and predict movement, based on source points defined by the extracted data. The source points are used as a basis for the analysis. Choosing the right method depends on the data. At the moment, this is done by the operator. Humans have a good understanding of spatial and temporal data and can quickly determine the context. In further research, an AI with context knowledge will be useful for determining the best method.

Method 1: Triangulation

When an object's location is unknown, triangulation is the best method for estimating it. This is often seen in pictures taken near the object's home location. Those pictures are mostly clustered in a region with the same date of creation or very close to each other. The method used for finding locations is Delaunay triangulation. Here, the algorithm is weighted by the operator based on the context of the data. Each observed location point is weighted by a human representing the confidence, frequency, or reliability of the observation. This allows more reliable or more frequently observed points to have a stronger influence on the result.

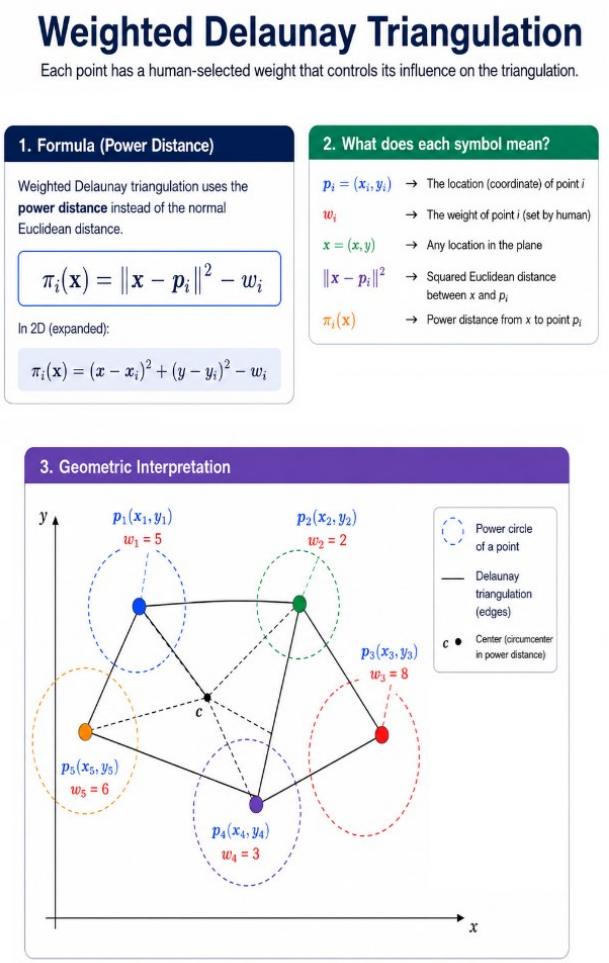


Fig 1. Delaunay triangulations

“Regular triangulations are generalised Delaunay triangulations. A regular triangulation is defined for a set of weighted points. Each weighted point can be considered as a sphere whose square radius is equal to the weight. Then, the regular triangulation of a set of weighted points can be defined as the dual of the power diagram of the associated spheres.” (Boissonnat et al., 2002). The specific method used is shown in Fig 1.

Method 2: Last known location

The last known location is calculated by ordering all accepted GPS records by their creation time and selecting the most recent valid point. The result shows the latest available latitude, longitude, timestamp, and source file.

This point is useful as a reference in the analysis, but it does not prove the current location of the subject. It only represents the latest location recorded in the available metadata. For this reason, it is presented separately from the main coordinate hypothesis and from the path prediction layer.

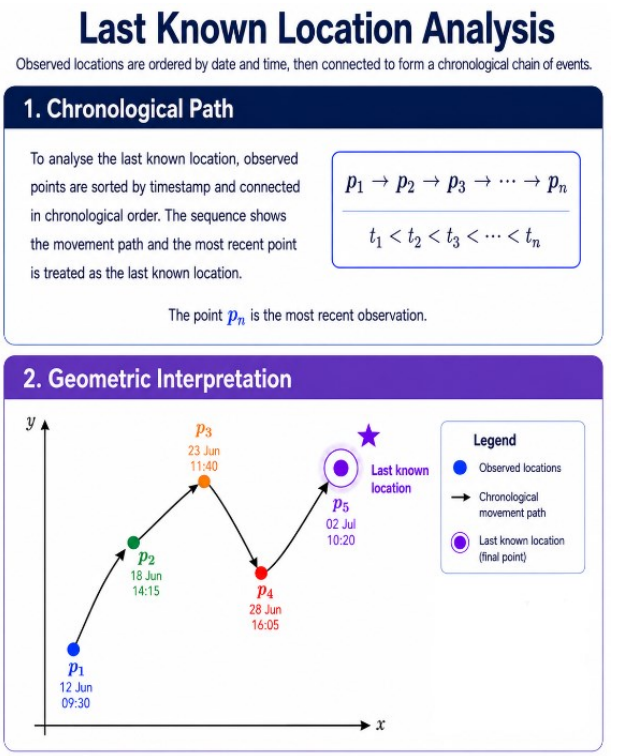


Fig 2. Last known location

Method 3: Path prediction

Path prediction in the scope of the proposed tool works as a movement hypothesis module which is based on chronological geolocation evidence. It is essential to notice that "prediction" does not mean the forecasting of movement at all, and refers to the generation of a probable movement pattern based on the GPS data and timestamps. Hence, the output of the tool should be seen as a contextual layer of analysis, not the proof of the exact route.

As the step following metadata extraction and validation, all the geolocation records with information on timestamps are sorted by date. Further, within each date group, the records are sorted in chronological order according to the extracted time of creation. Then, consecutive points are linked to create a movement segment. Each movement segment is described by the following four elements – starting coordinate, ending coordinate, time interval, and calculated distance.

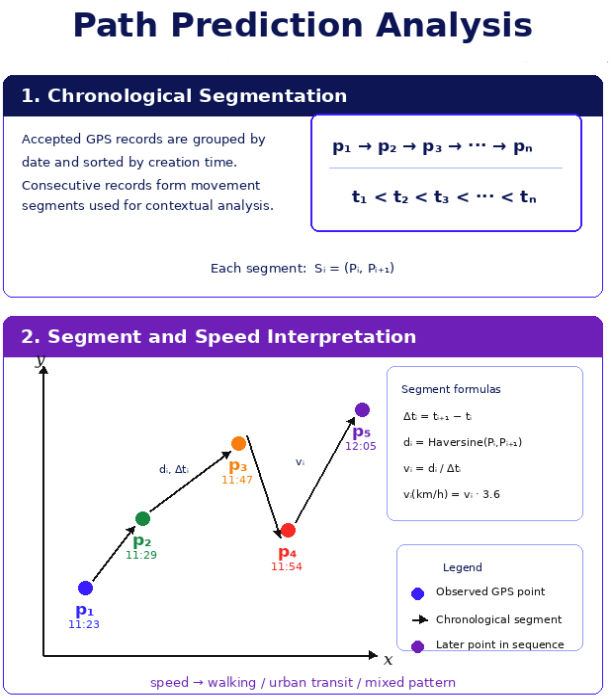


Fig 3. Path prediction

The distance between the two consecutive points is measured via the Haversine formula, which gives the estimated great-circle distance between two latitude/longitude pairs on the Earth's surface. “Haversine is a popular formula used to find the distance between two points. But no research proves the number of formulae to find which distance is the "best."” (Maria et al., 2020).

$$D = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}$$

For the case where two points are presented as P1 (lat1, lon1) and P2 (lat2, lon2), the calculated distance is divided by the difference between the two timestamps in order to estimate the average speed for the particular segment. Speed is measured in kilometres per hour and reflects the possible way of movement.

The tool assigns each segment to a particular movement hypothesis depending on its speed. Thus, low speed is considered to be walking-plausible, medium speed may refer to mixed or uncertain movements, and high speed may represent urban transit or motorised transport. The classification categories are heuristic and cannot be used as proof of the actual way of movement. The idea is that they should be used as an assistance to the analyst in checking if the chronological order of points is spatially and temporally plausible.

The total travelled distance, total duration, speed values on the segment level, and a dominating pattern are calculated for each daily sequence. If there is more than one type of movement in the sequence, it is referred to as a mixed-day pattern. This is helpful in case the set of photographs includes both clustered points and distant points from the same day. With the help of the path-prediction module, it is explained why some coordinates can be seen as belonging to the primary geolocation cluster, and others are considered secondary clusters or contextual evidence.

The movement hypothesis is represented as an optional temporal layer on the interactive map. It is separated intentionally from the final coordinate hypothesis. The final coordinate hypothesis is produced via the spatial clustering and triangulation workflow, whereas the path-prediction layer shows the chronological context. It helps avoid the situation where the system treats every valid coordinate as evidence of a single location, helping the analyst identify a stable location cluster or movement between different locations.

During the experimental run, the tool found a daily sequence containing nine accepted geolocation records for one date. The total length of the sequence was about 7.64 km, and the dominating pattern was classified as mixed. This means that the records from the day cannot be seen as evidence of a single stationary location, but of the combination of movement and clustered evidence. Hence, the path-prediction layer assists in interpreting the coordinate results by showing the temporal transitions between spatial clusters.

There are several limitations related to this module. First, the metadata timestamps may be missing, modified, influenced by the time zone setting, or inconsistent across devices. In addition, the route calculation is based on the straight-line distances between the consecutive GPS points and not on the reconstruction of the real path through the streets. So, the path prediction should be regarded as the movement hypothesis and not the confirmation of the physical movement.

In future research, deep neural networks may be implemented to improve the path prediction module. Similar approaches have been applied for predictive analysis, where operational data are used to train different types of deep neural networks in order to predict a useful indicator. This suggests that, with enough chronological location data, a neural network could support the estimation of probable movement patterns and future locations (Arsova-Borisova and Hristov, 2021).

Results

The data in this research is collected with OSINT methods and is extracted from metadata. Publicly available sources are not subject to GDPR, but the results of the experiment may violate it. To ensure compliance with both ethical and moral laws, the results shown are only of the authors' data.

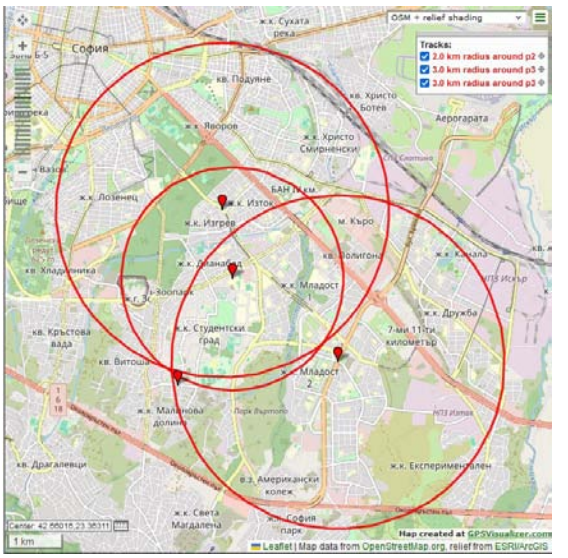


Fig 4. Method 1 triangulation

Triangulating results with real data shows the exact home address with about a 50-meter offset. This particular data belongs to one of the authors (I. Drankov). In this case, the experiment was made with 3 of the most occurring data points of the subject.

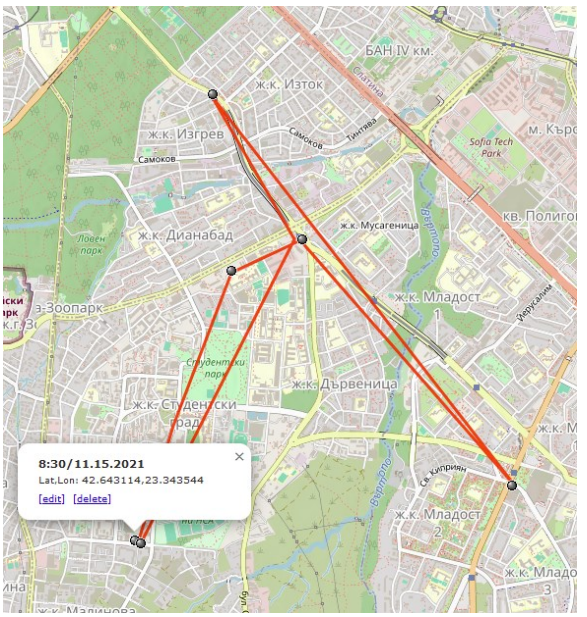


Fig 5. Last known location

Fig 6. Path prediction

The last known location method was tested by ordering the extracted location points chronologically. Each point represents a known position of the subject at a specific moment in time. By connecting these points in a sequence, the system creates a chain of movement events. This allows the operator to understand the subject's movement history and identify the most recent known position. The method is useful when the goal is not to calculate a fixed home location, but to determine where the subject was last observed based on the available data.

The path prediction method uses the chronological chain of known locations as a basis for estimating possible movement. When two or more points are separated by a significant time interval, the system can analyse the direction of movement and the distance between the points. Based on this, a possible path between the known locations can be suggested. In cases where the last known location is available, the same logic can be used to estimate possible future locations. This does not provide an exact prediction, but it helps narrow down the area where the subject may be located or may move next.

The results show that location metadata can reveal highly sensitive information, even when the original data appears limited or fragmented. Repeated location points can expose important places such as a home address, while time-ordered points can show movement patterns and support path prediction. This confirms that OSINT-based location analysis can be effective for threat identification, but it also highlights the need for strict ethical limitations when processing personal geolocation data.

References

Arsova-Borisova, K. & Hristov, V. (2021). Deep Neural Networks Applications in the Study of a Geological Indicator. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*, *2*, pp. 25–27, doi: 10.5281/zenodo.5594817.

Boissonnat, J. D., Devillers, O., Pion, S., Teillaud, M., & Yvinec, M. (2002). Triangulations in CGAL. *Computational Geometry: Theory and Applications, 22*, (1–3), pp. 5–19. doi: 10.1016/S0925-7721(01)00054-2.

Dimitrov, A., Ivanova, N., Nesheva, R., & Yanev, N. (2021). Preparation of industrial data for implementation in Big Data. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, *64*, 151–154.

Maria, E., Budiman, E., Haviluddin & Taruk, M. (2020). Measure distance locating nearest public facilities using Haversine and Euclidean Methods. *Journal of Physics: Conference Series*, *1450*, p. 012080, doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012080.

Ryser, E., Spichiger, H., & Jaquet-Chiffelle, D. O. (2024). Geotagging accuracy in smartphone photography. *Forensic Science International: Digital Investigation*, *50*, Supplement, doi:10.1016/j.fsidi.2024.301813.

DETERMINING THE EQUIVALENT SOIL RESISTANCE IN DOUBLE-LAYER STRUCTURES

Maya Zlateva, Kiril Dzhustrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: m.zlateva@mgu.bg, justrov@mgu.bg

ABSTRACT. When designing mine grounding devices, the problem of high soil resistivity often arises. The article discusses one of the approaches to solving the problem: by artificially creating a two-layer soil structure, reducing the natural resistivity. A well-known methodology for determining the actual resistivity is applied, and it is compared with an experimental study.

Key words: mine grounding devices, two-layer soil structure

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕКВИВАЛЕНТНОТО СПЕЦИФИЧНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ПОЧВАТА ПРИ ДВУСЛОЙНИ СТРУКТУРИ

Мая Златева, Кирил Джустров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. При проектирането на рудничните заземителните устройства често възниква проблема с високото специфично съпротивление на почвата. В статията е разгледан един от подходите за решението на проблема: чрез изкуствено създаване на двуслойна структура на почвата, намаляващ естественото специфично съпротивление. Приложена е известна методика за определяне на действителното специфично съпротивление, като е сравнена с експериментално изследване.

Ключови думи: руднични заземителните устройства, двуслойна почвена структура.

Въведение

Преходното електрическо съпротивление е един от ключовите експлоатационни параметри на заземителните устройства. То не трябва да надвишава допустимите стойности за конкретен тип съоръжение. При проектирането е от съществено значение правилно да се определи видът, конфигурацията и преходното съпротивление на заземителните устройства. Точността на изчисленията зависи от много фактори: надеждността на геоложките почвени проучвания, изборът на методи за изчисление, квалификацията на персонала и много други.

Неправилното изчисляване на заземителните устройства може значително да увеличи строителните разходи. Разходите за строителство обикновено се увеличават, когато се използват решения за намаляване на съпротивлението на заземителните устройства, като се увеличава количеството на заземителната верига.

Ако измереното съпротивление на устройството след монтажа е по-високо от допустимото, се предприемат мерки за намаляването му на място, което в резултат на това води до превишаване на бюджета.

В някои случаи възникват проблеми по време на проектирането на заземителните устройства поради почви, характеризиращи се с високо електрическо съпротивление: скалисти или замръзнали почви, песъчлива глинеста почва и др. При тези условия изчисленото съпротивление на основната конфигурация на заземяващата верига може да е по-високо от допустимата стойност.

Нормативните документи (НАРЕДБА № 3 от 9 юни 2004 г.) предписват редица технически мерки, насочени към намаляване на съпротивлението на заземителната система в такива почви. Този списък включва мерки като увеличаване площта на заземяващите електроди, изграждане на отдалечени или дълбоки заземителни уредби, засипване на траншеи, съдържащи хоризонтални заземители с глинеста почва, изкуствена обработка на грунта за намаляване на специфичното му съпротивление и др.

IEEE 80-2000 предоставя информация за третиране на зоната около електродите с минерални соли. Твърди се, че химическата обработка на почвата може да намали съпротивлението с 15 до 90% в зависимост от вида и текстурата на почвата. Химикалите обикновено се прилагат чрез поставянето им в сондаж или изкоп около електрода. Ефектът от обработката става забележим след определен период от време (период на стабилизация). Недостатъкът на този метод е, че ефектът на намаляване на съпротивлението е сравнително краткотраен, тъй като обработката на почвата трае приблизително 2-4 години. При тези методи заземяващият електрод се изработва от лентова, ъглова или кръгла поцинкована или неръждаема стомана.

Велев и Петров (2010) предлагат заземителите, поставяни в агресивни почви, да бъдат покрити с бетонни обмазки, за да се увеличи корозоустойчивостта им и да се удължи експлоатационният им срок.

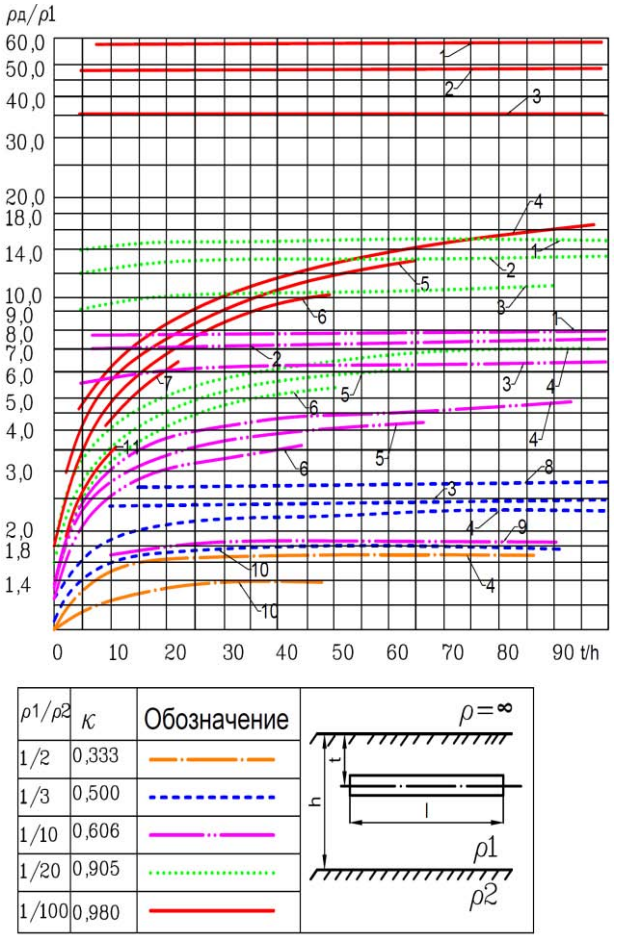
В изследване на Partaonan et al (2021) се дават резултати от добавяне на дървени въглища, получени от кокосови черупки за намаляване на специфичното съпротивление на почвата.

Методи за намаляване на съпротивлението на заземяващите електроди чрез подмяна на почвата в зоната около електродите за намаляване на електрическото ѝ съпротивление са отдавна известни. В този случай изчисленията трябва да се правят като за двуслойни почви.

Определяне на специфичното съпротивление на почвата

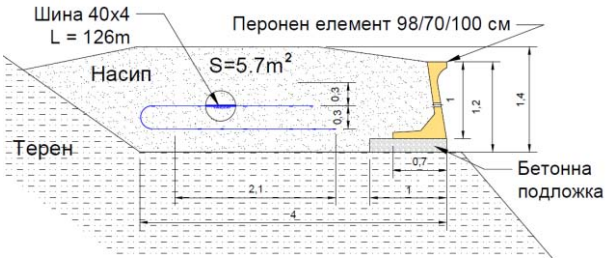
Ако на мястото на заземяване почвата има ясно изразена двуслойна структура, при изчисляване на преходното съпротивление на заземяването трябва да се използва ефективното специфично съпротивление на

почвата. Графики на стойностите на ефективното съпротивление на почвата за хоризонтални заземители са дадени в Руководство (1971) и са показани на фиг. 1 за различни стойности на ρ1/ρ2 и k = (ρ2 - ρ1)/(ρ1 + ρ2).



Фиг. 1. Графики на стойностите на ефективното специфично съпротивление на почвата за хоризонтални заземители при различни съотношения t/h и k > 0:
1 - t/h =2; 2 - t/h =1,5; 3 - t/h =1,1; 4 - t/h =1; 5 - t/h =0,8; 6 - t/h =0,4; 7 - t/h =0,2; 8 - t/h =1,5; 9 - t/h =1,1; 10 - t/h =0,4; 11 - t/h =0,05

Във връзка с подобряване на преходното съпротивление на откритата разпределителна уредба (ОРУ) на открит рудник за добив на руда е предвидено да бъде направено изнесено заземително огнище, което се допуска от Наредба 3 (2004). Новото заземително огнище ще бъде присъединено към съществуващата заземителна инсталация на ОРУ. Изнасянето на допълнителната заземителна инсталация се налага от спецификата на терена. Избран е съществуващ полски път с размери 150 m дължина и широчина около 3-4 m. Теренът е скалист и е измерено специфично съпротивление на почвата ρ2=3600 Ωm. Доставена е хумусна почва със специфично съпротивление ρ1=60 Ωm, като е положена върху съществуващата основа от скалиста почва. По време на работата по полагане на хумусната почва е изградена заземителна мрежа от поцинкована шина, както е дадено на фиг. 2.



Фиг. 2. Разрез на заземителната инсталация

За да бъде правилно изчислено преходното съпротивление на проектираната заземителна инсталация е необходимо да бъде определено действителното специфично съпротивление на двуслойната структура от почви, при следните условия: заземителят е хоризонтален, специфично съпротивление на горния слой ρ1=60 Ωm, специфично съпротивление на долния слой ρ2=3600 Ωm, дебелина на горния слой h = 1,4 m. За заземяване се използва метална шина с дължина 120 m, положена на дълбочина 0,8 m.

Определят се изходните съотношения:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{60}{3600} = \frac{1}{100}$$
$$\frac{l}{h} = \frac{120}{1{,}4} \approx 85$$
$$\frac{t}{h} = \frac{0{,}8}{1{,}4} \approx 0{,}6$$

Значението на ρ_1/ρ_2 = 1/100 ще съответства на плътна червена крива от фиг. 1, значението *t/h* = 0,6 ще съответства на крива между криви 5 и 6. При *l/h* = 85, определяме $\rho_д/\rho_1$ = 12.

Действителното преходно съпротивление $\rho_д$ ще бъде:

$$\rho_д = 12.\rho_1 = 12.60 = 720\ \Omega\text{m}$$

Това е твърде високо специфично съпротивление на почвата и ако се използва известният израз за определяне на единичен хоризонтален заземител (шина с размери 40/4 mm), ще се получи:

$$R_x = \frac{0.366.\rho_д}{l_x}.lg\frac{2.l_x^2}{b.t_x} = 13{,}08\ \Omega$$

В статия на Al-Shawesh et al. (2021) се разглеждат много от формулите за проектиране на заземяване, налични в широко използвани международни стандарти и публикувани научни статии, за сравнителен анализ на техните различия. Дадени са множество различни формули за изчисляване на съпротивлението на ефективни заземителни системи.

Заключение

На така изградената нова площадка с насипан хумусен слой експериментално е измерено специфичното съпротивление на двуслойната структура. Измерената стойност е 590 Ωm, което е 22% грешка. Такава грешка е очаквана при графично решаване на подобни задачи.

Видно е, че за да се получи нормираното преходно съпротивление на заземяване е необходимо при тези изходни условия (специфика на терена, площта на заземителната уредба, високото специфично съпротивление и т.н.) да бъдат свързани в паралел множество единични заземители от поцинкована шина 40/4mm. Това пък ще доведе до появата на екраниращ ефект между тях и заземителната инсталация ще има нисък коефициент на използване и за достигане на ниски стойности на преходното съпротивление е необходимо голям разход на метал.

Литература

Велев Г., Петров, П. (2010). Математическо моделиране и анализ на заземители с проводима бетонна обмазка, Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”, Том 53, Св.III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 137-140.

Наредба № 3 от 9 юни 2004 г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии

Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов, Издательство «связь» МОСКВА (1971)

Al-Shawesh Yousef, Siow Chun Lim, Mutaz Nujaim (2021). Analysis of the Design Calculations for Electrical Earthing Systems, *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 16, N. 2* ISSN 1827- 6660 March – April 2021, https://doi.org/10.15866/iree.v16i2.16839

IEEE 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.

Partaonan Harahap, Waleed Khalid Ahmed Al-Ani, (2021) The Effect of Charcoal on the Improvement of Grounding Resistance as a Soil Treatment in Reducing Grounding Resistance, Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering, 1 (1) (2021) 12-15 Vol. 1, No. 1, March 2021. 12-15 e-ISSN: 2776-0049, DOI: 10.29103/jreece.v1i1.3619

GEOMETRY OF A TWO-COMPONENT ROTATING MAGNETIC FIELD

Angel Zabchev, Romeo Alexandrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: angel.zabtchev@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents a mathematical model of a composite rotating magnetic field whose plane of rotation can be oriented in space. The field is induced by two rotating magnetic field inductors with mutually perpendicular planes of rotation.

Keywords: 3D rotating magnetic field, orthogonal inductors, gimbal suspension.

ГЕОМЕТРИЯ НА ДВУСЪСТАВНО ВЪРТЯЩО СЕ МАГНИТНО ПОЛЕ

Ангел Зъбчев, Ромео Александров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700

Резюме: Разглежда се математически модел на съставно въртящо се магнитно поле, чиято равнина на въртене може да се ориентира в пространството. Индуцира се от два индуктора на въртящи се магнитни полета, чиито равнини на въртене са взаимно перпендикулярни.

Ключови думи: въртящо се магнитно поле в тримерното пространство, ортогонални индуктори, карданно окачване.

Увод

Магнитните полета намират широко приложение в множество направления на човешката дейност. Те служат за безконтактно въздействие в системи с коренно различни мащаби. В Alsangur, R., et al. (2023) се разглежда проектирането на мехатронна система с 3D бобини на Хелмхолц за измерване на топлинната проводимост на магнитни нанофлуиди. Друго приложение се изследва в Chen, R. et al. (2022), където се сравняват електромагнитни системи за управление на медицински микроботи за минимално инвазивната хирургия. Също с медицински цели в Amokrane, W., et al. (2020) експериментално се изследва прототип на магнитен изпълнителен механизъм (актуатор) за навигация на магнитни микрочастици с оптимизирани характеристики. Разработката на Vyskocil J. et al. (2020) представя „ходещи“ микромашини, които се движат напречно в магнитно поле. Използват се, като микроботизирани скалпели. В работата на Barbot, A.et al. (2016) е представен спирален микроробот с три различни движения - търкаляне, въртене и плуване. Това позволява на задвижването да има триизмерна маневреност. Подобряване на производителността на медицински микроботи чрез електрическа оптимизация, базирана на нова подредба на магнитната навигационна система е предложена в Kim, S. et al. (2022). Постига се магнитно поле, което се характеризира с по-голяма сила и с по-малко ограничения в тримерното пространство. Иновативна система за тримерно (3D) управление на магнитни микроботи чрез стандартен набор от Хелмхолцови бобини е представена в Ramos-Sebastian, A. and Kim S.H. (2021). Третата двойка бобини се захранва от независим източник, така се постига ефективно транслационно и ротационно движение. Могат да се създават, както хомогенни магнитни полета, които са ориентирани в пространството, така и такива с градиент.

Друго направление за използване на магнитно поле, което е ориентирано в пространството, е в системите за безжичен пренос на енергия. Статията на Jayathurathnage, P. et al. (2019) представя всепосочна система за безжичен пренос на енергия, която е изградена от три ортогонални двойки предавател – ретранслатор и една приемаща бобина. Мощността се регулира автоматично в зависимост от взаимната индуктивност между приемника и двойката предавател–ретранслатор. Предложеният подход позволява на приемника да работи независимо от пространствената си ориентация с равномерна мощност и висока ефективност. В друго изследване за реализиране на всепосочен безжичен пренос на енергия е предложен триизмерен метод за модулация на въртящо се магнитно поле (Mo, Y. et al. 2022). Той се базира на управление чрез фазово изместване. Използва се само плосък приемник с една намотка. Предложеният метод не изисква да открива ориентацията на приемащата намотка.

Технологичното приложение в промишлени мащаби също се изследва. Силовото въздействие на въртящо се магнитно поле върху феромагнитни частици в индустриални реактори се анализира в Polshchikov, H. and Zhukov, P. (2023). Изведен е математически модел за оптимизация на процесите.

Теоретични и приложни въпроси за възбуждане на въртящи се магнитни полета и тяхното въздействие в работната среда за технологични цели се разглеждат в редица публикации на Kostov K., Trichkov, K. (2007a), (2007b) и Trichkov, K., Panov, V. (2008).

Под особено внимание попада работата на Kostov K., Trichkov, K. (2007b), където се предлага конструкция на вихрова машина със сферичен активен обем. Магнитното поле се върти последователно около трите координатни оси. Изчислен е скаларният магнитен потенциал. Резултатът е представен в ред от сферични хармоници за една фаза на индуктора..

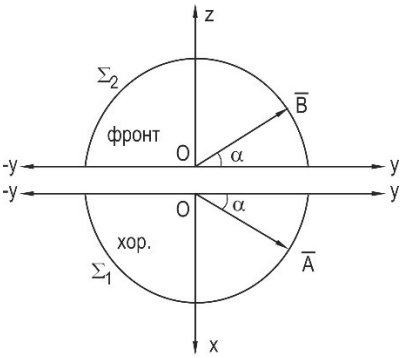
Тук се разглежда математически модел на съставно въртящо се магнитно поле, чиято равнина на въртене може да се завърта в пространството. Индуцира се от два индуктора на въртящи се магнитни полета, чиито равнини на въртене са взаимно перпендикулярни.

Описанието на съставното въртящо се магнитно поле е направено чрез аналитична геометрия на равнина в пространството (Привалов И. И. 1952).

Синфазни вектори $\overline{\mathbf{A}}$ и $\overline{\mathbf{B}}$

Два еднакви кръга с общ център в точка O са разположени: единия в хоризонталната равнина xOy, а другият – във фронталната равнина yOz.

Векторът $\overline{A}$ с начало в точка O и посока от ос y към ос x се върти с постоянна ъглова скорост ω в хоризонталния кръг (фиг. 1).



Фиг. 1. Векторите $\overline{A}$ и $\overline{B}$ в хоризонталната и фронтална равнини

Векторът $\overline{B}$ с начало в точка O и посока от ос y към ос z се върти с постоянна ъглова скорост ω във вертикалния кръг.

Приемаме, че двата вектора са еднакви с дължина 1 и в началния момент t=0 те се намират върху ос y. Искаме да определим как се движи в пространството резултантния вектор $\overline{C} = \overline{A} + \overline{B}$.

Позициите на $\overline{A}$ и $\overline{B}$ се определят от ъгъл $\alpha = \omega t$.

Векторната сума ще изразим чрез единичните вектори $\boldsymbol{i}$, $\mathbf{j}$ и $\mathbf{k}$, които са колинеарни, съответно на трите оси x, y и z и са с дължина 1.

$$\overline{A} = \boldsymbol{i}.\sin\alpha + \mathbf{j}.\cos\alpha + \mathbf{k}.0 \quad (1)$$

$$\overline{B} = \boldsymbol{i}.0 + \mathbf{j}.\cos\alpha + \mathbf{k}.\sin\alpha \quad (2)$$

$$\overline{C} = \boldsymbol{i}.\sin\alpha + \mathbf{j}.2\cos\alpha + \mathbf{k}.\sin\alpha \quad (3)$$

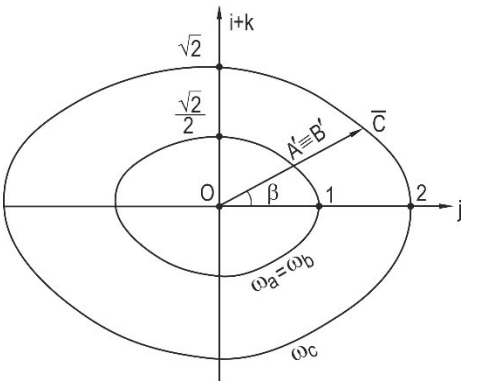
$$\overline{C} = (\boldsymbol{i} + \mathbf{k}).\sin\alpha + \mathbf{j}.2\cos\alpha \quad (4)$$

Векторът $(\boldsymbol{i} + \mathbf{k})$ лежи върху ъглополовящата на координатния ъгъл xOz. За всеки ъгъл α векторът $\overline{C}$ лежи в равнината π, построена върху ос y и ъглополовящата на $\sphericalangle$ xOz. Тази равнина е ъглополовяща на пространствения ъгъл между хоризонталната равнина и фронталната равнина.

Двете окръжности Σ_1 и Σ_2 се проектират върху равнината π като две еднакви, съвпадащи с общ център елипси $\omega a \equiv \omega b$.

Голямата полуос на двете елипси е 1, а малката е $\frac{\sqrt{2}}{2}$ (фиг. 2).

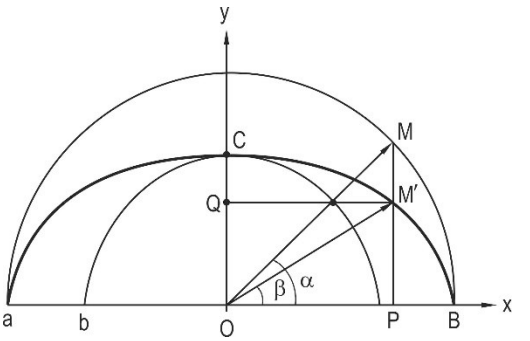
Резултатната елипса ω_c се получава чрез събиране на двата радиус вектора $\overline{OA'}$ и $\overline{OB'}$ за всяка стойност на $\sphericalangle\beta$. Тази операция всъщност е хомотетия с център точка O и коефициент 2. Елипсата ω_c е подобна на ω_a и ω_b, но е два пъти по-голяма.



Фиг. 2. Проекции на двете окръжности Σ_1 и Σ_2 в равнината π

Ъглова скорост на вектор $\overline{\mathbf{C}}$

На фиг. 3 е показано как се проектира окръжност от наклонена равнина в елипса върху хоризонтална равнина. Двете полуокръжности са с радиуси a и b, съответстващи на голямата и малката полуоси на елипсата.



Фиг. 3. Построяване на елипса $\left|\begin{array}{l}\mathbf{OQ} = .\mathbf{b}.\sin\alpha \\ \mathbf{OP} = \mathbf{a}.\cos\alpha\end{array}\right.$

Векторът $\overline{OM}$ се върти в голямата окръжност с ъглова скорост ω, така че $\alpha = \omega t$ и тази скорост е константа. Векторът $\overline{OM'}$ е радиус-вектор описващ елипсата. Ъгловата скорост на $\overline{OM'}$ е ω' и тя не е постоянна.

Връзката между ω' и ω се определя от чертежа на фиг. 3

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{PM'}{OP} = \frac{OQ}{OP} = \frac{b.\sin\alpha}{a.\cos\alpha} = \frac{b}{a}.\mathrm{tg}\alpha \quad (5)$$

Когато ъглите са малки се отнасят както тангенсите. При $\alpha \approx 0°$:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\mathrm{tg}\beta}{\mathrm{tg}\alpha} = \frac{b}{a} \quad (6)$$

$$\beta = \omega'.t \quad (7)$$

$$\alpha = \omega.t \quad (8)$$

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{b}{a} \quad (9)$$

$$\omega' = \frac{b}{a}.\omega \quad (10)$$

Последният израз означава, че ъгловата скорост на вектора $\overline{OM'}$ в близката околност на точка B е по-малка от ω тъй като $b < a$.

Когато ъглите са близки до 90°, тогава допълнителните ъгли, които са близки до нула се отнасят както тангенсите от тях. За $\alpha \approx 90°$ се получава (11) от което следва (12)

$$\frac{(90°-\beta)}{(90°-\alpha)} = \frac{\mathrm{tg}(90°-\beta)}{\mathrm{tg}(90°-\alpha)} = \frac{\mathrm{cotg}\,\beta}{\mathrm{cotg}\,\alpha} \quad (11)$$

$$\frac{\mathrm{cotg}\,\beta}{\mathrm{cotg}\,\alpha} = \frac{\mathrm{tg}\alpha}{\mathrm{tg}\beta} = \frac{a}{b} \quad (12)$$

От тази позиция малко преди ос y двата вектора $\overline{OM}$ и $\overline{OM'}$ достигат до ос y едновременно за време Δt.

$$(90° - \beta) = \omega'.\Delta t \quad (13)$$

$$(90° - \alpha) = \omega.\Delta t \quad (14)$$

$$\frac{(90°-\beta)}{(90°-\alpha)} = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{a}{b} \quad (15)$$

$$\omega' = \frac{a}{b}.\omega \quad (16)$$

В областта на точка C ъгловата скорост на вектора $\overline{OM'}$ е по-голяма от ω.

Дефазирани вектори $\overline{A}$ и $\overline{B}$

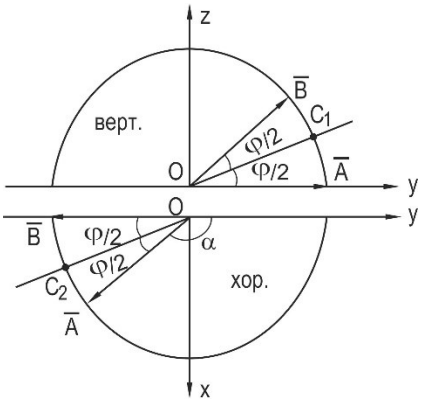
Векторът $\overline{A}$ се върти в хоризонталната равнина xOy в посока от ос y към ос x. В момента $t_O = 0$ той лежи върху ос y.

$$\overline{A} = 1.\sin\omega t \qquad \omega t = \alpha \quad (17)$$

Векторът $\overline{B}$ се върти във фронталната равнина y0z в посока от ос y към ос z. В момента $t_O = 0$ той е дефазиран от $\overline{A}$ на ъгъл φ.

$$\overline{B} = 1.\sin(\omega t + \varphi) \quad (18)$$

Върху ъглополовящата на ъгъл φ лежи вектора $\overline{C} = \overline{A} + \overline{B}$.



Фиг. 4. Определяне линията на пресичане на равнината π с хоризонталната и вертикалната равнини

Ъглополовящата пресича единичната окръжност в точка C_1.

След определено време t_1, векторът $\overline{B}$ лежи върху ос –y, а $\overline{A}$ е на ъгъл φ от него. Ъглополовящата на този ъгъл пресича окръжността в точка C_2 (фиг. 4).

Така в момента t_O векторът $\overline{C}$ е колинеарен на OC_1, а в момента t_1 $\overline{C}$ е колинеарен на OC_2.

Търсим уравнението на равнината π, в която лежи $\overline{C}$ в двете позиции (t_O и t_1).

Тази равнина минава през три точки със съответните координати:

O (0,0,0); C_1 (0, $\cos\frac{\varphi}{2}, \sin\frac{\varphi}{2}$); $C_2\left(\sin\frac{\varphi}{2}, -\cos\frac{\varphi}{2}, 0\right)$

Равнината π се определя чрез три уравнения:

$$\left|\begin{array}{l} A.x + B.y + C.z = 0 \\ A.0 + B.\cos\frac{\varphi}{2} + C.\sin\frac{\varphi}{2} = 0 \\ A.\sin\frac{\varphi}{2} - B.\cos\frac{\varphi}{2} + C.0 = 0 \end{array}\right. \quad (19)$$

Разделяме трите уравнения (19) на C:

$$\left|\begin{array}{l} \frac{A}{C}.x + \frac{B}{C}.y + z = 0 \\ \frac{B}{C}.\cos\frac{\varphi}{2} + \sin\frac{\varphi}{2} = 0 \\ \frac{A}{C}.\sin\frac{\varphi}{2} - \frac{B}{C}.\cos\frac{\varphi}{2} = 0 \end{array}\right. \quad (20)$$

Неизвестните в (20) са две $\frac{A}{C}$ и $\frac{B}{C}$.

От второто уравнение на (20) определяме $\frac{B}{C}$ и го заместваме в третото.

$$\frac{B}{C} = -\frac{\sin\varphi/2}{\cos\varphi/2} \quad (21)$$

$$\frac{A}{C}.\sin\frac{\varphi}{2} + \sin\frac{\varphi}{2} = 0 \quad (22)$$

$\frac{A}{C} = -1$, а $\frac{B}{C} = -\mathrm{tg}\varphi/2$.

Заместваме тези стойности в първото уравнение от системата (20) и получаваме:

$$-x - \mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}.y + z = 0 \quad (23)$$

Което е уравнението на равнината π в която се върти векторът $\overline{C}$. В тази равнина лежи въртящият се вектор $\overline{C}$ в двата момента t_O и t_1.

Съответно: $t_O \to \alpha = 0$; $t_1 \to \alpha = (180° - \varphi)$.

Доказването на общия случай се прави, чрез вектор $\overline{C}$, който лежи в равнината π за произволна стойност на ъгъл $\alpha = \omega t$.

Събираме проекциите на $\overline{A}$ и $\overline{B}$ върху трите оси x, y и z.

$\overline{A}\,\{\sin\alpha, \cos\alpha, 0\}$; $\overline{B}\,\{0, \cos(\alpha+\varphi), \sin(\alpha+\varphi)\}$

$$\overline{C} = \boldsymbol{i}.x + \mathbf{j}.y + \mathbf{k}.z = \quad (24)$$
$$= \boldsymbol{i}.\sin\alpha + \mathbf{j}.[\cos\alpha + \cos(\alpha+\varphi)] + \mathbf{k}.\sin(\alpha+\varphi)$$

Заместваме x, y и z в израза (23) и получаваме (25):

$$[\sin(\alpha+\varphi)-\sin\alpha]-\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}[\cos(\alpha+\varphi)+\cos\alpha]=$$
$$=\left[2\cos\frac{2\alpha+\varphi}{2}\sin\frac{\varphi}{2}\right]-$$
$$-\frac{\sin\varphi/2}{\cos\varphi/2}\left[2\cos\frac{2\alpha+\varphi}{2}\cos\frac{\varphi}{2}\right]=$$
$$=2\cos\frac{2\alpha+\varphi}{2}\sin\frac{\varphi}{2}-2\cos\frac{2\alpha+\varphi}{2}\sin\frac{\varphi}{2}=0 \qquad (25)$$

Този резултат показва, че векторът $\overline{C}$ се върти в равнината π и описва затворена равнинна крива. Тази крива е елипса, която се получава чрез сумиране на две еднакви по-малки елипси с общ център завъртени на ъгъл δ. Големите полуоси на двете елипси са равни на единица, а малките на $\cos\beta$, където β е ъгълът между равнината π и хоризонталната равнина.

За ъглите δ и β са валидни изразите (26) и (27)

$$\cos\beta=\frac{1}{\sqrt{\mathrm{tg}\varphi/2}} \qquad (26)$$

$$\cos\delta=-\cos^2\varphi/2. \qquad (27)$$

Ос на въртене на ротора

Посоката на оста на ротора се определя от равнината на въртящото се магнитно поле. За целта роторът трябва да има свободно карданно окачване, така че оста да може да заеме определената от равнината посока, а именно права перпендикулярна на равнината.

При липса на дефазиране (φ = 0) оста е в основна позиция - ъглополовящата на ъгъл - xOz.

Тъй като искаме тази позиция да съвпада с координатната ос Z завъртаме координатната система xyz около ос y на 45° в посока от ос x към ос z. Новата координатна система означаваме с главни букви XYZ.

При тази ротация ос y запазва положението си y=Y, а другите две оси се изразяват така:

$$x=X.\cos 45°-Z.\sin 45° \qquad (28)$$

$$z=X.\sin 45°+Z.\cos 45° \qquad (29)$$

или $x=\frac{X-Z}{\sqrt{2}}$, $\quad z=\frac{X+Z}{\sqrt{2}}$

Заместваме тези стойности уравнението на равнината π (23) и получаваме уравнението (24) на равнината π в новата координатна система.

$$-\sqrt{2}.\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}.Y+2Z=0 \qquad (30)$$

Нормалата на равнина $A.X+B.Y+C.Z=0$ се определя чрез направляващите косинуси (проекциите на нормалата върху координатните оси).

$$\cos\alpha=\frac{A}{M} \qquad (31)$$

$$\cos\beta=\frac{B}{M} \qquad (32)$$

$$\cos\gamma=\frac{C}{M} \qquad (33)$$

$$M=\sqrt{A^2+B^2+C^2} \qquad (34)$$

В нашия случай:

$$\left|\begin{array}{l} A=0 \\ B=-\sqrt{2}.\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2} \\ C=2 \end{array}\right. \qquad (35)$$

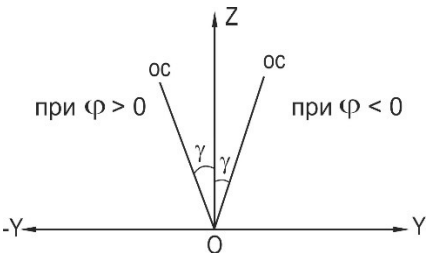
$$M=\sqrt{2}.\sqrt{\mathrm{tg}^2\frac{\varphi}{2}+2} \qquad (36)$$

Така проекциите по X, Y и Z са съответно (37, (38) и (39):

$$\cos\alpha=0 \qquad (37)$$

$$\cos\beta=-\frac{tg\varphi/2}{\sqrt{tg^2\varphi/2+2}} \qquad (38)$$

$$\cos\gamma=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\mathrm{tg}^2\varphi/2+2}} \qquad (39)$$



Фиг. 5. Ос на ротора в равнината YOZ

След като $\cos\alpha=0$ и проекцията на оста е нула, тя ще лежи в координатната равнина YOZ (фиг.5).

Ъгълът между оста на ротора и ос Z е γ. Този ъгъл се определя при зададено дефазиране φ чрез израза:

$$\cos\gamma=\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\mathrm{tg}^2\frac{\varphi}{2}+2}} \qquad (40)$$

При $\varphi<0$ оста на ротора е в квадранта YZ.

При $\varphi>0$ (фиг.4)оста на ротора е в квадранта – YZ.

Като задаваме стойности на ъгъла на дефазиране φ между $\overline{A}$ и $\overline{B}$ чрез горния израз определяме $\cos\gamma$ и ъгъл γ между оста Z и оста на ротора – табл. 1.

Таблица 1. *Връзка между ъгъл φ и γ*

φ	$\cos\gamma$	γ
10°	0,998	3,62°
20°	0,992	7,25°
30°	0,983	10,58°
40°	0,968	14,34°
50°	0,950	18,19°
60°	0,926	22,18°

Като задаваме стойности на ъгъла на отклонение на оста на ротора от ос Z→ γ определяме $\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2}$ и ъгъл φ чрез израза:

$$tg\frac{\varphi}{2} = \sqrt{\frac{2}{\cos^2\gamma} - 2} \quad (41)$$

Резултатите са в табл.2.

Таблица 2. *Определяне на ъгъл φ при зададен ъгъл γ*

γ	$tg\frac{\varphi}{2}$	φ
5°	0,124	14,1°
10°	0,249	27,9°
15°	0,379	41,5°
20°	0,515	54,5°
25°	0,659	66,8°
30°	0,816	78,4°

Заключение

За разлика от машините с цилиндричен активен обем, където силовото въздействие се осъществява чрез поле, въртящо се около неподвижната надлъжна ос, описаният тук възбудител е съставен от два индуктора, всеки от които създава въртящо се магнитно поле, като двете равнини на въртене са взаимно перпендикулярни. Резултантното магнитно поле представлява въртящ се вектор на магнитна индукция в равнината π. Ориентацията на тази равнина в пространството се задава чрез ъгъла на дефазиране между токовете в двата индуктора φ. Тъй като ротора има карданно окачване оста му се ориентира, така че да е колинеарна на нормалата на равнината π. Ъгълът, който оста на ротора сключва с ос Z е γ. Намерена е права и обратна зависимост между φ и γ.

Литература

Alsangur, R., Doganay, S., Ates, I., Turgut, A., Cetin, L. (2023). 3D Helmholtz coil system setup for thermal conductivity measurements of magnetic nanofluids. Mechatronics 94 (2023) 103019, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2023.103019

Amokrane W, Belharet K, Ferreira A. (2020). Design and modeling of a two-magnet actuator for robotic micromanipulation. Sensors and Actuators A Phys 2020;316:14. 112391, DOI: 10.1016/j.sna.2020.112391

Barbot, A., Decanini, D., Hwang, G. (2016). On-chip microfluidic multimodal swimmer toward 3D navigation. Scientific Reports, 6, 19041, DOI: 10.1038/srep19041.

Chen, R., Folio, D., Ferreira, A. (2022) Analysis and Comparison of Electromagnetic Microrobotic Platforms for Biomedical Applications. Appl. Sci. 2022, 12, 456. https://doi.org/10.3390/app12010456

Jayathurathnage, P., Dang, X., Liu, F., Simovski, C., & Tretyakov, S. A. (2019). Omnidirectional Wireless Power Transfer with Automatic Power Flow Control. arXiv. DOI:10.48550/arXiv.1909.10175

Kim, S.; Cho, M.; Im, S.; Yun, J.; Nam, J. (2022). Electrical Optimization Method Based on a Novel Arrangement of the Magnetic Navigation System with Gradient and Uniform Saddle Coils. Sensors 2022, 22, 5603. https://doi.org/10.3390/s22155603

Kostov K., Trichkov, K. (2007a). Magnetic field of vortex machine with spherical stator. Annual of the university of mining and geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 50, Part III, Mechanization, electrification and automation in mines, pp. 159–162, (in Bulgarian).

Kostov K., Trichkov, K. (2007b). Scalar magnetic potential produced by a phase coil of spherical stator. Annual of the university of mining and geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 50, Part III, Mechanization, electrification and automation in mines, pp. 163–166, (in Bulgarian).

Mo, Y., Feng, T., Xiao J., Wang, Z., X. Wu, X., and Y. Sun, Y. (2022). A 3-D Rotating Magnetic Field Modulation Method for Omnidirectional Wireless Power Transfer Systems. IEEE 9th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, 2022, pp. 1-6, DOI:10.1109/PESA55501.2022.10038336.

Polshchikov, H., Zhukov, P. (2023). Force effect of a circular rotating magnetic field of a cylindrical electric inductor on a ferromagnetic particle in process reactors. Technology Audit and Production Reserves, 6 (1 (74)), 34–40. DOI:10.15587/2706-5448.2023.293005

Ramos-Sebastian, A., Kim S.H., (2021). Magnetic Force-Propelled 3D Locomotion Control for Magnetic Microrobots via Simple Modified Three-Axis Helmholtz Coil System. IEEE Access 2021; 9:128755–64. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3113765

Trichkov, K., Panov, V. (2008). Magnetic field configuration of vortex machine with no secondary medium present. Annual of the university of mining and geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 51, Part III, Mechanization, electrification and automation in mines, pp. 87–89, (in Bulgarian).

Vyskocil, J., Mayorga-Martinez, C., Jablonska, E., Novotny, F., Ruml, T., Pumera M., (2020). Cancer Cells Microsurgery via Asymmetric Bent Surface Au/Ag/Ni Microrobotic Scalpels Through a Transversal Rotating Magnetic Field.ACS Nano. 2020,14(7):8247-8256. Epub 2020 Jun 16. DOI:10.1021/acsnano.0c01705.

Привалов И. И. (1952). Аналитическая геометрия, Москва.

REVIEW OF BENDING AND TORSIONAL VIBRATIONS IN SHAFTS AND ROTOR SYSTEMS

Malina Ivanova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: malina_vatz@abv.bg

ABSTRACT. The present paper provides a comprehensive review of analytical, numerical, and experimental approaches for investigating bending and torsional vibrations in shafts and rotor systems. Special attention is paid to systems with complex geometry, including stepped shafts and transitional curved segments, as well as multilayer mechanical structures subjected to dynamic loading. The study synthesises results from analytical mechanics, energy-based methods, iterative computational approaches, and experimental strain-gauge measurements. Classical and modern approaches for vibration analysis are discussed, including Rayleigh-based approximations, fixed-point iteration techniques, and coupled dynamic models for torsional and bending motion. Particular attention is paid to the influence of geometric features on natural vibration frequencies and the stress–strain state of shaft systems. Experimental validation of combined bending and torsion is also considered, confirming the reliability of theoretical predictions. The review demonstrates that accurate prediction of dynamic behaviour in rotor systems requires integration of analytical modelling, numerical methods, and experimental verification. The discussed methodologies provide a unified framework for improving the design and reliability of rotating mechanical systems under complex loading conditions.

Key words: shafts; torsion; bending; rotor systems; vibrations.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОГЪВАЩИ И УСУКВАЩИ ТРЕПТЕНИЯ ПРИ ВАЛОВЕ И РОТОРНИ СИСТЕМИ

Малина Иванова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата статия представя цялостен обзор на аналитичните, числените и експерименталните подходи за изследване на огъващите и усукващите трептения във валове и роторни системи. Специално внимание е отделено на системи със сложна геометрия, включително валове със стъпаловидна форма и преходни криволинейни участъци, както и на многослойни механични конструкции, подложени на динамично натоварване. Изследването синтезира резултати от аналитичната механика, енергийните методи, итеративните изчислителни подходи и експерименталните тензометрични измервания. Разгледани са класически и съвременни методи за анализ на трептенията, включително апроксимации, базирани на метода на Рейли, техники за итерация с фиксирана точка и свързани динамични модели за усукващо и огъващо движение. Особено внимание е обърнато на влиянието на геометричните характеристики върху собствените честоти на трептене и напрегнато-деформационно състояние на валовите системи. Разгледана е и експерименталната проверка на комбинираното огъване и усукване, потвърждаваща надеждността на теоретичните прогнози. Обзорът показва, че точното прогнозиране на динамичното поведение на роторните системи изисква интегриране на аналитично моделиране, числени методи и експериментална проверка. Обсъжданите методологии осигуряват единна рамка за подобряване на проектирането и надеждността на въртящи се механични системи при сложни условия на натоварване.

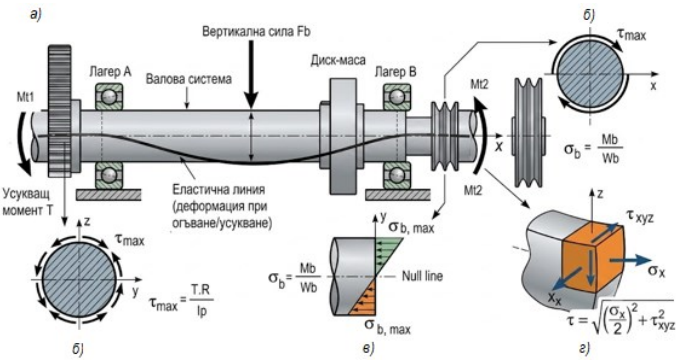
Ключови думи: валове; усукване; огъване; роторни системи; трептения.

Въведение

Динамичното поведение на валове и роторни системи представлява основен проблем в съвременното машиностроене и минната механика. Много често огъващите и усукващите трептения се проявяват едновременно. Тяхното взаимодействие води до сложни динамични ефекти, включително резонансни явления и повишени напрежения, които определят надеждността и експлоатационния живот на механичните системи. Теоретичните основи на вибрационния анализ и резонансните явления при механичните системи са подробно разработени в класическите трудове по механични трептения и продължават да бъдат фундамент за съвременните инженерни изследвания (Timoshenko et al., 1974; Den Hartog, 1985).

В редица изследвания се подчертава значението на аналитичните модели за оценка на собствените честоти и напрегнатото състояние на валови системи. Например, при тежко динамично натоварени валове (в транспортните и минните машини) е установено значително влияние на геометричните и масово-инерционните параметри върху вибрационния отговор на системата (Тонкова, 2018). Подобни резултати подчертават необходимостта от интегрирани подходи за анализ. Други изследвания показват, че геометричните особености на валовете, включително преходни зони и стъпаловидни участъци влияят съществено върху динамичните характеристики на системата (Trifonova-Genova and Tonkova, 2017). Подобни зависимости са ключови при проектиране на роторни системи с повишени изисквания за точност и устойчивост.

На фиг. 1 е представено схематично взаимодействието между огъващите и усукващите натоварвания.



Фиг. 1. Схематично представяне на валова система, подложена на едновременно огъване и усукване: (а) система вал-маса; (б) напрежения от усукване; (в) напрежения от огъване; (г) комбинирано напрегнато състояние

Класическите зависимости от теорията на еластичността запазват своята валидност с инженерна точност и при комбинирано натоварване на огъване и усукване. Това се потвърждава от експериментални изследвания, при които разминаванията между теория и практика са строго ограничени (Tonkova, 2025).

Цел на изследването:

Настоящият обзор има за цел да систематизира съвременните аналитични, числени и експериментални методи за анализ на огъващи и усукващи трептения, като акцентира върху тяхното практическо приложение в реални инженерни конструкции.

Аналитични и енергийни методи за вибрационен анализ

За определяне на собствените честоти на валови системи традиционно се прилагат аналитични подходи, базирани на енергийни методи и приближени вариационни изчисления. Сред тях методът на Рейли се доказва като ефективен инструмент при анализ на обекти със сложна геометрия и нееднородни свойства (Trifonova-Genova and Tonkova, 2017).

Енергийните методи, базирани на съотношението между кинетичната и потенциалната енергия, остават сред най-широко използваните инженерни подходи за оценка на собствените честоти на механични системи със сложна геометрия (Timoshenko et al., 1974).

Допълнително развитие на аналитичните подходи се наблюдава при модели с преходни зони и стъпаловидна геометрия, при които се отчита влиянието на локалните изменения на коравината и масата върху динамичния отговор на системата (Tonkova and Trifonova-Genova, 2018). Такива модели позволяват по-точно определяне на честотите на собствените трептения при реални инженерни конструкции.

Като алтернатива се въвеждат и итерационни методи с фиксирана точка, които позволяват определяне на принудени трептения без директно решаване на диференциалните уравнения на движението. Първоначалната верификация на метода е извършена при едномасова система и показва добра сходимост в надрезонансната област (Stefanov and Tonkova, 2014a). В последващи изследвания подходът е разширен за определяне на принудени усукващи и огъващи трептения на валови системи, моделирани чрез крайни елементи, което потвърждава приложимостта му при по-сложни механични конструкции (Stefanov and Tonkova, 2014b). Това разширява възможностите за анализ на по-сложни механични системи с множество степени на свобода.

Развитието на съвременните изчислителни методи позволява успешно комбиниране на аналитичните модели с дискретни числени подходи за анализ на системи с множество степени на свобода и сложни гранични условия (Lalanne & Ferraris, 1998).

Основните аналитични методи, използвани при вибрационния анализ са обобщени в (таблица 1).

Таблица 1. *Сравнение на основните подходи за вибрационен анализ*

Метод	Основни предимства	Ограничения
Метод на Рейли	Бърза оценка на собствени-те честоти	Приближена точност на резултатите
Итерации с фиксирана точка	Подходящ за решаване на нелинейни задачи	Зависимост на сходимостта от началното приближение
Числено моделиране (МКЕ)	Висока точност и възможност за анализ на сложни системи	По-голяма изчислителна сложност и зависимост от качеството на модела
Експериментални методи	Осигуряват реална оценка на динамичното поведение	Необходимост от специализирана апаратура и експериментална постановка

От таблица 1 се вижда, че колкото по-висока е търсената точност, толкова по-голяма е необходимостта от изчислителни ресурси. Освен това не всички методи са универсални по отношение на поведението на системата. Например итерациите с фиксирана точка са подходящи за решаване на нелинейни задачи, където стандартните линейни подходи не са ефективни и биха отчели грешни резултати. В инженерната практика се използва най-често комбинирания подход, който завършва с експериментално изследване за потвърждаване на получените теоретични данни.

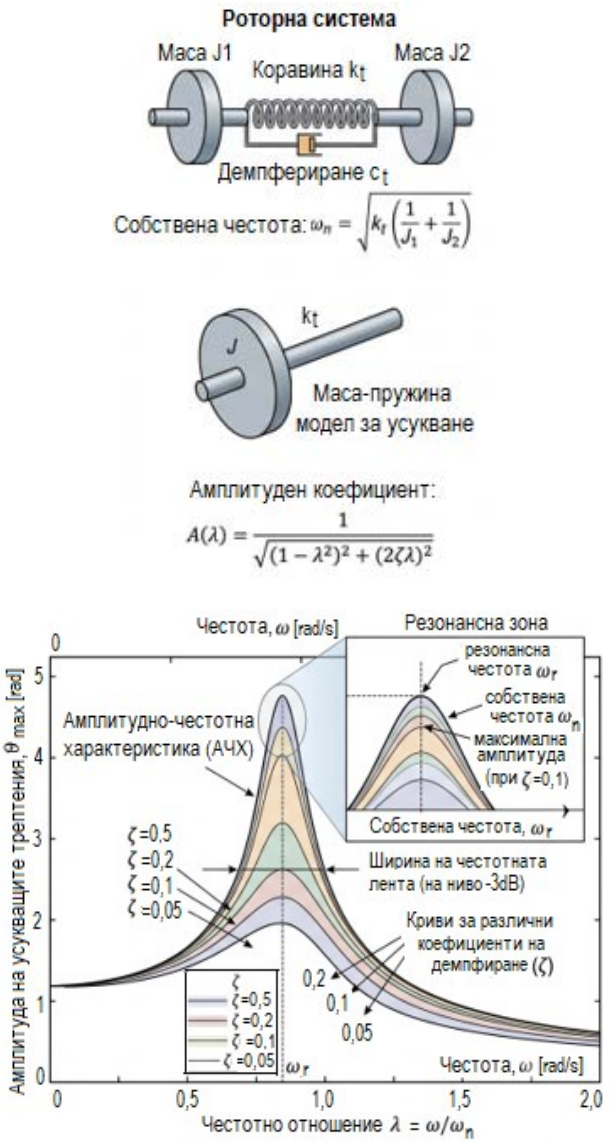
Динамика на усукващи трептения в роторни системи

Усукващите трептения са критичен фактор при работа на роторни системи, особено при наличие на хармонични смущения и инерционни ефекти. Анализът на системи с въртящи се маси показва, че оптимизацията на параметрите на системата може да доведе до значително намаляване на еластичния усукващ момент (Tonkova and Pulev, 2021).

При роторните системи усукващите трептения са тясно свързани с инерционните характеристики на въртящите се елементи и взаимното влияние между отделните маси в системата, което е един от основните обекти на съвременната роторна динамика (Eshleman, 1999; Genta, 2005).

Моделирането на динамично натоварени валове показва, че честотните характеристики са силно зависими от масово-инерционните параметри и конфигурацията на системата, като критичните зони са свързани с концентрации на напрежения (Тонкова, 2018). В резонансни режими се наблюдава значително увеличение на амплитудите, което изисква прецизно проектиране на конструктивните параметри.

На фиг. 2 е представена амплитудно-честотната характеристика на двумасова роторна система с демпфиране.



Фиг. 2. Амплитудно-честотна характеристика на роторна система при усукващи трептения

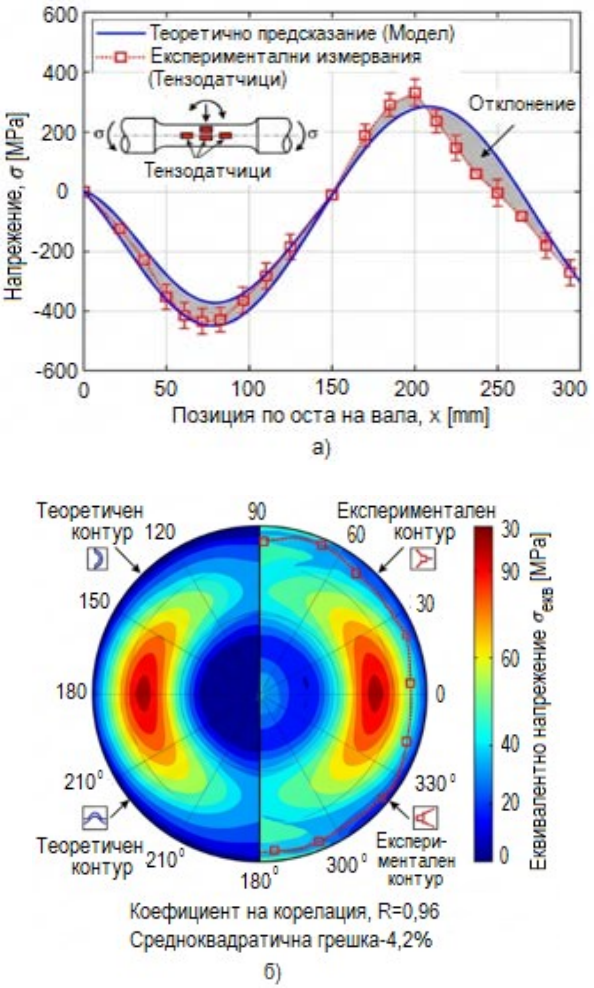
Подобно поведение се наблюдава и при сложните роторни системи, при които съвместното действие на динамичните и инерционните моменти предизвиква сериозни напрежения в елементите на ротора. Конкретно при центробежните сачмени съединители е установено, че общият момент върху лопатките зависи едновременно от динамичното ускорение и инерционното натоварване, което води до появата на големи огъващи напрежения (Тасев и Тасев, 2013).

Огъващи трептения и комбинирани натоварвания

Комбинираното действие на огъващи и усукващи трептения води до сложно напрегнато-деформационно състояние, което не може да бъде описано чрез отделни линейни модели. Проведените експерименти чрез тензометрични измервания потвърждават високата степен на съответствие между теоретично изчислените и реално отчетените стойности на главните напрежения (Tonkova, 2025).

Комбинираното действие на огъване и усукване е сред най-често срещаните причини за възникване на повишени напрежения и повреди от умора в машинните елементи, поради което неговото коректно моделиране има съществено практическо значение (Den Hartog, 1985).

На фиг. 3 е показана съпоставка между теоретичните и експерименталните резултати, както и оценка на съответствието между модела и измерванията.



Фиг. 3. Сравнение между теоретични и експериментално измерени напрежения при комбинирано действие на огъване и усукване: а) Съпоставка между теоретично предсказани и експериментално измерени напрежения по дължината на вала при комбинирано огъващо и усукващо натоварване; б) Съпоставка между теоретични и експериментални резултати

Допълнително, численото моделиране на динамично натоварени валове потвърждава, че конфигурацията на масите и режимът на работа са определящи фактори за разпределението на напреженията и деформациите в конструкцията (Тонкова, 2018).

В инженерната практика подобни комбинирани натоварвания са характерни за ротационни механизми с хидравлично или кинематично задвижване. Типичен пример са хидравличните системи за разтоварване на самосвали, където върху цилиндрите действат значителни силови

натоварвания, налагащи детайлно и прецизно оразмеряване на изпълнителните органи (Тасев, 2024).

Влияние на геометрични и кинематични особености

Конструктивните изменения в геометрията, като преходни участъци и стъпаловидни преходи, оказват съществено влияние върху динамичните характеристики на валовете. Аналитичните изследвания показват, че тези зони променят локалната коравина и водят до изменение на собствените честоти (Trifonova-Genova and Tonkova, 2017).

Аналогични зависимости са установени и при изследванията на роторни системи, при които локалните изменения на геометрията оказват пряко влияние върху разпределението на коравината и честотния спектър на конструкцията (Lalanne and Ferraris, 1998; Genta, 2005).

Прилагането на разширени модели, базирани на дискретизация на системата на отделни сегменти, позволява по-точно определяне на динамичния отговор на обекти със сложна геометрия и нееднородно разпределение на масата (Tonkova and Trifonova-Genova, 2018).

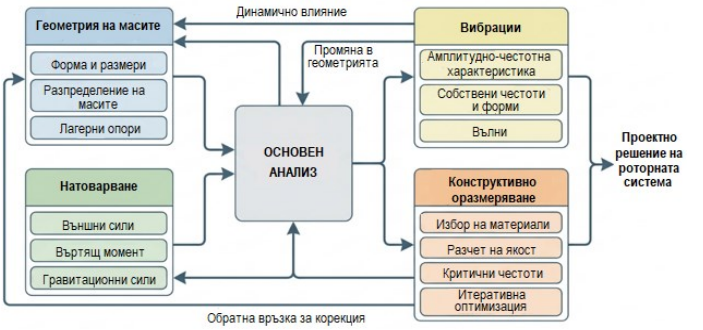
Аналогични принципи на моделиране се използват и при проектирането на кормилни системи на съчленени транспортни средства. В този случай кинематичният анализ служи като база за определяне на необходимите сили в задвижващите хидравлични цилиндри и прецизния избор на съответните помпени агрегати (Тасев, 2023).

Инженерни механизми и роторни системи

Съвременните инженерни системи често комбинират роторни, хидравлични и механични подсистеми, в които динамичните натоварвания играят определяща роля. В подобни системи взаимодействието между геометричните параметри, масово-инерционните характеристики и експлоатационните натоварвания е определящо за динамичното поведение и експлоатационната надеждност на конструкцията (Lalanne and Ferraris, 1998; Eshleman, 1999). По-конкретно, при изследването на центробежни съединители е установено, че напреженията в лопатките зависят от баланса между статични и динамични моменти, съчетано с инерционните параметри на системата (Тасев и Тасев, 2013). Тези анализи доказват необходимостта от комплексен подход при проектирането, който успешно съвместява аналитичните модели на трептенията с практическите инженерни методи за конструктивно оразмеряване на реални механизми.

На фиг. 4 е представена обобщената взаимовръзка между геометрията, натоварването и динамичния отговор на системата.

Фигура 4 показва, че динамичното поведение на роторните системи се определя от комплексното взаимодействие между геометричните параметри, външните натоварвания и инерционните характеристики на конструкцията. Това взаимодействие налага използването на различни аналитични и инженерни подходи в зависимост от конкретното приложение.



Фиг. 4. Обобщена схема на взаимовръзката между геометрия, натоварване, вибрации и конструктивно оразмеряване в роторни системи

Приложението на разгледаните методи в инженерната практика е обобщено в (таблица 2).

Таблица 2. *Приложение на методите за динамичен анализ в инженерни системи*

Инженерна система	Основен обект на анализ
Валови системи	Собствени честоти и форми на трептене
Роторни системи	Огъващи и усукващи трептения
Хидравлични системи на самосвали	Силови натоварвания и конструктивно оразмеряване
Съчленени транспортни машини	Кинематични зависимости и силови параметри на управлението
Центробежни съединители	Динамични напрежения и инерционни ефекти

Данните в таблица 2 показват, че независимо от различията между отделните инженерни системи, основните принципи на вибрационния анализ остават приложими при широк спектър от роторни и хидромеханични конструкции.

Заключение

Настоящият обзор показва, че изследването на огъващи и усукващи трептения при валове и роторни системи изисква прилагането на интегриран подход, който включва аналитични, числени и експериментални методи. Фактори като геометрични особености, масово-инерционни параметри и комбинирани силови въздействия имат определящо значение за цялостното динамично поведение на конструкциите.

Разгледаните инженерни приложения в областта на хидравличните и роторните механизми доказват универсалния характер на динамичния анализ и неговия потенциал за оптимизиране на конструктивните решения. Бъдещите изследвания следва да бъдат насочени към разработване на хибридни модели, които успешно да балансират между прецизността на теоретичните изчисления и практическото инженерно приложение.

Литература

Den Hartog, J. P. (1985). *Mechanical Vibrations* (4th ed.). Dover Publications, New York.

Eshleman, R. L. (1999). *Basic Machinery Vibrations: An Introduction to Machine Testing, Analysis and Monitoring.* VI Press, Clarendon Hills.

Genta, G. (2005). *Dynamics of Rotating Systems.* Springer, New York.

Lalanne, M., & Ferraris, G. (1998). *Rotordynamics Prediction in Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Chichester.

Stefanov, S., & Tonkova, G. (2014a). The Method of Fixed-Point Iterations for Determination of Forced Vibrations in the Simplest Case and Ensuring the Convergence in the Above-Resonance Regime. *Mechanics of Machines, 105, 48-51.*

Stefanov, S., & Tonkova, G. (2014b). An Example for the Determination of Forced Torsional and Bending Vibrations of a Shaft by Means of the Fixed-Point Iterations Method. *Mechanics of Machines, 105, 52-55.*

Timoshenko, S. P., Young, D. H., & Weaver, W. (1974). *Vibration Problems in Engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons, New York.

Tonkova, G. (2025). Experimental Determination of the Principal Stresses at a Point of a Beam Loaded Simultaneously in Bending and Torsion. *Proceedings of the Technical University of Sofia, 76(1).* https://doi.org/10.47978/TUS.2025.76.01.033

Tonkova, G., & Pulev, S. (2021). Reducing the Elastic Torsional Moment of a Vibrating Shaft. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 64, 165-167.*

Tonkova, G., & Trifonova-Genova, V. (2018). Determining the Natural Frequency on a Stepped Shaft with a Transitional Curved Section. *Journal of Mining and Geological Sciences,* 61(III), 60-63.

Trifonova-Genova, V., & Tonkova, G. (2017). An Approach for Determining the Natural Frequency of a Stepped Shaft. *Proceedings of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”,* 60(III), 39-43.

Тасев, В., & Тасев, Л. (2013). Напрежения в ротора на центробежните сачмени съединители с водещ шестлопатен ротор. *Годишник на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 56(III), 7-11.*

Тасев, Л. (2023). Методика за оразмеряване на кормилното управление на съчленени пневмоколесни транспортни средства. *Годишник на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 66, 280-283. https://doi.org/10.5281/zenodo.8339084*

Тасев, Л. (2024). Методика за оразмеряване на хидравличната система за разтоварване на коша на нископлатформени самосвали. *Годишник на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ , 67, 236-239. https://doi.org/10.5281/zenodo.13762851*

Тонкова, Г. (2018). Изследване на якостно-деформационното състояние на динамично натоварен вал. *Индустриални технологии,* 5(1), 70-77.

FROM RAW ENVIRONMENTAL DATA TO RELIABLE MACHINE LEARNING MODELS: A DATA QUALITY-DRIVEN FRAMEWORK WITH APPLICATION IN WASTEWATER TREATMENT

Nikolina Ivanova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nikolina.ivanova@mgu.bg

ABSTRACT. Modern environmental monitoring systems generate large volumes of heterogeneous data from sensor networks, laboratory analyses, operational systems, and external information sources. Data quality determines the reliability, accuracy, and interpretability of machine learning models used for environmental analysis, forecasting, and decision support. This review examines the major challenges of preparing environmental monitoring data for machine learning by analysing their characteristics, key data quality dimensions, and contemporary preprocessing techniques.

The main contribution of this paper is a conceptual framework for data quality-driven data preparation. Unlike conventional approaches, where preprocessing follows a predefined sequence of operations, the proposed framework places data quality assessment at the core of preprocessing strategy selection. The four principal data quality dimensions—completeness, reliability, temporal consistency, and informativeness—are linked to corresponding preprocessing techniques, including imputation, noise and anomaly filtering, temporal synchronisation, and feature selection or dimensionality reduction.

Wastewater treatment plants are used as a representative application illustrating the typical challenges of environmental data analysis. However, the proposed framework is applicable to a wide range of environmental monitoring systems and provides a systematic basis for preparing reliable, interpretable, and practically applicable datasets for machine learning.

Key words: environmental monitoring, data quality assessment, data preprocessing, machine learning, wastewater treatment plants.

ОТ СУРОВИ ЕКОЛОГИЧНИ ДАННИ ДО НАДЕЖДНИ МОДЕЛИ ЗА МАШИННО ОБУЧЕНИЕ: КОНЦЕПТУАЛНА РАМКА, ОСНОВАНА НА ОЦЕНКАТА НА КАЧЕСТВОТО НА ДАННИТЕ, С ПРИЛОЖЕНИЕ ПРИ ПРЕЧИСТВАНЕТО НА ОТПАДЪЧНИ ВОДИ

Николина Иванова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Съвременните системи за екологичен мониторинг генерират големи обеми хетерогенни данни от сензорни мрежи, лабораторни анализи, експлоатационни системи и външни информационни източници. Качеството на тези данни определя надеждността, точността и интерпретируемостта на моделите за машинно обучение, използвани за анализ, прогнозиране и подпомагане на вземането на решения. Настоящият обзор разглежда основните предизвикателства при подготовката на екологични данни за машинно обучение, като анализира техните характеристики, ключовите измерения на качеството и съвременните подходи за предварителна обработка.

Основният принос на статията е предложената концептуална рамка за подготовка на данни, управлявана от оценката на тяхното качество. За разлика от традиционните подходи, при които предварителната обработка следва предварително определена последователност, предложената рамка поставя оценката на качеството на данните в основата на избора на подходящи стратегии за предварителна обработка. Четирите основни измерения на качеството на данните – пълнота, надеждност, времева съгласуваност и информативност – са свързани със съответните методи за предварителна обработка, в т.ч. импутация, филтриране на шум и аномалии, синхронизиране на времеви редове и подбор или намаляване на размерността на признаците.

Като представителен пример са използвани пречиствателните станции за отпадъчни води, които илюстрират типичните предизвикателства при анализа на екологични данни. Предложената рамка има и по-широка приложимост и може да се използва при подготовката на данни от различни системи за екологичен мониторинг, създавайки основа за разработването на по-надеждни, интерпретируеми и практически приложими модели за машинно обучение.

Ключови думи: екологичен мониторинг, оценка на качеството на данните, предварителна обработка на данни, машинно обучение, пречиствателни станции за отпадъчни води.

Introduction

Driven by advances in computational methods and environmental sensing technologies, machine learning (ML) is now widely used to analyse, model, and optimise environmental processes. The widespread deployment of sensor technologies, Internet of Things (IoT) devices, SCADA platforms, and automated monitoring networks has resulted in the continuous generation of large and highly heterogeneous environmental datasets. These developments have created new opportunities for prediction, anomaly detection, and decision support in a wide range of applications, including air quality monitoring, water resource management, precision agriculture, ecosystem monitoring, and wastewater treatment.

Despite these opportunities, developing reliable machine learning models remains challenging because environmental datasets often contain quality-related limitations. Environmental monitoring data originate from multiple heterogeneous sources and differ in sampling frequency, measurement accuracy, and temporal resolution. As a result, the quality of the available data directly influences the performance, robustness, and interpretability of machine learning models.

Although data preprocessing is traditionally regarded as a technical step within the analytical workflow, preprocessing strategies should be selected according to the characteristics and quality of the available data rather than applied universally. Therefore, data quality assessment should be regarded as the foundation for selecting appropriate preprocessing methods. Despite the rapid growth of machine learning applications in environmental monitoring, considerably less attention has been devoted to systematically linking data quality assessment with preprocessing strategy selection.

This review examines the relationship between environmental monitoring challenges, data quality assessment, and data preprocessing for machine learning. Based on a comprehensive literature review, it proposes a conceptual data

quality-driven framework linking data quality dimensions with appropriate preprocessing strategies. Although wastewater treatment plants (WWTPs) are used as a representative application, the proposed framework is applicable to a broad range of environmental monitoring systems.

Environmental Monitoring Data: Challenges for Machine Learning

Environmental monitoring data differ substantially from the datasets commonly used in many traditional machine learning applications, posing unique challenges for machine learning because of their heterogeneity, dynamic behaviour, and complex environmental interactions (Zhong et al., 2021). They describe dynamic natural and engineered processes, are collected from multiple independent sources, and are characterised by varying sampling frequencies, measurement accuracies, and spatial–temporal structures, presenting unique challenges that directly influence the reliability and performance of machine learning models.

Heterogeneous Data Sources

One of the primary challenges arises from the heterogeneity of data sources. Depending on the application, environmental datasets may integrate measurements obtained from online sensors, laboratory analyses, SCADA systems, meteorological observations, remote sensing platforms, geographic information systems (GIS), and operational records. These sources differ in their measurement principles, data formats, sampling frequencies, and levels of accuracy, making their integration into a unified analytical dataset a challenging task (Ullo & Sinha, 2020). Accordingly, heterogeneous data integration is the first step in preparing environmental datasets for machine learning.

Missing and Unreliable Observations

Real-world environmental datasets frequently contain missing values, noise, outliers, and measurement errors resulting from sensor malfunctions, communication failures, adverse weather conditions, or human intervention (Alferes & Vanrolleghem, 2016). Such imperfections reduce data reliability and may lead to inaccurate predictions, unstable models, and misleading interpretations (Aribisala, 2024). Reliable machine learning therefore requires identifying missing and unreliable observations before model development.

Temporal Heterogeneity

Environmental processes exhibit pronounced temporal dynamics. Measurements may be collected at intervals ranging from seconds to days or even weeks, while the monitored variables are influenced by seasonal patterns, climatic conditions, and the specific characteristics of the observed system.

Differences in sampling frequency and temporal resolution complicate the analysis of relationships among variables, making temporal alignment a prerequisite for reliable machine learning in environmental monitoring (Zhu et al., 2022).

High-Dimensional Environmental Datasets

Modern environmental monitoring systems simultaneously record a large number of physical, chemical, biological, and operational variables. These variables are often characterised by complex linear and non-linear relationships, while some features contain redundant or only marginally informative information (Bagherzadeh et al., 2021). High data dimensionality increases computational complexity, complicates result interpretation, and may reduce the performance and generalisability of machine learning models (Aribisala, 2024). These challenges make feature selection and dimensionality reduction essential steps in preparing environmental datasets for machine learning.

Wastewater Treatment as an Illustrative Case Study

The application of machine learning in wastewater treatment has expanded rapidly during the last decade and has been comprehensively reviewed from different perspectives, including biological treatment processes, process optimisation, operational control, and AI-driven decision support (Sundui et al., 2021; Rashid et al., 2025; Jaganathan et al., 2025; Zamfir et al., 2025). As a result, WWTPs have become one of the most representative environmental systems for developing and evaluating data-driven models.

WWTPs represent a typical example of environmental systems in which all of the previously discussed challenges occur simultaneously. They integrate continuous measurements from online sensors, laboratory analyses of water quality, operational process parameters, SCADA systems, and external meteorological observations (Newhart et al., 2019). The diversity of data sources, sampling frequencies, and levels of reliability results in complex multidimensional datasets containing missing values, noise, outliers, and temporal inconsistencies (Wang et al., 2021).

Numerous machine learning algorithms, including artificial neural networks, Random Forest, and model tree approaches, have already demonstrated their potential for predicting wastewater treatment performance (Kumar & Deswal, 2020). Machine learning has also been successfully applied to specialised monitoring tasks such as odor classification around wastewater treatment facilities (Cangialosi et al., 2021).

Although these challenges are commonly discussed as independent preprocessing tasks, they rarely occur in isolation. Their interaction highlights the need to view data quality assessment as the basis for selecting appropriate preprocessing strategies, which forms the central concept of the framework proposed in this review.

Data Quality Dimensions for Machine Learning Readiness

Data quality assessment forms the foundation of reliable machine learning because it determines the suitability of the available data for machine learning and guides the selection of appropriate preprocessing strategies. Its importance is particularly evident in environmental monitoring systems, where heterogeneous data sources, long-term observations, and dynamic processes introduce multiple quality-related challenges.

Unlike traditional information systems, where data quality is primarily evaluated in terms of correctness and completeness, machine learning applications require additional characteristics that directly influence model training, generalisation, and robustness. In this review, data quality is organised into four functional dimensions – completeness, reliability, temporal consistency, and informativeness – which encompass the most common challenges encountered when preparing

environmental monitoring data for machine learning. Their relationships, associated challenges, impacts on machine learning, and corresponding preprocessing strategies are summarised in Table 1.

Table 1. *Data quality assessment framework*

DATA QUALITY DIMENSIONS			
Dimension	**Typical problems**	**Impact on ML**	**Recommended methods**
Completeness Extent to which data are complete and not missing	Missing data ratio Patterns of missingness Temporal coverage	Reduced prediction accuracy Biased model estimates	Imputation Interpolation
Reliability Degrees to which data are accurate and consistent with reality	Outlier rate Sensor/instrument reliability Measurement error	Model instability Overfitting	Filtering Outlier detection
Temporal consistency Degree to which data are temporally aligned and consistent	Inconsistent sampling frequency Time lag/ synchronization Non-stationarity	Distorted temporal relationships Reduced forecasting performance	Aggregation Resampling Synchronization
Informativeness Degree to which data contain useful information for the target task	Low signal-to-noise ratio Feature redundancy Multicollinearity	Increased model complexity Reduced interpretability	Principal component analysis (PCA) Feature selection Factor analysis
QUALITY ASSESMENT SUMMARY			
Summary of identified strengths, weaknesses, and priority issues requiring preprocessing before machine learning.			

Completeness

Data completeness refers to the extent to which the information required for analysis is available and accessible. In environmental monitoring systems, missing values may result from sensor malfunctions, communication failures, power outages, scheduled equipment maintenance, or human factors associated with laboratory analyses.

Missing data reduce the amount of usable information, distort the statistical properties of the dataset, decrease prediction accuracy, and may limit the applicability of certain machine learning algorithms. Systematic missingness is particularly problematic, as the absence of data is associated with specific processes or monitoring conditions rather than occurring at random (Alejo-Sanchez et al., 2025).

In WWTPs, missing values commonly result from sensor interruptions, laboratory sampling schedules, or differences in sampling frequency (Ivanova et al., 2024).

Reliability

Data reliability reflects the extent to which measurements accurately represent the actual state of the monitored process. Even when a dataset is complete, individual measurements may be affected by noise, sensor errors, temporary equipment malfunctions, improper calibration, or human errors during data recording (Alferes & Vanrolleghem, 2016).

These imperfections may produce outliers or anomalous observations that do not reflect the actual behaviour of the monitored system (Kim et al., 2025). If not identified and addressed in a timely manner, these observations may significantly affect model training, particularly for machine learning algorithms that are sensitive to data anomalies.

In WWTPs, unreliable measurements may directly affect process control and treatment evaluation.

Temporal Consistency

A distinguishing characteristic of environmental monitoring data is the variation in sampling frequencies across different variables. While some parameters are recorded continuously or at intervals of only a few minutes, others are measured daily, weekly, or only when laboratory analyses are performed.

These differences complicate the integration of data into a unified analytical dataset. Variations in temporal resolution may lead to incorrect alignment, information loss, and misleading relationships among variables.

In WWTPs, continuous sensor measurements must be synchronised with laboratory analyses and meteorological observations to ensure reliable modelling of environmental processes.

Informativeness

Modern environmental monitoring systems generate a large number of variables describing interconnected physical, chemical, biological, and operational processes. As a result, datasets often contain highly correlated variables, redundant information, or features with limited predictive value (Bagherzadeh et al., 2021).

Using all available variables does not necessarily improve machine learning performance. On the contrary, redundant or irrelevant features may increase model complexity, raise computational costs, and reduce the ability of models to generalise to previously unseen data.

In WWTPs, identifying informative variables improves both predictive accuracy and process interpretation.

The four functional dimensions presented in this section provide a practical framework for organising the most common data quality challenges encountered in environmental monitoring. Together, they establish a direct link between data quality assessment and preprocessing by identifying whether data preparation should focus on missing data handling, data cleaning, temporal harmonisation, or feature selection.

Data Quality-Driven Data Preparation

Data quality assessment does not directly improve environmental monitoring data; rather, it guides the selection of preprocessing strategies according to the characteristics of the available dataset. Consequently, data preparation should be regarded as a decision-driven rather than a fixed sequence of operations.

Environmental data preparation comprises preprocessing techniques that improve data suitability for machine learning. Figure 1 presents the proposed data quality-driven workflow, illustrating how each data quality dimension guides the selection of appropriate preprocessing strategies before model development. The following subsections review the principal methods for handling missing data, improving data reliability, ensuring temporal consistency, and enhancing data informativeness.

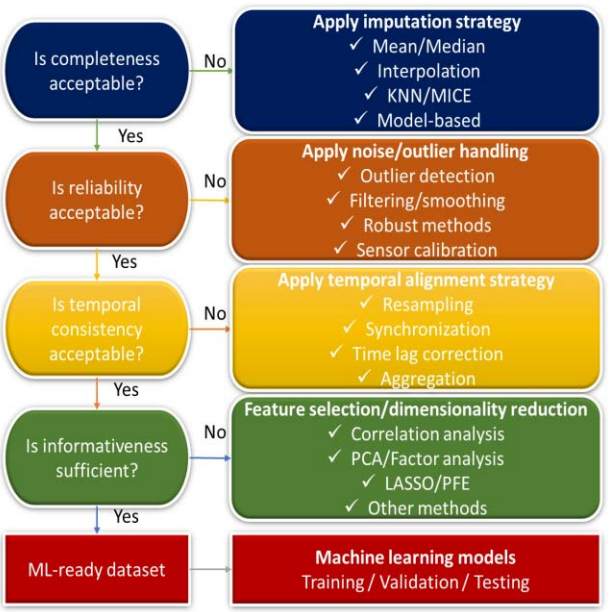


Fig. 1. Data quality-driven preprocessing workflow

Handling Missing Data

Missing values are among the most common challenges in environmental monitoring because they reduce the amount of usable information, distort statistical properties, and negatively affect model performance. They should therefore be addressed before machine learning model development (Alejo-Sanchez et al., 2025).

Selecting an appropriate imputation technique requires considering the missingness mechanism (MCAR, MAR, or MNAR), the amount of missing data, and the characteristics of the monitored environmental process. Common approaches include interpolation techniques (linear, spline, and PCHIP) for continuously measured variables and model-based approaches such as k-nearest neighbours (kNN), Random Forest, Expectation-Maximisation (EM), and Multiple Imputation by Chained Equations (MICE) for multidimensional datasets.

In WWTP applications, missing observations commonly result from sensor malfunctions, laboratory sampling schedules, or differences in sampling frequency among data sources, making the choice of an imputation strategy a direct outcome of data quality assessment (Ivanova et al., 2024).

Improving Data Reliability

Improving data reliability involves reducing measurement errors and removing unreliable observations. The choice of appropriate techniques depends on the nature and origin of the identified deviations (Alferes & Vanrolleghem, 2016).

Random measurement noise is commonly addressed using smoothing and filtering techniques, such as moving average, median filtering, and the Savitzky–Golay filter, whereas abnormal observations are typically detected using statistical methods (e.g., Z-score and interquartile range) or machine learning algorithms, including Isolation Forest, Local Outlier Factor (LOF), DBSCAN, and One-Class Support Vector Machines (Kim et al., 2025).

In environmental monitoring, extreme values may represent genuine environmental events rather than measurement errors. In WWTPs, for example, sensor fouling, calibration drift, communication failures, and laboratory sampling errors are common sources of unreliable measurements, highlighting the importance of selecting appropriate filtering and outlier detection techniques.

Temporal Alignment and Synchronisation

Environmental monitoring systems typically integrate data from multiple sources that differ in sampling frequency, temporal resolution, monitoring period, and recording time. Without appropriate temporal synchronisation, these differences may lead to incorrect variable matching, misleading relationships, and reduced machine learning performance.

Common preprocessing techniques include aggregation, resampling, interpolation, synchronisation, and time lag correction. In more complex applications, cross-correlation analysis, lag analysis, and Dynamic Time Warping (DTW) can be used to identify temporal dependencies between variables. However, excessive aggregation or inappropriate interpolation may obscure the natural dynamics of the monitored processes and reduce the information available for machine learning.

WWTPs provide a representative example of these challenges, where continuous sensor measurements must be integrated with laboratory analyses, operational records, and meteorological observations collected at different temporal resolutions.

Feature Selection and Dimensionality Reduction

Environmental monitoring systems often generate large numbers of interrelated physical, chemical, biological, and operational variables. Many of these variables are redundant or

highly correlated, making dimensionality reduction an important step in preparing datasets for machine learning.

Feature selection methods are commonly categorised into filter, wrapper, and embedded approaches, whereas dimensionality reduction techniques include Principal Component Analysis (PCA), Factor Analysis (FA), and non-linear methods, such as t-SNE, UMAP, and autoencoders. Feature selection is generally preferred when preserving the physical interpretation of variables is important, whereas dimensionality reduction is more suitable for reducing data complexity or extracting compact representations.

WWTPs are typical high-dimensional systems in which operational, water quality, and meteorological variables are monitored simultaneously, making feature selection, dimensionality reduction, or their combination essential for efficient machine learning.

The preprocessing strategies reviewed in this section illustrate how different data quality challenges can be addressed through appropriate data preparation techniques. Rather than representing a fixed sequence of operations, these techniques should be selected according to the specific quality characteristics of the available dataset. These relationships are integrated into the data quality-driven conceptual framework presented in the following section.

A Conceptual Framework for Data Quality-Driven Machine Learning in Environmental Monitoring

The literature reviewed in this study indicates that data preprocessing is commonly treated as a sequence of technical operations performed prior to machine learning model development. In many cases, preprocessing techniques are selected based on practical considerations or the characteristics of a particular algorithm, without sufficient consideration of the actual condition of the available data. Such an approach may lead to suboptimal preprocessing decisions, ultimately reducing the reliability and interpretability of machine learning models.

Based on the findings of this review, a conceptual data quality-driven framework is proposed in which systematic data quality assessment guides the selection of preprocessing strategies according to the identified data quality issues rather than following a predefined preprocessing workflow.

As illustrated in Figure 2, the framework begins with the integration of heterogeneous environmental data, followed by the assessment of four key data quality dimensions: completeness, reliability, temporal consistency, and informativeness. This assessment determines the preprocessing strategies required before machine learning model development.

Rather than prescribing a fixed preprocessing pipeline, the proposed framework establishes explicit links between identified data quality issues and the corresponding preprocessing strategies. In this way, data preparation becomes an adaptive process in which preprocessing decisions are driven by the assessed condition of the available data, providing a transparent basis for reliable machine learning in environmental monitoring.

Once these stages have been completed, the dataset is better prepared for machine learning model development. By explicitly linking preprocessing decisions to data quality assessment, the proposed framework reduces the risk of inappropriate preprocessing, improves model reliability and interpretability, and supports the development of more robust and generalisable machine learning models.

Although illustrated using wastewater treatment plants, the proposed framework is applicable to a broad range of environmental monitoring systems, including air, water, soil, climate, ecosystem, and smart sensing applications (Li et al., 2026).

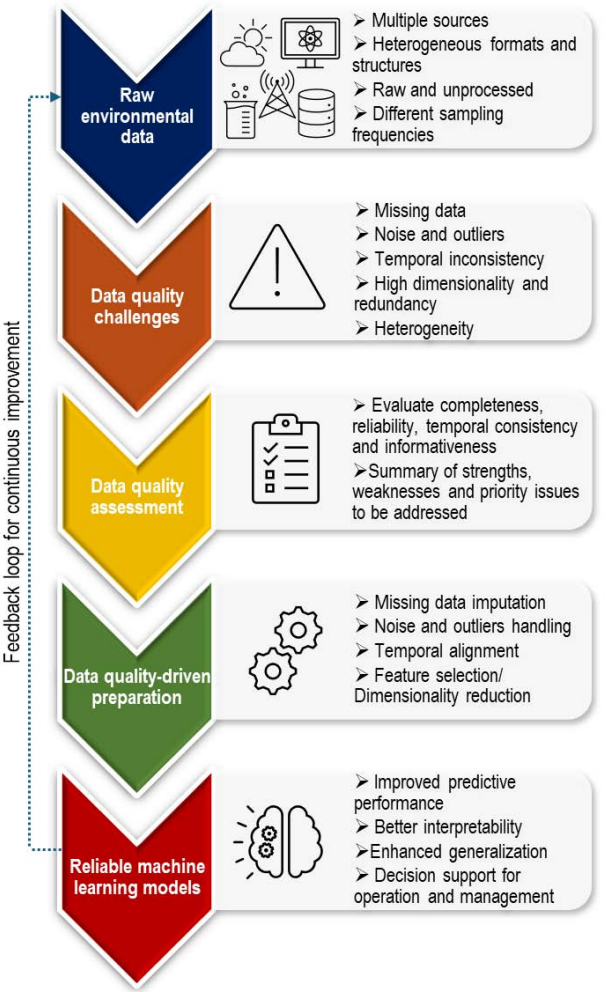


Fig. 2. Conceptual data quality-driven framework

Although the proposed framework is derived from a comprehensive review of the literature, it remains conceptual in nature and has not yet been validated through a unified experimental study. Future research should validate the proposed framework across different environmental monitoring systems and compare its performance with conventional preprocessing workflows.

Conclusion

The growing application of machine learning in environmental monitoring places increasing demands on the quality and preparation of the underlying data. Despite continuous advances in machine learning algorithms, the reliability, robustness, and interpretability of predictive models remain strongly dependent on data quality and the appropriateness of the applied preprocessing strategies.

This review examined the principal challenges associated with preparing environmental monitoring data for machine learning, focusing on the characteristics of environmental datasets, the key dimensions of data quality, and the most widely used preprocessing techniques. Wastewater treatment plants served as the representative application, illustrating challenges that are common across many environmental monitoring systems.

The principal contribution of this review is a conceptual data quality-driven framework linking data quality assessment with preprocessing strategy selection. Though developed for environmental monitoring, its principles are applicable to other domains characterised by heterogeneous, multidimensional, and dynamic datasets.

Future research should focus on validating the proposed framework using diverse real-world environmental datasets and developing intelligent decision-support systems for data quality assessment capable of automatically recommending appropriate preprocessing strategies according to dataset characteristics. Such developments could further improve the reliability of machine learning models and support more effective environmental monitoring and decision-making. Ultimately, reliable machine learning begins with systematic data quality assessment and appropriate data preparation.

References

Alejo-Sanchez, L. E., Márquez-Grajales, A., Salas-Martínez, F., Franco-Arcega, A., López-Morales, V., Acevedo-Sandoval, O. A. & González-Ramírez, C. A. (2025). Missing data imputation of climate time series: A review. *MethodsX*, *15*, 103455. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103455

Alferes, J. & Vanrolleghem, P. A. (2016). Efficient automated quality assessment: Dealing with faulty on-line water quality sensors. *AI Communications: The European Journal on Artificial Intelligence*, *29*(6), 701-709. https://doi.org/10.3233/AIC-160713

Aribisala, O. E. (2024). Data Quality Assessment and Preprocessing Techniques for Enhancing Machine Learning Model Performance. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences*, *12*. https://doi.org/10.37082/IJIRMPS.v12.i3.232799

Bagherzadeh, F., Mehrani, M.-J., Basirifard, M. & Roostaei, J. (2021). Comparative study on total nitrogen prediction in wastewater treatment plant and effect of various feature selection methods on machine learning algorithms performance. *Journal of Water Process Engineering*, *41*, 102033. doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102033

Cangialosi, F., Bruno, E. & De Santis, G. (2021). Application of machine learning for fenceline monitoring of odour classes and concentrations at a wastewater treatment plant. *Sensors*, *21*(14), 4716. https://doi.org/10.3390/s21144716

Jaganathan, J. S., Ali, J. M. & Abdullah, S. R. S. (2025). Unlocking the Potential of Artificial Intelligence in Wastewater Treatment: Innovations, Opportunities, and Challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering,* *13*(6). https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119671

Ivanova, N., Yanev, N. & Vasileva, S. (2024). Utilisation of Basic Methods for Filling Missing Data from Wastewater Treatment Plants. – 2024 5th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), 1-6. doi: 10.1109/CIEES62939.2024.10811430

Kim, C.-S., Kim, C.-R. & Kok, K.-H. (2025). Outlier Detection in Hydrological Data Using Machine Learning: A Case Study in Lao PDR. *Water,* *17*(21), 3120. https://doi.org/10.3390/w17213120

Kumar, S. & Deswal, S. (2020). Estimation of Phosphorus Reduction from Wastewater by Artificial Neural Network, Random Forest and M5P Model Tree Approaches. *Pollution,* 6(2), 417–428. https://doi.org/10.22059/POLL.2020.293086.717

Li, Y., Han, F. & Zheng, Y. (2026). Artificial Intelligence in Surface Water Quality Research and Management: Recent Progress and Future Directions. *Ecosystem Health and Sustainability*, *12*, 0474. https://doi.org/10.34133/ehs.0474

Newhart, K. B., Holloway, R. W., Hering, A. S. & Cath, T. Y. (2019). Data-Driven Performance Analyses of Wastewater Treatment Plants: A Review. *Water Research, 157*, 498-513. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.030

Rashid, A., Ramya, P., Kumar, K. S., Manohar, Ch. S., Pratap, Ch. S. & Suresh, K. (2025). Optimisation of Sewage Treatment Plant Using Machine Learning Algorithms: A Comprehensive Literature Review. *International Journal of Research Publication and Reviews*, *6*(10), 5292-5293. https://doi.org/10.55248/gengpi.06.1025.3765

Sundui, B., Ramirez Calderon, O. A., Abdeldayem, O. M., Lázaro-Gil, J., Rene, E. R. & Sambuu, U. (2021). Applications of machine learning algorithms for biological wastewater treatment: Updates and perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *23*, 127–143. https://doi.org/10.1007/s10098-020-01993-x

Ullo, S. L. & Sinha, G. R. (2020). Advances in Smart Environment Monitoring SystemsUsing IoT and Sensors. *Sensors, 20*(11), 3113. https://doi.org/10.3390/s20113113

Wang, D., Thunéll, S., Lindberg, U., Jiang, L., Trygg, J., Tysklind, M. & Souihi, N. (2021). A machine learning framework to improve effluent quality control in wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, *784*, 147138. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147138

Zamfir, F.-S., Madalina, C. & Mihalanche, S. (2025). Application of Machine Learning Models in Optimising Wastewater Treatment Processes: A Review. *Applied Sciences, 15*(15), 8360. https://doi.org/10.3390/app15158360

Zhong, S., Zhang, K., Bagheri, M., Burken, J. G., Gu, A., Li, B., Ma, X., Marrone, B. L., Ren, Z. J., Schrier, J., Shi, W., Tan, H., Wang, T., Wang, X., Wong, B. M., Xiao, X., Yu, X., Zhu, J.-J. & Zhang, H. (2021). Machine Learning: New Ideas and Tools in Environmental Science and Engineering. *Environmental Science & Technology*. *55*(19), 12741–12754. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01339

Zhu, M., Wang, J., Yang, X., Zhang, Y., Zhang, L., Ren, H., Wu, B. & Ye, L. (2022). A review of the application of machine learning in water quality evaluation. *Eco Environ Health*, *1*(2), 107-116. https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.06.001

DETERMINING THE STRESSES ACTING ON MEDIUM VOLTAGE CAPACITOR BATTERIES

Zhivko Iliev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: jivko.iliev@mgu.bg

ABSTRACT. The article analyses the operational failures of medium voltage capacitor banks. The electrodynamic forces during a short circuit in the batteries are theoretically determined, based on experimental studies of transient processes during their switching. The tensile, bending, and torsional forces arising during the installation of the capacitor banks are theoretically determined.

Key words: capacitor batteries, stresses in threaded joints.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА УСИЛИЯТА, ДЕЙСТВАЩИ ВЪРХУ КОНДЕНЗАТОРНИ БАТЕРИИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Живко Илиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В статията е направен анализ на експлоатационните повреди на кондензаторни батерии за средно напрежение. Теоретично са определени електродинамичните сили при късо съединение в батериите, на базата на извършени експериментални изследвания на преходните процеси при комутирането им. Теоретично са определени възникващите усилия на опън, огъване и усукване при монтажа на кондензаторните батерии.

Ключови думи: кондензаторни батерии, напрежения в резбови съединения.

Въведение

Рудодобивните комплекси се характеризират с рязко променлив активен товар и ниска стойност на естествения фактор на мощността, което налага компенсирането му с кондензаторни батерии. До 2004 г. в ЦРП 110/6кV на голям открит рудник, съществуващата уредба е включвала две секции с мощност 750 kVAr и 1650 kVAr. С цел по-гъвкаво управление на компенсиращата мощност през 2004 г. кондензаторната уредба е разделена на три секции с мощности 450 kVAr, 750 kVAr и 1200 kVAr. Първоначално комутирането на кондензаторните секции се е осъществявало с елегазови контактори “Rollarc-400D” в комбинация с токоограничаващи предпазители “Fusarc CF”. В последствие първичната комутация е подменена с вакуумни прекъсвачи.

Кондензаторните батерии са тип CUEFS-6,3/50, производство на ZEZ SILKO, Чехия. През 2025г. са доставени същите по тип и производител батерии за подмяна на дефектирали. След монтажа им при някои от новите батерии е забелязано счупване на тоководещите им шпилки (фиг. 1).

Фиг. 1. Тоководеща шпилка на кондензаторна батерия

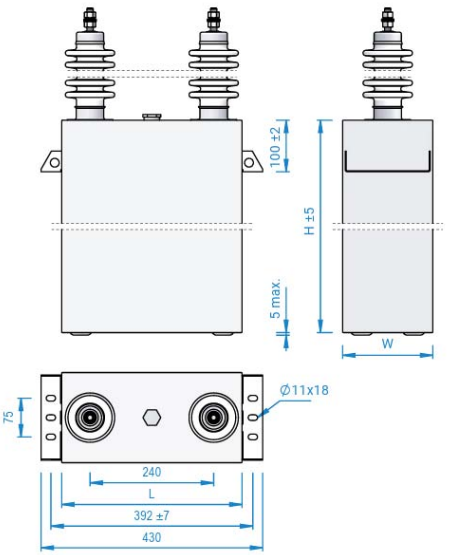
Възможно е скъсването да се е случило по време на затягането. Hong et al. (2020) изследват поведението на резбови съединения и установяват, че след затягането, ако върху болта се приложи повтарящо се натоварване, връзката се разхлабва. Това обяснява факта, че по-късно е забелязано скъсване на шпилката.

След подмяната им и включване към уредбата на средно напрежение на подстанцията, възниква късо съединение и разгаряне на дъгов пробив в един или повече кондензаторни елемента, което засяга и останалите елементи (фиг. 2).

Фиг. 2. Кондензаторен елемент след късо съединение в съседен елемент

Изпълнение на кондензаторната уредба

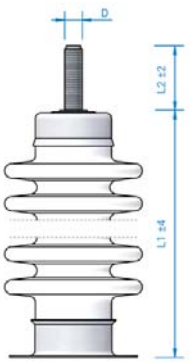
Кондензаторната уредба е обособена в три секции, изпълнени с кондензаторни елементи по 50kVAr, свързани в триъгълник. За батерия 1200 kVAr елементите са 24 бр., за 750 kVAr – 15 бр. и за 450 – 9 бр. Габаритните и присъединителни им размери са дадени на фиг. 3. За 50kVAr LxWxH (mm) са 350x145x180 mm.



Фиг. 3. Габаритни и присъединителни размери на кондензаторен елемент

Свързването им в паралел се осъществява по два начина: чрез проводник АС-50, с кабелни обувки или с единични алуминиеви шини 40/4mm (фиг. 4). И в двата случая дължината на отделните връзки е около 35 cm, осигурявайки свобода при линейните разширения на металите. Монтажът на елементите е върху монтажна стойка чрез закрепващи болтове. Разстоянието между осите на елементите е 24 cm.

Фиг. 4. Монтаж на кондензаторните батерии

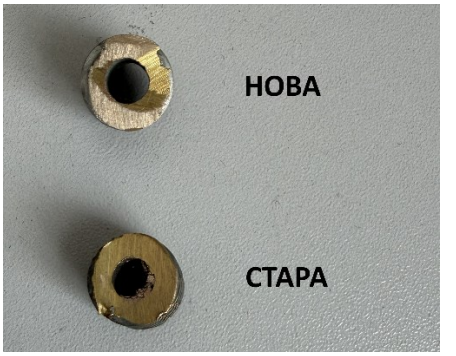


Фиг. 5. Габаритни размери на изолатора

На фиг. 5 е даден изолаторът на кондензатора с размери L1=151mm L2= 45mm D=M12. Пътят на пропълзяване на разряд по изолатора, състоящ се от 4 пръстена, е 190 mm.

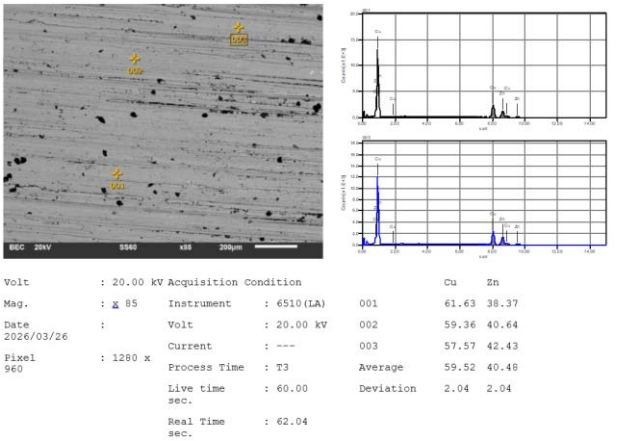
Анализ на възможни причини за дефектиране на съоръженията

Взети са проби на тоководещите шпилки от старите и новите батерии. Ясно се вижда разлика в цвета на двата материала (фиг. 6). И двете шпилки са направени от месинг М12, като вътрешният отвор на старата шпилка е 5,0 mm, а на новата е 5,5 mm.



Фиг. 6. Напречен разрез на тоководещите шпилки

Направен е рентгенографски анализ за съдържанието на използваната сплав. На фиг.7 е показан резултатът от анализа на шпилките от старите батерии.

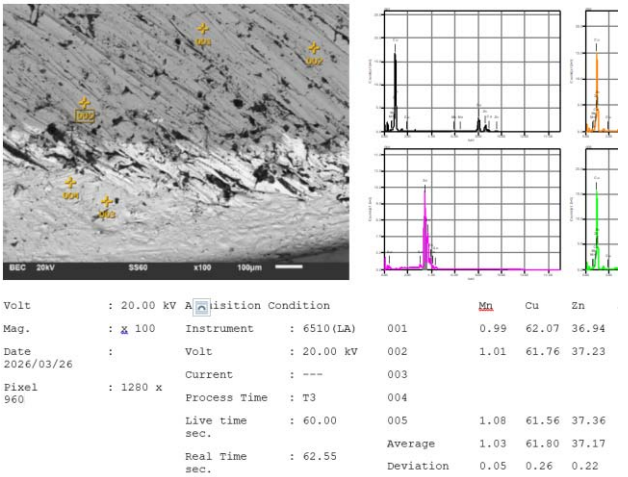


Фиг. 7. Рентгенографски анализ на химическия състав на шпилките на „старите“ батерии.

Съдържанието на този месинг е: мед (Cu) – 59,52% и цинк (Zn) – 40,48%. Това отговаря на сплав Л60, имаща твърдост по Бринел 155 - 165 MPa.

На фиг. 8 е даден резултатът от анализа на материала на шпилката от новите батерии. Сплавта е с повишено съдържание на мед (61,8%), по-ниско съдържание на цинк (37,17%) и е добавен манган (1,03%). Добавянето на легиращи елементи (Mn, Fe, Si) усъвършенства зърнестата структура, което води до по-равномерна и механично устойчива микроструктура, значително повишаваща якостта на опън и твърдостта. От друга страна цинкът в месинга основно повишава здравината,

издръжливостта и пластичността на материала. При новия материал той е в по-малко количество, което обезсмисля добавянето на манган.

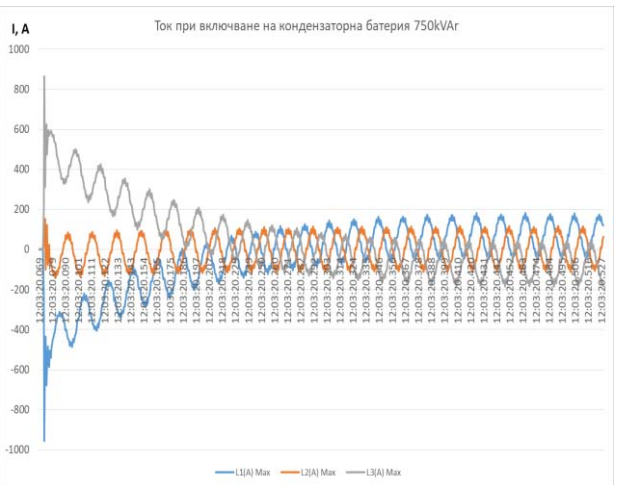


Фиг. 8. Рентгенографски анализ на химическия състав на шпилките на „старите“ батерии.

Причините за дефектиране на батериите могат да бъдат разгледани в два аспекта:

- *динамични механични натоварвания* следствие ударния ток при включване на батериите или при възникване на късо съединение;
- *механични натоварвания* при монтажа.

Динамични механични натоварвания. Известни са проблемите с ударния ток при включване на кондензаторни батерии и те са предмет на множество изследвания. Големите стойности на ударния ток в съчетание с по-високата му честота (300÷1000Hz) водят до възникване на динамични натоварвания, насочени перпендикулярно на протичащия ток. На фиг. 9 е показан преходния процес при включване на кондензаторна батерия с мощност 750 kVAr. От гледна точка на динамичните натоварвания на тоководещите шини, интерес представлява ударния ток.



Фиг. 9. Преходен процес при включване на кондензаторна батерия с мощност 750 kVAr.

По време на апериодичната, съставна опората на шпилката ще бъде натоварена с огъващи и усукващи трептения с честотата на захранващото напрежение. Tonkova & Pulev, (2021) са получили аналитични зависимости за периодично променящите се еластични усукващи моменти, като са изследвани възможностите за намаляване на тяхната стойност чрез подходящ избор на параметрите на системата. Ударният ток при включване на батериите не превишава 1 кА и е многократно по-малък от свръхпреходния ток на късо съединение на сборната шина на кондензаторните батерии (12,087кА), получен от Стоилов и Джустров (2009). Това кореспондира и с подобни експериментални изследвания на Стоилов и др. (2006). Явно електродинамичните сили при късо съединение ще бъдат определящи при механичното напрежение в преходните електрически режими.

Максималната сила, действаща на огъване при късо съединение ще бъде:

$$F_{ог} = 1,76\frac{i_y^2 l}{a}.10^{-7} = \tag{1}$$

$$= 1,76\frac{12,087^2.10^6.0,24}{0,24}.10^{-7} = 25,7\,N$$

Съпротивителният момент на шината в мястото на закрепване към шпилката на кондензаторния елемент ще бъде

$$W = \frac{\pi\left(D^4 - d^4\right)}{32D} = \frac{\pi\left(1,2^4 - 0,55^4\right)}{32.1,2} = 0,354\,cm^3 \tag{2}$$

Тогава напрежението върху шпилката ще бъде

$$\sigma_{ог} = 1,76\frac{i_y^2 l^2}{aW}.10^{-8} = \tag{3}$$

$$= 1,76\frac{12,087^2.10^6.0,24^2}{0,24.0,354}.10^{-8} = 0,9\,MPa < \sigma_{доп}$$

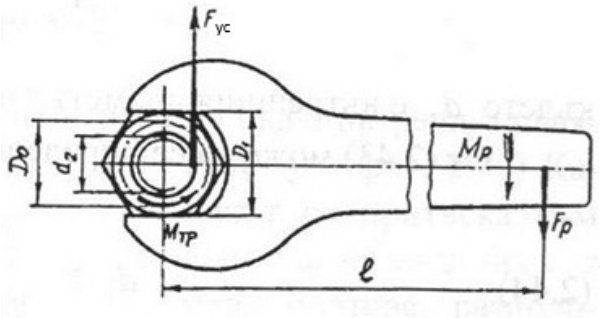
Допустимото напрежение на срязване за месинг зависи от конкретната сплав и нейното състояние (накален, студено обработен), като е в порядъка на 40 - 100 MPa.

Механично натоварване при монтажа. Механичните натоварвания на присъединителните тоководещи шпилки ще бъдат едновременно от огъване и усукване. Методика за изчисляване на натоварването на греда е дадена от Tonkova (2025).

Фиг. 10. Табела на кондензаторните елементи

Производителят на кондензаторните елементи е лимитирал момента на затягане на резбовите съединения. За тоководещите елементи с М12, максималният момент е 25 Nm, както за новите елементи, така и за старите (фиг. 10).

Момент на завиване на гайката



Фиг. 11. Момент за завиване на гайката

Необходимият момент за прилагане върху гайката за завиването ѝ и преодоляване на осовата сила F в резбата е:

$$M_{завъртане} = F.\frac{d_2}{2}.tan(\psi + \rho) \quad (4)$$

ψ, ρ – ъгъла на подем на резбата и ъгъла на триене ≈ 10^0

Момента от силите на триене:

$$M_{тр} = \mu.F.\frac{D_o}{2} \quad (5)$$

- $\mu = 0{,}15$ – *коефициент на триене*

Момент на силата на работника

$$M_p = F_p.l = F.\frac{d_2}{2}.tan\left(\psi + \rho\right) + \mu.F.\frac{D_o}{2} \quad (6)$$

където:

F_p – сила на работника;
l – рамо на ключа;
D_o=1,2d= 1,2.12=14,4 mm;
d_2=0,9d = 10,8 mm
d = 12mm - диаметър на резбата;
d_2 – среден диаметър на резбата;

След преобразувания на (6) и замествайки *Mp=25Nm*, се получава силата на усукване *Fус*

$$F_{ус} = \frac{M_p}{\frac{d_2}{2}.tan\left(\psi + \rho\right) + \mu.\frac{D_o}{2}} = \quad (7)$$

$$= \frac{25}{\frac{10{,}8}{2}.\tan\left(10°\right) + 0{,}15.\frac{14{,}4}{2}} = 12313\,N$$

Напрежението на усукване $\tau_{ус}$ ще бъде:

$$\tau_{ус} = \frac{F.d_2.tan\left(\psi + \rho\right)}{2.\frac{\pi.(D^4 - d^4)}{16.D}} = \frac{8.D.F.d_2.tan\left(\psi + \rho\right)}{\pi.(D^4 - d^4)} = \quad (8)$$

$$= \frac{8.0{,}012.12313.0{,}0055.tan\left(10°\right)}{\pi.(D0{,}012^4 - 0{,}0055^4)} = 31{,}1\,MPa \approx \tau_{доп}$$

където $\tau_{доп}$ = $30 \div 60 Mpa$ е допустимо напрежение на усукване за месинг.

От фиг. 11 и изчисленото напрежение на усукване $\tau_{ус}$ се вижда, че при въртящ момент *Mp ≥ 25Nm*, има вероятност за скъсване на шпилката.

При *l=0,2m*, което е типичната дължина на рамото на гаечен ключ, за силата на работника се получава:

$$F_p = \frac{M_p}{l} = \frac{25}{0{,}2} = 125\,N \approx 12{,}8\,kg$$

Такава сила лесно би могла да се получи с обикновен ключ и по-силен работник. Разпределение на натоварването между навивките на винта и гайката е неравномерно и тази неравномерност се дължи на грешката в стъпката на резбата на гайката и винта и на разнопосочната деформация на двата елемента – винтовото стебло е натоварено на опън, а тялото на гайката на натиск.

Persson et al. (2021) проучват динамиката на скоростта на затягане при използване на въртящ момент като метод за контрол. Според тези изследвания силата на затягане, получена в съединението, се променя при затягане с висока скорост или когато скоростта варира значително по време на затягане.

Nassar S. A., X. Yang (2007) дават връзката между въртящия момент и напреженията, различните компоненти на въртящия момент и стойностите на въртящия момент при скъсване в приложенията на резбови крепежни елементи. Взети са предвид триизмерните аспекти на ъглите на водещата спирала и профила на резбата, както и кинетичните и статичните коефициенти на триене.

Първата навивка (най-близката до опората) поема 32-33% от общия товар според Курушин и др. (2011; Николов и др., 2013), а пета и следващи навивки - по-малко от 10%. Следователно целият товар се поема само от първите 4-5 навивки, което е твърде неблагоприятно при пулсиращи натоварвания. Възможно е при завиването на гайката да се достигне до границата на провлачване на материала и при последващо температурно изменение да се получи скъсване на материала, без външна намеса.

Литература

Курушин, М., Курушин, А., Барманов, И. (2011). Распределение усилий по витками коэффициенты внешней переменной нагрузки в резьбовых соединениях в условиях вибраци изделий, Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(27).

Николов, Н., Цонев, В, Стойчев, Г., Лазов, Л., Василев, В. и Тодорова, Г. (2013), Съпротивление на материалите – ръководство за лабораторни упражнения. София,

България: Авангард прима, 2013, ТУ– София, ISBN 978-619-160-181-3, гл. 1, раздел 1, стр. 1–32.

Стоилов, Ив., Ташева, Д., Джустров, К. (2006). Изследване на преходните процеси при комутиране на кондензаторни батерии. Год. на МГУ „Св. Иван Рилски”,т. 49,св III, 149-153.

Стоилов, Ив., Джустров, К. (2009). Оптимални настройки на релейните защити в подстанциите на рудник „Елаците”. Proceedings of X Jubilee National Conference with International Participation of the Open and Underwater Mining of Minerals 07÷11 June, Varna.

Hong H., Lee, H., Jeong, N., Baek, K., Suh, M. (2020). A study on an equivalent model of the threaded fasteners in complex structures through tightening and loosening analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology, 34,* 1195–1205.

Nassar, S. A., Yang, X. (2007). Novel formulation of the tightening and breakaway torque components in threaded fasteners, *Journal of Pressure Vessel Technology 129 (4)*, 147–160.

Persson, E., Kumar, M., Friberg, C. & Dressler (2021). Clamp Force Accuracy in Threaded Fastener Joints Using Different Torque Control Tightening Strategies, *SAE Technical Paper*, https://doi.org/10.4271/2021-01-5073

Tonkova, G. (2025). Experimental Determination of the Principal Stresses at a Point of a Beam Loaded Simultaneously in Bending and Torsion. XXVI International Conference “Engineering and Natural Sciences”, Proceedings of the Technical university of Sofia, ISSN: 2738-8549 (online), ISSN: 2738-8530 (print), Volume 76, Issue 1, Sozopol, DOI: 10.47978/TUS.2025.76.01.033

Tonkova G., Pulev, S. (2021), Reducing the Elastic Torsional Moment of a Vibrating Shaft. Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, ISSN: 2738-8808 (print), ISSN: 2738-8816 (online), Volume 64, Sofia, 165-167 p.

APPLICATION OF AN ASYMMETRIC BRIDGE CONVERTER IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) DRIVES

Georgi Kostov, Romeo Alexandrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: georgi_kostov@mgu.bg, romeo.alexandrov@mgu.bg

ABSTRACT. Switched reluctance motors (SRMs) cannot operate directly connected to the electrical supply; for this reason, they operate in conjunction with a power electronic commutator – a converter that sequentially switches the phase windings in synchronism with the angular position of the rotor. Selection of a power electronic converter in the SRM electric drive is essential for ensuring control with high efficiency and safety. Depending on the motor speed, different parameters are obtained when using different DC/DC converters, such as torque, rms current, etc. An important condition when selecting a suitable converter is independent phase control, as well as reducing torque ripple. The asymmetric bridge converter is the most common topology for controlling an SRM due to it is reliability and independent phase control. The article discusses the converter scheme, the phase switching order, and a comparison between hard and soft commutation of the converter is made.

Keywords: switched reluctance motor (SRM), asymmetric bridge converter, model, control.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА АСИМЕТРИЧЕН МОСТОВ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ В ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ С ПРЕВКЛЮЧВАЕМ РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ (ПРД)

Георги Костов, Ромео Александров

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Превключваемите реактивни двигатели (ПРД) не могат да работят директно свързани към електрическото захранване; поради тази причина, те работят съвместно със силов електронен комутатор - преобразувател, който последователно превключва фазните намотки в синхронизъм с ъгловото положение на ротора. Изборът на силов електронен преобразувател в електрозадвижването с ПРД е от съществено значение за осигуряване на управление с висока ефективност и сигурност. В зависимост от скоростта на въртене на двигателя при използването на различни DC/DC преобразуватели се получават различни параметри, като момент, средноквадратичен ток и др. Важно условие при избор на подходящ преобразувател е независимо управление на фазите, както и намаляване на пулсациите на момента. Асиметричният мостов преобразувател е най-често срещаната топология за управление на ПРД поради своята надеждност и независимо управление на фазите. В доклада е разгледана схемата на преобразувателя, реда на превключване на фазите, както и е направено сравнение между твърда и мека комутация на преобразувателя.

Ключови думи: превключваем реактивен двигател (ПРД), асимитречен мостов преобразувател, модел, управление.

Въведение

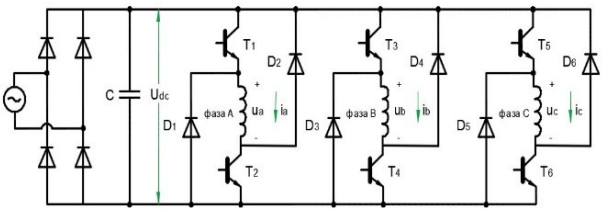
Необходимостта от наличието на DC/DC преобразувател (силов електронен комутатор) в структурата на електрозадвижвания с превключваем реактивен двигател (ПРД) се обуславя от принципа му на работа, а именно нуждата от последователно превключване на фазните намотки в синхронизъм с ъгловото положение на ротора. Първоначално са били използвани механични комутатори за превключване на фазите, те са с множество недостатъци, като ниско бързодействие, ограничаване на работната честота, кратък срок на експлоатация, наличие на електрическа дъга със съответните последствия – бързо износване на контактите и създаване на силни електромагнитни смущения. За първи път през 1930 г. се заменя механичният комутатор с електронен, използван в построения от Brown Boveri локомотив за швейцарските железници. Използван е шест аноден живачно-дъгов изправител. Вследствие на развитието на електрониката и предимствата на ПРД редица учени се насочват към анализиране и усъвършенстване на електрозадвижвания с тях. Доказателство за това е и все повече инсталираните двигатели в индустрията, както и подмяна на вече съществуващи с превклюваеми реактивни двигатели. Тъй като въртящият момент на ПРД не зависи от полярността на тока, защото зависи от квадрата на тока (i^2), е необходим един превключвател на фаза за управление на тока.

Обикновено желаната форма на всеки фазов ток е правоъгълна, ето защо е изключително важно да се използват преобразуватели, които могат да работят с мека и твърда комутация.

Асиметричен мостов DC/DC преобразувател

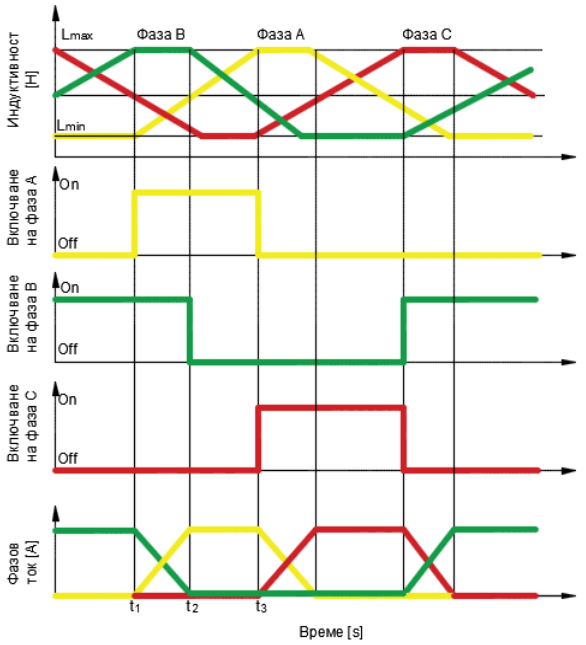
Тук се разглеждат и анализират режимите на работа на асиметричен мостов DC/DC преобразувател. В доклада на Костов и Александров (2024) е направена класификация на преобразувателите, използвани в електрозадвижвания с ПРД, като част от структурата на тези системи. Описани са основните изисквания, на които трябва да отговарят тези преобразуватели. В много случаи поради своите предимства асиметричният мостов преобразувател е предпочитан за използване в електрозадвижвания с превключваеми реактивни двигатели. В повечето случаи се налага комутаторите да се захранят от променливотоковата мрежа, поради тази причина се снабдяват с токоизправители. На постояннотоковата шина се присъединява кондензатор, който служи за обмен на реактивна енергия с двигателя. Наличието му е абсолютно необходимо поради еднопосочната проводимост на изправителя. Освен това той изпълнява функцията на филтър, като изглажда пулсациите на изправеното напрежение и запасява енергия за покриване на импулсния характер на тока, черпен от преобразувателя и двигателя. Важно предимство на асиметричния мостов преобразувател е възможността за независимо управление на токовете във всяка от фазите, следователно и добро управление на въртящия момент. Като недостатък може да

се отбележи наличието на повече полупроводникови елементи. Схемата на асиметричен мостов DC/DC преобразувател е показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Асиметричен мостов преобразувател

За опростяване режимите на работа се разглеждат за една от фазите, за другите фази режимите са аналогични. На фиг. 2 е показана работата на асиметричен мостов DC/DC преобразувател съвместно с ПРД.

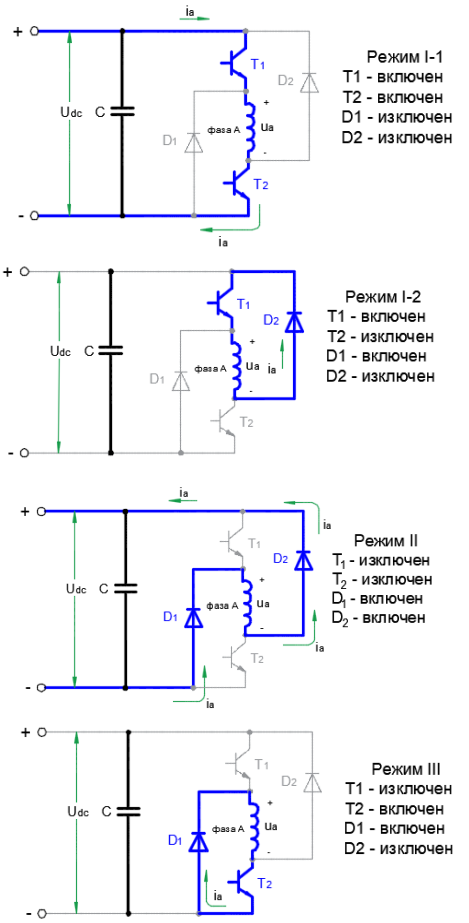


Фиг. 2. Съвместна работа на ПРД с асиметричен мостов преобразувател

Важно е да се отбележи, че в момента t_1 фаза A е включена, а фаза B е изключена, токът обаче не нараства или спада моментално поради индуктивността на фазите. На фиг. 2 се вижда, че токът във фаза A достига своята зададена стойност в момент t_2, когато фаза B е размагнетизирана и нейният ток е нула. Между двете времена t_1 и t_2 фази A и B провеждат едновременно.

На фиг. 3 са показани режимите на работа на преобразувателя (за фаза A). Режим I-1 съответства на време t_1, тогава са включени транзисторите T_1 и T_2, токът във фазата започва до нараства до неговата зададена стойност. Ако той не се управлява може да достигне много високи стойности. Токът на фаза A достига своята зададена стойност във време t_2, когато на фаза B токът е нула. Между времената t_1 и t_2 фази A и B провеждат едновременно.

Подобен анализ е направен и от Grecer et al. (2026). Този период от време е основен източник на пулсациите на момента на ПРД.



Фиг. 3. Режими на работа на асиметричен мостов преобразувател – фаза A

За трите времена изменението на тока може да се представи чрез следните формули:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - R_s i - i\dfrac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega_r}{L} \quad \text{за режим I} \qquad (1)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{u - R_s i - i\dfrac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega_r}{L} \quad \text{за режим II} \qquad (2)$$

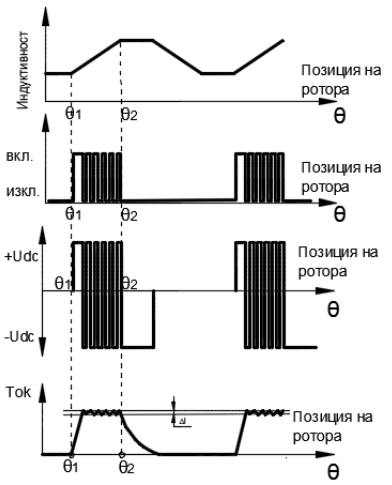
$$\frac{di}{dt} = -\frac{R_s i - i\dfrac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega_r}{L} \quad \text{за режим III,} \qquad (3)$$

където:

u – захранващо нарежение, [V]
R_s – съпротивление на статора, [Ω]
i – токът на фазата, [A]
θ – ъгълът на позицията на ротора, [rad]
L(θ,i) – индуктивност на фазата като функция от θ и i, [H]
ω_r – ъглова скорост на ротора, [rad/s]

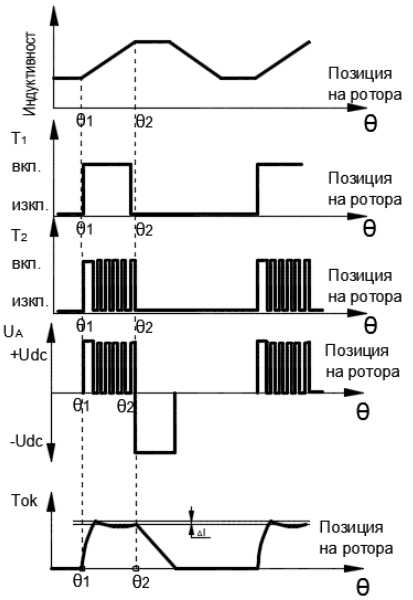
Редица автори се спират върху анализа на съвместната работа на асиметричния мостов преобразувател съвместно с ПРД (Miller, T. (2001)., Krishnan, R. (2001), Emadi, A. et al. (2019)). При управлението на преобразувателя се прилагат два метода на превключване – биполярна модулация (твърда комутация) и еднополярна модулация (мека комутация). При твърдата комутация транзисторите T_1 и T_2

са включени, напрежението u_a е равно на захранващото напрежение U_{dc}, а фазовият ток i_a се увеличава, докато достигне своята номинална стойност, тогава T_1 и T_2 се изключват и фазовият ток протича през диодите D_1 и D_2 и кондензатора. Тогава приложеното напрежение върху фазовата намотка е U_{dc}, но с обратен знак и следователно токът намалява, докато достигне долната граница на хистерезиса. При тази комутация фазовият ток протича между DC шината и фазовата намотка в цикъл на постоянно превключване, което увеличава загубите на мощност, причинени от постоянното превключване и пулсациите на тока в кондензаторите. Този процес е показан на фиг. 4.



Фиг. 4. Биполярна модулация на асиметричен мостов преобразувател

Меката комутация може да се приложи за подобряване ефективността на преобразувателя. По време на интервала $\theta_1 - \theta_2$ транзисторът T_1 е винаги включен, а T_2 се включва и изключва, за да се управлява текущата стойност на тока. В този цикъл при изключен T_2, фазовият ток протича през диода D_2 и транзистора T_1. Напрежението на фазовата намотка u_a е равно на сумата от падовете на напрежението на D_2 и T_1 по време на проводимост. Тъй като този пад е с малка стойност, токът през намотката намалява бавно.



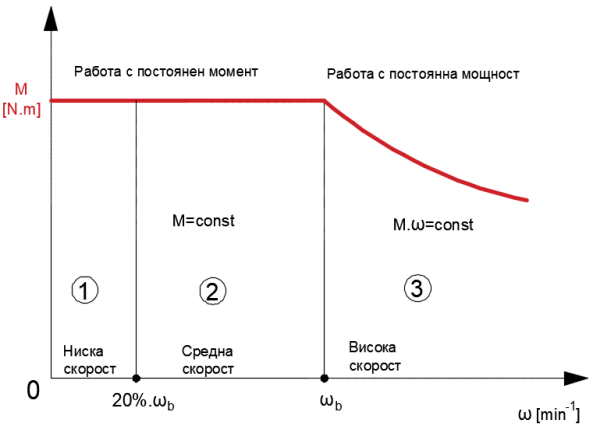
Фиг. 5. Еднополярна модулация на асиметричен мостов преобразувател

В края на токовия импулс, за да се намали бързо фазовият ток транзисторите T_1 и T_2 се запушват. След θ_2 стойността на тока намалява до нула – токът преминава през диодите D_1 и D_2, както при твърда комутация. Тази модулация е показана на фиг. 5.

Реализацията на мека комутация предполага две състояния на полупроводниковите елементи по време на режим I-1 и режим I-2 съгласно фиг. 3.

На фиг. 6 е показана механичната характеристика на превключваем реактивен двигател. По отношение на скоростта можем да я разделим на **ниска скорост** до 20% от граничната, **средна скорост** – от 20% до 100 % от номиналната и **висока скорост** – над граничната.

До достигането на граничната скорост (ω_b) двигателят работи с постоянен момент, докато при скорости над граничната, той работи с постоянна мощност, както е показано на фигурата.



Фиг. 6. Механична характеристика на ПРД

Граничната скорост се определя от израза:

$$\omega_b = \frac{U_{dc}}{I \left.\frac{dL}{d\theta}\right|_{\theta=\theta m}} \tag{4}$$

По отношение на управлението, при ниски скорости се прилага мека и твърда комутация. При средна скорост освен това управление, се прилага управление и с промяна на ъглите на включване и изключване, а при електрозадвижвания със скорости по-високи от граничната – импулсно управление.

При еднополярна модулация (мека комутация) може да се запишат следните изрази:

$$d_1 = \frac{I_p(R_s + \omega_m)}{U_{dc}} \tag{5}$$

$$I_{T_1} = \sqrt{\frac{1}{\theta_{rp}}\left\{(I_p + \Delta i)^2 + \frac{\theta_a}{3} + \sqrt{+\left\{I_p^2 \frac{7}{3}\Delta i^2\right\}\frac{\theta_c - \theta_a}{2}(1 + d_1)}\right\}} \tag{6}$$

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r}, \tag{7}$$

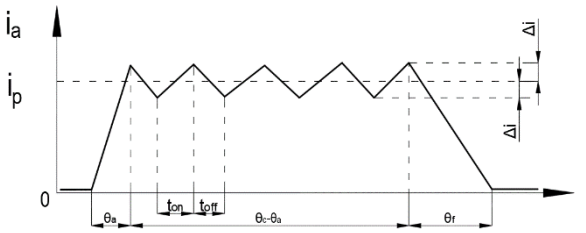
където:

θ_{rp} – стъпка на полюсите на ротора;

P_r – брой роторни полюси

$$I_{D_1} \cong \frac{I_p}{\theta_{pr}}\left[(1-d_1)\frac{\theta_c-\theta_a}{2}+\frac{\theta_f}{2}\right] \quad (8)$$

Величините, участващи в уравненията са показани на фиг. 7.



Фиг. 7. Форма на тока при мека комутация на асиметричен мостов преобразувател

Величините са: I_{T1} – средноквадратичен ток, I_{D1} – среден ток, I_p – фазов ток, θ_c – ъгъл на проводимост, θ_a – ъгъл на изпреварване, θ_f – ъгъл на изключване, среден работен цикъл в областта θ_a-θ_c – d_1.

Krishnan (2001) разглежда разновидност на асиметричния преобразувател за приложение в електрозадвижващи системи на четирифазен двигател. При тази топология се използват две двойки транзистори съответно едната за фази A и C, и другата за фази B и D, като във веригата на всяка фаза се добавя тиристор. По този начин се намалява броят на транзисторите и диодите в схемата – това е основното предимство на схемата, както и по-честото използване на транзисторите – в случая вместо веднъж на четири цикъла, всеки транзистор се използва веднъж на два цикъла. Недостатъкът е наличието на тиристори, за които трябва отделно управление и допълнително охлаждане.

От направеното сравнение в Emadi, A. et al. (2019) на няколко преобразуватели, използвани в електрозадвижвания с ПРД се вижда, че пулсацията на момента до 3000 rpm нараства линейно , след което между 3000 rpm и 4000 rpm има скокообразно изменение, като от 4000 rpm до 5000 rpm не се изменя пулсацията на момента. Средноквадратичният ток остава неизменен независимо от скоростта на въртене.

Една от особеностите на електрозадвижванията с ПРД е зависимостта на индуцираното електродвижещо напрежение от скоростта на въртене. Тази зависимост се показва чрез формулата:

$$e = i.\omega.\frac{\partial L(\theta,i)}{d\theta} = K_b.i.\omega\,, \quad (9)$$

където $\frac{\partial L(\theta,i)}{d\theta} = K_b$ е електромагнитна константа, която определя наклона на профила на индуктивността. Той е положителен при нарастваща индуктивност и отрицателен при намаляваща. При ниска скорост е валидно неравенството:

$$|e| < |U - i.R| \quad (10)$$

При високите скорости комутацията трябва да се извърши по-рано в сравнение от тази при ниските скорости (намаляване на ъгъла на задържане) поради намаленото време за ограничаване на тока и желание да се избегне развиване на отрицателен въртящ момент.

Транзисторите са включени за кратко след преминаване на неподравненото положение и токът се повишава бързо поради малката индуктивност и малкото електродвижещо напрежение. В началото на припокриване на полюсите индуцираното електродвижещото напрежение (*e*) нараства бързо и надвишава захранващото напрежение. Това води до отрицателен $\frac{di}{dt}$, а и следователно спад на тока. Колкото по-висока е скоростта, толкова по-бързо ще спадне токът. Това води и до намаляване на произведения въртящ момент. Магнитният поток нараства линейно благодарение на постоянното напрежение приложено на намотката, когато се достигне ъгълът на изключване двата транзистора се изключват и токът преминава през диодите. Потокът спада линейно до нула поради отрицателното приложено напрежение върху намотката.

В доклада на Hamouda и Számel (2017) е направено сравнение на фазовия ток и индуктивността съответно при скорост 3000 и 9000 rpm, където графично е показана зависимостта на тока и индуктивността при различни скорости.

Заключение

В заключение на изложеното дотук може да се отбележи, че асиметричния мостов преобразувател изпълнява изискванията, необходими за електрозадвижвания с превключвателни реактивни двигатели. Неговата ефективност се повишава при задвижвания с четирифазни двигатели (и с повече фази, кратни на две). Друг начин за ефективно използване на преобразувателя е използването на мека комутация. От голямо значение е скоростта на въртене, която оказва влияние върху индуцираното електродвижещо напрежение.

Литература

Emadi, A., Jiang, J. Bilgin, B. (2019). *Switched Reluctance Motor Drives Fundamentals to Applications. Boca Raton* : Taylor & Francis Group, 2019. стр. 825.

Grecer, B., Akpolat, A., Serteller, N., Tosun, O., Gol, M.(2026). Data-Driven Sensorless Rotor Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using a Deep LSTM Network, Electronics, Volume15, Issue 6, DOI: https://doi.org/10.3390/electronics15061330

Hamouda, M., Számel, L. (2017). Optimum Excitation Angles for Switched Reluctance Motor Drives. XXXIII. Kando Conference, Budapest, Hungary, pp. 128-142.

Krishnan, R. (2001). *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. CRC Press, 2001.

Miller, T. (2001). *Electronic control of switched reluctance machines*. Newnes, Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

Костов, Г., Александров, Р. (2024). Структура на система на електрозадвижване с превключваем реактивен двигател, Год на МГУ, т.67, стр. 228-235, https://doi.org/10.5281/zenodo.13762846.

TRAJECTORY OF MOVEMENT AND COORDINATES OF CHARACTERISTIC POINTS OF THE WORKING BODY OF A *SANDVIK LH518* TYPE ELECTRIC WHEEL LOADER

Ivan Minin, Savo Venkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, e-mail: minin_ivan@abv.bg; savo.venkov@sandvik.com

ABSTRACT. An analysis of the kinematic scheme of the working equipment of a *SANDVIK LH518* front-end loader has been made. An equivalent replacement scheme of the working body has been created in order to determine the degrees of freedom. Based on the replacement kinematic scheme of the loader's working body, a methodology has been created for determining the trajectory of movement of characteristic points of the working body of the machine, considering the position of the working body at which the machine bucket cuts into the massif. The developed methodology shows its efficiency after calculating the coordinates of a point that represents the front cutting edge of the bucket teeth and comparing these values with measurements made on the machine.

Key words: loader, hydraulic, front-end, trajectory, working body.

ТРАЕКТОРИЯ НА ДВИЖЕНИЯТА И КООРДИНАТИ НА ХАРАКТЕРНИ ТОЧКИ ОТ РАБОТНИЯ ОРГАН НА ЕЛЕКТРОМОБИЛЕН ЧЕЛЕН ТОВАРАЧ ТИП SANDVIK LH518

Иван Минин, Саво Венков

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: minin_ivan@abv.bg; savo.venkov@sandvik.com

РЕЗЮМЕ. Направен е анализ на кинематична схема на работното оборудване на челен товарач тип *SANDVIK LH518*. Създадена е еквивалентна заместваща схема на работния орган с цел определяне на степените на свобода. На базата на заместваща кинематична схема на работния орган на товарача е създадена е методика за определяне на траекторията на движението на характерни точки от работния орган на машината, като е разгледано положението на работния орган при което кофата на машината се врязва в масива. Направената методика показва своята работоспособност след изчисляване на координатите на точка, която представлява предния режещ ръб на зъбите на кофата и сравнявайки тези стойности с измервания направени на машината.

Ключови думи товарач, хидравличен, челен, траектория, работен орган.

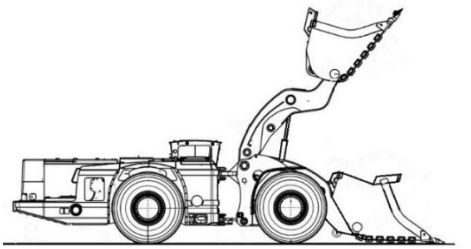
Въведение

Най-характерните и разпространени представители на минните и пътно-строителните машини с хидравлично задвижване са хидравличните еднокофови багери и челните товарачи.

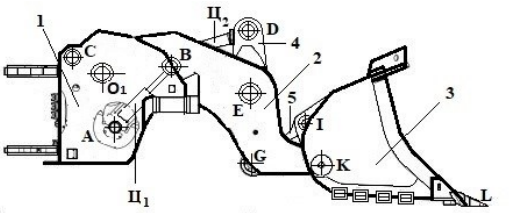
В сравнение с багерите, челните товарачи имат по-малка маса, при една и съща вместимост на кофата, по-голяма мобилност, повишена маневреност, способност за селективно изземване, способност за преодоляване на наклони 30-40%. Към преимуществата им трябва да се причислят и значително съкратените срокове за монтаж и по-ниската им цена. Благодарение на двузвенната конструкция на работния орган челните товарачи осигуряват копаене с максимално усилие на всякаква височина на кофата. През последните години с развитието на батерийните технологии се произвеждат и товарачи с електрическо задвижване от батерии, какъвто е обектът на настоящето изследване.

Анализ на кинематична схема на работното оборудване на челния товарач

На фиг. 1 е показан общ изглед на челен товарач тип SANDVIK LH518. Съгласно фиг. 2 показваща работния орган, работното оборудване на машината се състои от две основни звена: ръка 2 и кофа 3, свързани последователно със самостоятелни шарнирни връзки позволяващи завъртането им едно спрямо друго (Гоберман, Л. А, 1988). Движението на елементите на работния орган се осъществява от една двойка хидравлични цилиндъра Ц1 и цилиндър Ц2. Цилиндрите Ц1 които са закрепени на шарнир А към рамата 1 осигуряват завъртане на ръката 2 около шарнира С. Цилиндър Ц2 осигурява завъртане на кофата 2 около шарнира К. Това става посредством кобилицата 4, закрепена на ръката чрез шарнир Е и свързана с лост 5 посредством шарнирната връзка G. Лостът 5 е свързан с кофата 3 посредством шарнир I. Резултантното движение на точка L (предния режещ ръб на кофата), описваща траекторията на рязане, се осъществява от наслагването на изброените две самостоятелни завъртения плюс праволинейното движение осигурено от ходовия механизъм, определящи трите степени на свобода на разглежданата система.



Фиг. 1. Общ изглед на челен товарач тип SANDVIK LH518

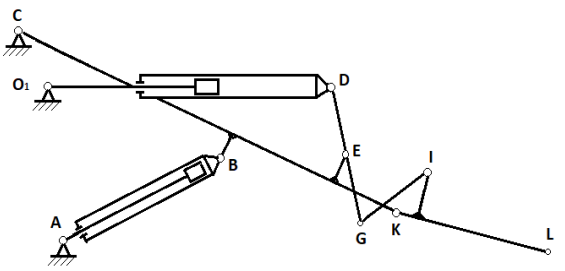


Фиг. 2. Работен орган на челен товарач тип SANDVIK LH518

С челния товарач се свързва относителна пространствена Декартова координатна система OXYZ, ориентирана така, че: ос OZ съвпада с равнината на свързване на рамата 1 към шасито на товарача; ос OX лежи в равнината на стоене на машината и се дава от пресечницата на тази равнина с равнината на симетрия на изпълнителния орган; ос OY е перпендикулярна на равнината XOZ и заедно с осите OX и OZ образува дясно ориентирана Декартова координатна система.

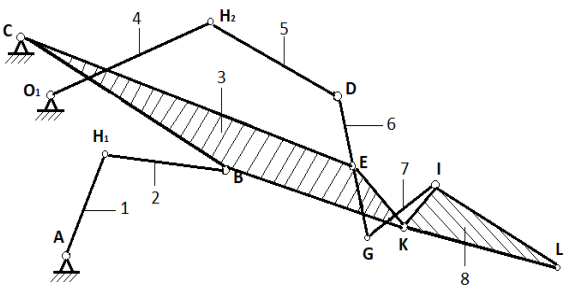
На фиг. 3 е показана заместваща кинематична схема, еквивалентна на действителната схема на елементите на работното оборудване на товарача. Всяка отделна шарнирна връзка между звената на системата е отбелязана със самостоятелна буква.

Използването на заместващи структурни схеми е ефективен подход при анализа на механични системи със сложни кинематични връзки (Тонков и др., 2018г.)



Фиг. 3. Заместваща кинематична схема на работния на челния товарач

Еквивалентната заместваща схема на механизма в равнината XOZ, показана на фиг. 4 се получава като всяка двойка хидравлични цилиндри, представляващи променливо по дължина звено, се замества с две шарнирно свързани звена (само в структурния анализ).



Фиг. 4. Еквивалентна заместваща схема за определяне степените на свобода

С числа от 1 до 8 са номерирани отделните звена на механизма. Броят на звената е $n = 8$, а броят на шарнирните връзки – $p_5 = 11$.

В такъв случай за броя на степените на свобода в равнината XOZ се получава:

$$h = 3n - 2p_5 = 3.8 - 2.11 = 2 \quad (1)$$

Третата степен на свобода спрямо оста Y се осъществява от механизма за завъртане на работния орган на машината.

Траектория на движението и определяне на координатите на характерни точки от работния орган на челния товарач

Изучаването на траекторията на движение на отделните характерни точки от работния орган на машината фактически означава да се реши задачата за определяне на положението на работния орган в зависимост от хода на хидравличните цилиндри. Решаването на тази задача е възможно само, ако е напълно определена геометрията на задвижващия механизъм.

Геометричното и параметричното моделиране е ключов етап при определяне на траекториите и координатите на характерни точки в механични конструкции (Тонков и др., 2018г.)

Геометрията на механизма е определена, ако са дадени следните величини:

- x_A – абсциса на точка A, m;
- z_A – апликата на точка A, m;
- x_{01} – абсциса на точка O_1, m;
- z_{01} – апликата на точка O_1, m;
- x_C – абсциса на точка C, m;
- z_C – апликата на точка C, m;
- AO_1, O_1B, AC, CO_1, O_1K, O_1E, DE, DG, GI, KI, KL – дължини на звената съгласно означенията на фиг. 3;
- $AB = L_{01} + S_1$ – дължина на хидравличните цилиндри Ц1, m;
- $O1D = L_{02} + S_2$ – дължина на хидравличния цилиндър Ц2, m;
- L_{01} – минимална дължина на хидравличните цилиндри Ц1, m;
- L_{02} – минимална дължина на хидравличния цилиндър Ц2, m;
- S_1 – ход на хидравличните цилиндри Ц1, m;
- S_2 – ход на хидравличния цилиндър Ц2, m;

Координатите на интересуващите ни точки от разглеждания механизъм в направление от неподвижното звено AO_1C към точка L, представляваща режещия ръб на кофата, ще бъдат определени по разгледания по-долу начин в момента на врязване на кофата на товарача в масива.

Дължината на звената AO_1, AC и O_1C са съответно:

$$AO_1 = \sqrt{(x_{BO1} - x_A)^2 + (z_{O1} - z_A)^2}, m \quad (2)$$

$$AC = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (z_C - z_A)^2}, m \quad (3)$$

$$O_1C = \sqrt{(x_C - x_{O1})^2 + (z_C - z_{O1})}, m \quad (4)$$

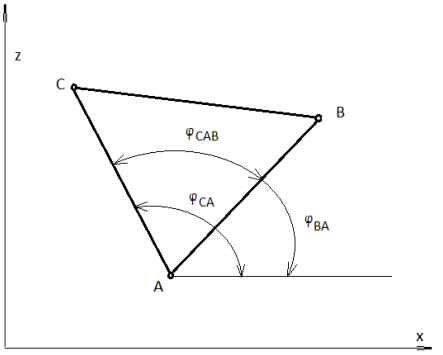
Решаването на отделните етапи от задачата за определяне на положението на разглеждания механизъм се извършва чрез геометричен анализ с удачно избрани векторни контури (метод на триъгълниците).

При разглеждане на отделните векторни контури се приемат следните унифицирани условни означения:

- вектор, чието начало е т. A, а краят е в т. B и се означава със $\overrightarrow{AB}$;
- модулът на същия вектор, съответно $|AB|$ или AB;

- ъгълът, който даден вектор ($\overrightarrow{AB}$) сключва с положителното направление на абсцисната ос OX, се означава със символа φ_{AB} ;
- мерното число на ъгъла между две отделни направления се означава с малка буква от гръцката азбука.

Разглеждаме ΔABC (фиг. 5).



Фиг. 5. Заместваща схема на част от работния на челния товарач

Известни са ни следните величини:

$$z_A = 0{,}65m;\ x_A = 0{,}85m;$$
$$x_C = 0{,}25m; z_C = 1{,}85m;$$
$$AB = L_1 + S_1 = 1{,}3m$$
$$BC = 1{,}55m; \mathrm{AC} = 1{,}2m$$

Ъглите се определят по следния начин:

$$\varphi_{\mathrm{CA}} = \arccos\frac{\mathrm{x_A - x_C}}{\mathrm{AC}} = 150° \quad (5)$$

От ΔCAB:

$$\Phi_{\mathrm{CAB}} = \arccos\frac{\mathrm{AC^2 + AB^2 - BC^2}}{\mathrm{2AC.AB}} = 76,5° \quad (6)$$

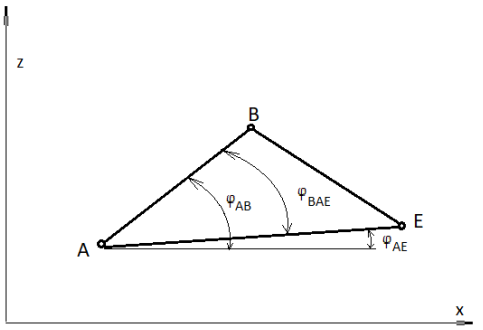
Тогава за ъгъл φ_{BA} получаваме:

$$\varphi_{BA} = \varphi_{CA} - \varphi_{CAB} \quad (7)$$
$$\varphi_{BA} = 73,5°$$

За координатите на точка B получаваме:

$$z_B = z_A + AB.\sin\varphi_{BA} = 1{,}8m \quad (8)$$
$$x_B = x_A + AB.\cos\varphi_{BA} = 1{,}4m \quad (9)$$

Разглеждаме ΔABE (фиг. 6).



Фиг. 6. Заместваща схема на част от ръката на челния товарач

Известни са ни следните величини:

$$z_{\mathrm{B}} = 1{,}8m;\ x_{\mathrm{B}} = 1{,}4m;$$
$$z_A = 0{,}65m;\ x_A = 0{,}85m;$$
$$BE = 1{,}2m; AE = 1{,}6m$$

Ъглите се определят по следния начин:

$$\varphi_{\mathrm{AB}} = \arccos\frac{\mathrm{x_B - x_A}}{AB} = 65°$$

От ΔEAB:

$$\varphi_{\mathrm{BA}E} = \arccos\frac{\mathrm{AB^2 + AE^2 - BE^2}}{\mathrm{2AEAB}} = 30,2° \quad (10)$$

Тогава за ъгъл φ_{AE} се получава:

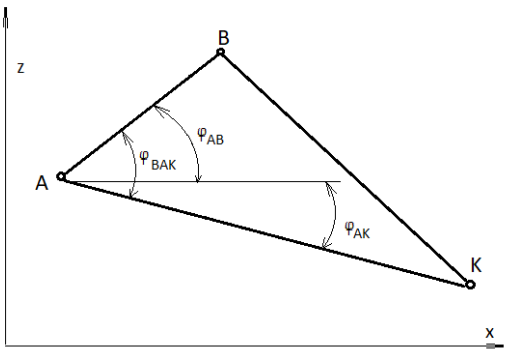
$$\varphi_{AE} = \varphi_{AB} - \varphi_{BAE} \quad (11)$$
$$\varphi_{BA} = 34,8°$$

За координатите на точка E получаваме:

$$z_E = z_A + AE.\sin\varphi_{AE} = 1{,}45m \quad (12)$$
$$x_E = x_A + AE.\cos\varphi_{AE} = 2{,}9m \quad (13)$$

Разглеждаме ΔABK (фиг. 7).
Известни са ни следните величини:

$$z_{\mathrm{B}} = 1{,}8m;\ x_{\mathrm{B}} = 1{,}4m;$$
$$z_A = 0{,}65m;\ x_A = 0{,}85m;$$
$$BK = 2{,}65m; AK = 3{,}2m$$



Фиг. 7. Заместваща схема на част от ръката с включена точката на свързване с кофата

Ъглите се определят по следния начин:

$$\varphi_{\mathrm{A}B} = \arccos\frac{\mathrm{x_B - x_A}}{AB} = 65°$$

От ΔEAB:

$$\varphi_{\mathrm{BA}K} = \arccos\frac{\mathrm{AB^2 + AK^2 - BK^2}}{\mathrm{2AB.A}K} = 62° \quad (14)$$

Тогава за ъгъл φ_{AE} получаваме:

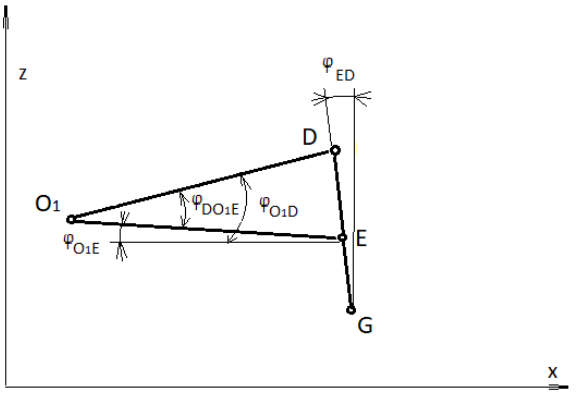
$$\varphi_{AK} = \varphi_{BAK} - \varphi_{AB} \quad (15)$$
$$\varphi_{AK} = 3°$$

За координатите на точка E се получава:

$$z_K = z_A - AK.\sin\varphi_{AK} = 0{,}5m \quad (16)$$

$$x_K = x_A + AK.\cos\varphi_{AK} = 4m \quad (17)$$

Разглеждаме $\Delta O1DE$ (фиг. 8).



Фиг. 8. Заместваща схема на част от цилиндъра за въртене на кофата и кобилицата

Известни са ни следните величини:

$$z_{O1} = 1{,}6m;\ x_{O1} = 0{,}7m;$$

$$z_E = 1{,}45m;\ x_E = 2{,}9m;$$

$$O_1D = L_2 + S_2 = 2{,}2m;$$

$$O_1E = 2{,}5m; ED = 0{,}7m;\ DG = 1{,}7m\ .$$

Ъглите се определят по следния начин:

$$\varphi_{O1E} = \arcsin\frac{z_{O1} - z_E}{O1E} = 3,4°$$

От ΔEAB:

$$\varphi_{DO1E} = \arccos\frac{O1D^2 + O1E^2 - DE^2}{2O1EO1D} = 15.9° \quad (18)$$

Тогава за ъгъл φ_{O1D} получаваме:

$$\varphi_{O1D} = \varphi_{O1E} + \varphi_{DO1E} \quad (19)$$

$$\varphi_{O1D} = 19{,}3°$$

За координатите на точки D и G получаваме:

$$z_D = z_{O1} + DO1.\sin\varphi_{O1D} = 2{,}3m \quad (20)$$

$$x_D = x_{O1} + DO1.\cos\varphi_{O1D} = 2{,}75m \quad (21)$$

$$\varphi_{ED} = \arccos\frac{x_E - x_D}{ED} = 12,5°$$

$$z_G = z_E - EG.\cos\varphi_{ED} = 0{,}45m \quad (22)$$

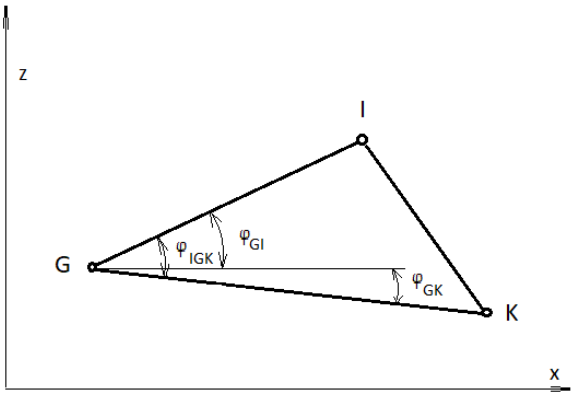
$$x_G = x_E + EG.\sin\varphi_{ED} = 3m \quad (23)$$

Разглеждаме ΔGIK (фиг. 9).
Известни са ни следните величини:

$$z_G = 0{,}45m;\ x_G = 3m;$$

$$z_K = 0{,}5m;\ x_K = 4m;$$

$$GK = 1m; GI = 0{,}9m; IK = 0{,}7m$$



Фиг. 9. Заместваща схема на част от ръката с включена точката на свързване с кофата

Ъглите се определят по следния начин:

$$\varphi_{GK} = \arccos\frac{x_K - x_G}{GK} = 0°$$

От ΔGIK:

$$\varphi_{IGK} = \arccos\frac{GI^2 + GK^2 - IK^2}{2GI.GK} = 43° \quad (24)$$

Тогава за ъгъл φ_{GI} получаваме:

$$\varphi_{GI} = \varphi_{IGK} - \varphi_{GK} \quad (25)$$

$$\varphi_{GI} = 43°$$

За координатите на точка I получаваме:

$$z_I = z_G + GI.\sin\varphi_{GI} = 1{,}05m \quad (26)$$

$$x_I = x_G + GI.\cos\varphi_{GI} = 3{,}65m \quad (27)$$

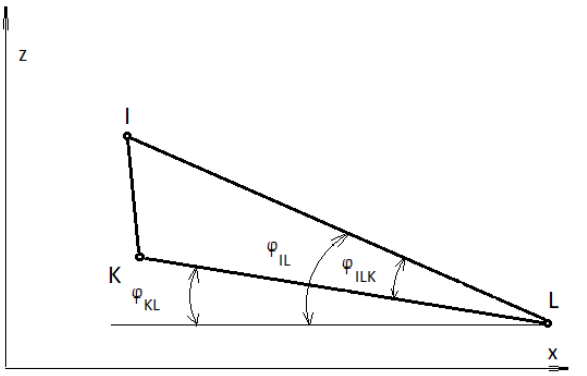
За да определим координатите на предния режещ ръб на кофата разглеждаме ΔKIL (фиг. 10).
Известни са ни следните величини:

$$z_I = 1{,}05m;\ x_I = 3{,}65m;$$

$$z_K = 0{,}5m;\ x_K = 4m;$$

$$LK = 2{,}4m; LI = 3m; IK = 0{,}7m$$

Поради положението на работния орган при което се изследват координатите е спусната кофа то е известно и ,че $z_L = 0$.



Фиг. 10. Заместваща схема на части от кофата

Тогава ъгъл φ_{KL}може да сее определи по следния начин:

$$\varphi_{KL} = \mathrm{arcsin}\frac{z_K - z_L}{LK} = 12°$$

За координатите на точка L се получава:

$$z_L = z_K - KL.\sin\varphi_{KL} = 0m \quad (28)$$

$$x_L = x_K + KL.\cos\varphi_{KL} = 6{,}4m \quad (29)$$

Изводи

Направената методика показва своята работоспособност след изчисляване на координатите на точка L, която представлява предния режещ ръб на зъбите на кофата, при врязване на кофата в масива. Взети са предвид действителните размери на елементите на товарача.

Сравнявайки координатите на т. L (преден режещ ръб на кофата) със схемата на работното поле на машината от каталога на фирмата – производител се вижда, че разликите в координатите са от порядъка 50-100 mm. Това отнесено към работното поле представлява 1,5% грешка, която се дължи на грешката при измерванията на дължините на съответните елементи от работния орган (измерванията са направени в условията на „ДПМ Челопеч“ с ролетка).

Съпоставянето между аналитично определени и реално измерени координати е утвърден подход за верификация на инженерни модели (Тонков и др., 2018 г.).

Всичко това води до заключението, че използваната методиката е работоспособна и може да бъде прилагана и при други конструкции челни товарачи. В комбинация с други разработени методологии (Тасев 2023, Тасев 2024), може да се използва при цялостна поддръжка, ремонт и модернизация на съчленни челни товарачи

Литература

Гоберман, Л. А. (1988). *Основы теории, расчета и проектирования строительных и дорожных машин*. Машиностроение, Москва, 1988.

Тасев, Л. (2023). Методика за оразмеряване на кормилното управление на съчленени пневмо-колесни транспортни средства. Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”, Том 66,2023 ISSN 2738-8808

Тасев, Л. (2024). Методика за оразмеряване на хидравличната система за разтоварване на коша на нископлатформени самосвали. Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”, Том 67, 2024 ISSN 2738-8808

Тонков Г., Тонкова, Г. (2018). Проектиране на механична система вал-маси в средата на MitCalc. *Академично списание „Индустриални технологии“*, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, ISSN: 1314-9911, том V (1), Бургас, 2018г., стр. 65-69.

Тонков Г., Тонкова, Г. (2018). Използване на Inventor при проектиране на експериментален стенд за изпитване на валове. *Академично списание „Индустриални технологии“*, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, ISSN: 1314-9911, том V (1), Бургас, 2018г., стр. 57-64.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE FORCES AND REACTIONS IN THE WORKING BODY OF A *SANDVIK LH518* TYPE FRONT-END LOADER

Ivan Minin, Savo Venkov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, E-mail: minin_ivan@abv.bg; savo.venkov@sandvik.com

ABSTRACT. A methodology has been developed for determining the forces and support reactions at characteristic points of the working body of a *SANDVIK LH518* type electric mobile front-end loader. The loader operates in difficult underground conditions. The forces acting at certain characteristic points of the working body of the machine and the reactions generated by these forces have been determined. The most loaded position of the machine has been selected, namely the moment of the bucket cutting into the massif. Since this type of machine cuts into the massif through its running mechanism, a maximum value of tangential force has been determined, directed along the tangent to the trajectory of movement of the front cutting edge of the bucket teeth in the direction opposite to this movement.

Key words: loader, methodology, front-end, forces, working body.

МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СИЛИТЕ И РЕАКЦИИТЕ В РАБОТНИЯ ОРГАН НА ЧЕЛЕН ТОВАРАЧ ТИП SANDVIK LH518

Иван Минин, Саво Венков

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

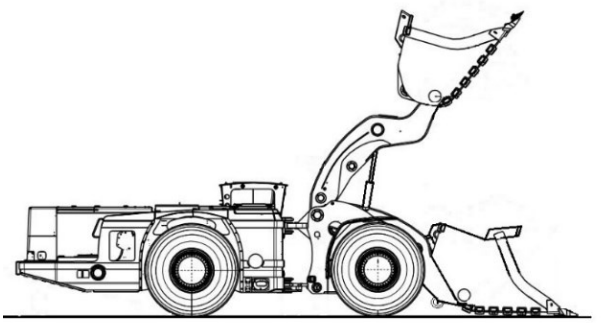
РЕЗЮМЕ. Създадена е методика за определяне на силите и опорните реакции в характерни точки от работния орган на електромобилен челен товарач тип SANDVIK LH518. Товарачът работи в тежки подземни условия. Определени са силите, действащи в определени характерни точки от работния орган на машината, и реакциите, породените от тези сили. Избрано е най-натовареното положение на машината, а именно моментът на врязване на кофата в масива. Поради това, че този тип машини се врязват в масива чрез ходовия си механизъм, е определена максимална стойност на тангенциална сила, насочена по допирателната към траекторията на движение на предния режещ ръб на зъбите на кофата в посока, обратна на това движение.

Ключови думи товарач, методика, челен, сили, работен орган.

Въведение

Освен традиционното им използване при изкопни работи в жилищното и пътното строителство и при прокарване на напоителни канали, през последните 30 години хидравличните багери навлязоха в откритите рудници, където замениха морално и физически остарелите въжено-механични багери.

В тези предприятия тези машини се използват в най-големите не въглищни открити рудници за натоварване на взривена скална маса. В последствие те имат голяма конкуренция от навлизащите все повече огромни челни товарачи. Докато на открито тези машини се конкурират, то под земята челните товарачи нямат конкуренция поради ниския габарит с еднаква по обем кофа. През последните години с развитието на батерийните технологии се произвеждат и товарачи с електрическо задвижване от батерии, какъвто е обектът на настоящето изследване.



Фиг. 1. Общ изглед на челен товарач тип SANDVIK LH518 при спусната и максимално повдигната кофа

Сили действащи на предния режещ зъб на кофата при врязване в масива

В процеса на срязване (фиг. 2) на поредната стружка върху режещия ръб (Гоберман, Л. А, 1988) на зъбите кофата (точка N), действат следните сили:

1. Тангенциална сила P_t^1, насочена по допирателната към траекторията на движение на предния режещ ръб на зъбите на кофата в посока, обратна на това движение. При челните товарачи ъгълът на рязане е в диапазона $30° \div 40°$. Отчитайки този ъгъл, при пресмятане на тангенциалната сила можем да използваме формулата:

$$P_t^1 = K_F . K_o . b . \delta , N, \quad (1)$$

където:

K_F е специфичното съпротивление на скалите при копаене, Pa. $K_F = (0{,}226 \div 0{,}292) MPa$ - за добре взривена скала.

b – широчина на срязваната стружка, m. Този параметър зависи от широчината на кофата на багера;

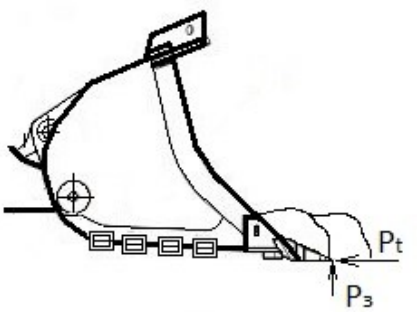
δ - дебелина на срязваната стружка, m;

K_O е корекционен коефициент, отчитащ ъгъла на рязане. Стойностите му са в диапазона $K_O = (0{,}7 \div 0{,}8)$.

2. Нормална сила P_3 (реакция на забоя), N. Пресмята се по формулата:

$$P_3 = \psi . P_t^1 , N, \quad (2)$$

където ψ е коефициент, отчитащ съотношението между нормалната и тангенциалната сила. Стойността му зависи от физико-механичните свойства на скалите и обикновено е в интервала $\psi = (0{,}2 \div 0{,}5)$, като по-ниските стойности са за по-меки скали.



Фиг. 2. Сили действащи на предния режещ ръб на зъбите на кофата

3. Сила на триене $P_3 f$. Нормалната реакция на забоя P_3 създава сила на триене, приложена в същата точка в която действа тангенциалната и действаща по допирателната в посока, обратна на движението на работния орган. С отчитането й, пълното тангенциално съпротивление се определя от израза:

$$P_t = P_t^1 + P_3 f = K_F.K_O.b.\delta + K_F.K_O.b.\delta.\psi.f = \\ = K_F.K_O.b.\delta(1+\psi.f), N \quad (3)$$

където f е коефициент на триене на кофата в масива. Стойностите му са в диапазона: $f = (0{,}2 \div 0{,}25)$.

При анализа на силово натоварени конструктивни елементи от съществено значение е оценката на напрегнато-деформационното състояние, което позволява определяне на критичните режими на работа и конструктивната надеждност на системата (Тонкова, 2017; Тонкова, 2018).

Сили действащи на работния орган на челния товарач

При работа на товарача върху елементите на работния орган действат резултатната сила на копаене и гравитационните товари, представляващи теглата на отделните звена на изпълнителния орган, които реакции трябва да бъдат еднозначно определени.

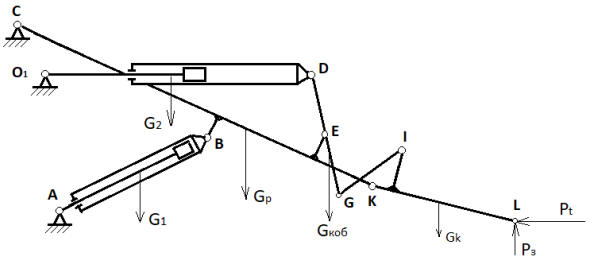
Масовите центрове се приемат, както следва:

- масовият център на хидравличните цилиндри се приема в средата на същите, като при изчисляване н съответния елемент теглото на цилиндрите се приема, че се разпределя равномерно върху шарнирите, на които е окачен;
- теглата на ръката, кобилицата и кофата се приемат в средата на отсечките, определени от шарнирите в двата им края, съответно на ръката СК, на кобилицата DG, на кофата KL.

Тези приемания не биха довели до голяма грешка, поради това, че теглата на цилиндрите са относително малки в сравнение с теглата на останалите елементи.

На фиг. 3 е дадена адаптирана схема на работния орган товарача, при което са известни следните величини:

- двойките координати X, Z на всички шарнирни връзки (O_1, A, B, C, D, E,G, I, K, L);
- тангенциалната сила на копаене P_t (формула 3);
- теглото на кофата G_K (звено KLN), на ръката G_P (звено EK) и на кобилицата $G_{коб}$ (звено DI) и теглата на цилиндри те G_1, G_2.



Фиг. 3. Адаптивна схема на работния орган със силите на тежестта на елементите на работния орган

Теглото на материала се определя по формулата:

$$G_M = g.V_K.\rho.K_P, N \quad (4)$$

където:

V_K, m^3 е обем на кофата;

$\rho, kg/m^3$ - плътност на материала;

K_P - коефициент на разбухване.

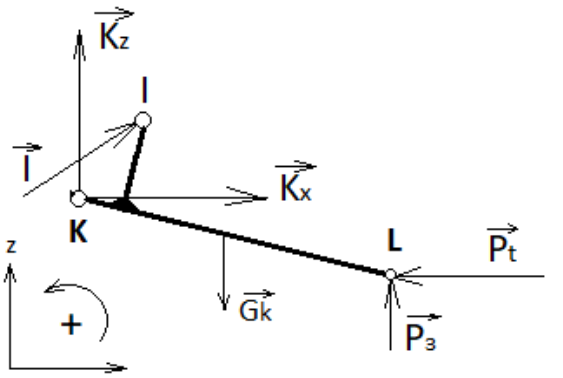
С челния товарач се свързва относителна пространствена Декартова координатна система OXYZ, ориентирана така, че: ос OZ съвпада с равнината на свързване на рамата 1 към шасито на товарача; ос OX лежи в равнината на стоене на машината и се дава от пресечницата на тази равнина с равнината на симетрия на изпълнителния орган; ос OY е перпендикулярна на равнината XOZ и заедно с осите OX и OZ образува дясно ориентирана Декартова координатна система.

Разглеждат се положението на работния орган при врязване на празна кофата в масива на нивото, на равнината на стоене на товарача.

Разглеждаме тялото KLI (фиг. 4), което представлява кофата на товарача. На точка L действат силите P_t и P_3, чийто директриси и посоки вече са определени.

В шарнира I действа силата I, която идва от буталния прът на цилиндъра Ц2 и има посока на вектора GI, а в шарнира К има реакция разложена по двете оси на координатната система.

В условията на равномерно движение тялото KLI е в равновесие. Следователно може да се запише следната система от уравнения:



Фиг. 4. Сили, действащи на кофата на товарача

$$\begin{cases} \sum X_i = 0; -P_t + Kx + Ix = 0 \\ \sum Z_i = 0; P_3 - G_K + Iz + Kz = 0 \\ \sum M_{Ki} = 0; +P_3\,(x_L - x_K) - P_t(z_K - z_L) - \\ -Ix(z_I - z_K) + Iz(x_I - x_K) - G_K\frac{(x_L - x_K)}{2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Тази система е от три уравнения и за да бъде решена, трябва неизвестните да бъдат сведени до три. Това може да стане по следния начин. Хоризонталната и вертикалната съставна на силата от буталните прът на хидравличният цилиндри Ц$_2$ могат да бъдат заместени със силата в прта по следния начин:

$$Ix = I\cos\phi_{IG}\,, N \quad (6)$$

$$Iz = I\sin\phi_{IG}\,, N \quad (7)$$

Замествайки (1), (2), (3), (4), (6) и (7) в системата от уравнения (5), тя става с три неизвестни - I, Kx и Kz , като определянето им е елементарно от гледна точка на математиката.

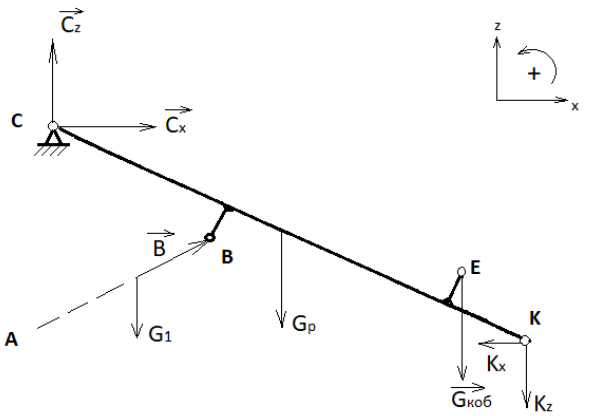
Следва да се разгледа тялото СВЕК (фиг. 5).

В шарнира В действа сила В, която представлява сила в буталния прът на цилиндър Ц$_1$. В точка К действат реакциите по двете оси на координатната система, като за ръката те са акции и са си сменили посоката.

В условията на равномерно движение, тялото СВЕК е в равновесие.

И тази система от уравнения е с три неизвестни след преобразуването на хоризонталните и вертикални съставни на силата в хидравличния цилиндър Ц$_1$.

Следователно може да се запише нова система от три уравнения:



Фиг. 5. Сили действащи на ръката на товарача

$$\begin{cases} \sum X_i = 0; -K_X + C_X + B_X = 0 \\ \sum Z_i = 0; -K_z - G_P - G_1 + C_Z - G_{\text{КОБ}} = 0 \\ \sum M_C = 0; -K_X(z_C - z_K) + B_X(z_C - z_B) - \\ +B_Z(x_B - x_C) - G_P\left(\frac{x_K - x_C}{2}\right) - \\ -G_1\left(\frac{x_B - x_A}{2} - x_C\right) - G_{\text{КОБ}}(x_E - x_C) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$B_Z = B\sin\phi_{AB}\,, N \quad (9)$$

$$B_X = B\cos\phi_{AB}\,, N \quad (10)$$

Замествайки (9) и (10) в системата от уравнения (8), тя става с три неизвестни – B, Cx и Cz, като определянето им става чрез известните ни от математиката методи.

С тази последователност на операциите съвсем елементарно се определят реакциите в точки О$_1$ и А.

Изводи

Изчислените сили и реакции са направени при някои предварителни приближения, като например масовия център на хидравличния цилиндър и ръката, приети на средата на съответните отсечки.

Най-голяма сила, получена при изчисляването на силите, е силата в хидравличните цилиндри. Това се доказва и след направено измерване и запис на налягането на маслото в цилиндрите на товарача.

Сравнявайки тази сила с максималната допустима сила в същите хидравлични цилиндри се вижда, че в условията на работа, те не са натоварени екстремно и работят в сравнително лек режим.

Получените резултати кореспондират с установени закономерности при изследване на силово натоварени машинни елементи и потвърждават приложимостта на аналитичния подход при оценка на конструктивната устойчивост (Тонкова, 2017; Тонкова, 2018).

Други изследвания (Тасев Л. 2023 и Тасев Л. 2024) съчетани с настоящото могат да послужат за цялостно проектиране на хидравличната система на челния товарач.

Литература

Гоберман, Л. А. (1988). Основы теории, расчета и проектирования строительных и дорожных машин. Машиностроение, Москва, 1988.

Тасев, Л. (2023). Методика за оразмеряване на кормилното управление на съчленени пневмо-колесни транспортни средства, Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”, Том 66, ISSN 2738-8808

Тасев, Л. (2024). Методика за оразмеряване на хидравличната система за разтоварване на коша на нископлатформени самосвали, Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”, Том 67, ISSN 2738-8808

Тонкова, Г. (2018). Изследване на якостно-деформационното състояние на динамично натоварен вал. *Академично списание „Индустриални технологии“*, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, ISSN: 1314-9911, том V (1), Бургас, 2018, стр. 70-77.

Тонкова Г., Тонков, Г. (2017). Изследване на якостно-деформационното състояние на силово натоварен вал в софтуерната среда на Inventor. *Академично списание „Индустриални технологии“*, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, ISSN: 1314-9911, том IV (1) 2017, стр. 64-74.

AN APPROACH USING *GEMINI* AND *NOTEBOOKLM* TO OPTIMISE THE PREPARATION OF COURSE UNITS IN COMPUTER SCIENCES

Nadelina Ranenska, Rosita Nesheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: n.ranenska@mgu.bg, rosita.nesheva@mgu.bg

ABSTRACT. The dynamic development of technology necessitates a continuous update of informatics syllabi, which increases the workload of educators in adapting teaching materials. Although artificial intelligence tools offer automation solutions, their blind application poses a risk of generating inaccurate or flawed technical information. This paper proposes an approach to optimising the preparation of practical lab sessions in informatics through the synergistic integration of the Gemini and NotebookLM models.

Gemini, as a broad-spectrum model for creative content generation, is utilised to create visual rubrics, develop variations of practical programming tasks with different difficulty levels, and design diverse real-world IT industry case studies that offer role-play simulations in an educational environment. NotebookLM, on the other hand, functions as a strictly bounded and verified knowledge base that supports the generation of self-study questions, tests, and the initial evaluation of research assignments based on a predefined framework (structure, citation count, formatting).

The application of this approach is built around the ‘the-human-in-the-loop’ concept, where technology and the human factor interact in a controlled manner. The proposed approach emphasises that technological automation is auxiliary in nature, while an instructor remains the leading figure whose continuous supervision and final word guarantee the preservation of academic standards and pedagogical value.

Keywords: informatics education, generative AI, Gemini, NotebookLM, human-in-the-loop.

ПОДХОД, ИЗПОЛЗВАЩ GEMINI И NOTEBOOKLM ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПОДГОТОВКАТА НА УЧЕБНИ ДИСЦИПЛИНИ ПО ИНФОРМАТИКА

Наделина Раненска, Росита Нешева,

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Динамичното развитие на технологиите налага постоянно обновяване на учебните програми по информатика, което означава увеличаване на натоварването на преподавателите при адаптиране на учебните материали. Въпреки че, инструментите с изкуствен интелект предлагат решения за автоматизация, сляпото им предлагане крие рискове от генериране на неточна или погрешна техническа информация. Настоящата статия предлага подход за оптимизиране на подготовката на практически упражнения по информатика чрез синергично интегриране на моделите Gemini и NotebookLM.

Gemini, като широко спектърен модел за генериране на творческо съдържание, е използван за създаване на оценъчни рубрики, създаване на разновидности на практически задачи по програмиране с различна трудност, създаване на различни казуси от реалната IT индустрия, предлагащи ролеви симулации в учебна среда. NotebookLM, от друга страна, функционира като строго ограничена и верифицирана база от знания, която подпомага генерирането на въпроси за самоподготовка, тестове, първоначално оценяване на реферати по зададена рамка (структура, брой източници, цитиране).

Прилагането на подхода е изградено около концепцията „Човекът в работния цикъл“, където технологията и човешкият фактор си взаимодействат контролирано. Предложеният подход подчертава, че технологичната автоматизация има спомагателен характер, докато преподавателят остава водеща фигура, чийто постоянен контрол и последна дума гарантират запазването на академичен стандарт и педагогическа стойност.

Ключови думи: обучение по информатика, ИИ в образованието, оптимизация на учебния процес, Gemini, NotebookLM.

Въведение

С все по-широкото навлизане на изкуствения интелект (ИИ) във всички сфери на живота ни, много често пред нас се изправя предизвикателството да оценим къде, колко и как да го използваме, така че да получим очакваните от нас резултати и в същото време те да са обективни. В пълния си смисъл това важи и за сферата на образованието. Интензивното развитие на технологиите налага постоянно адаптиране и подновяване на учебното съдържание, особено по дисциплини в областта на информатиката. Това, от своя страна, води до по-голямо натоварване на академичния състав.

Преподавателите във висшето образование често трябва да балансират между преподавателски задължения, административни задачи и изследователска дейност, което води до конфликти в разпределението на времето и преумора. Този процес може да се подпомогне от инструменти, базирани на ИИ, които предлагат решения за оптимизиране на рутинни задачи и подготовка на материали за практически упражнения. В тази връзка основната цел на интегрирането на изкуствен интелект е „развитие на информационните технологии на ново интелигентно ниво, а компютърните системи да станат по-полезни“, превръщайки се в ефективни „системи за подпомагане взимането на решения“ (Arsova-Borisova and Hristov, 2024). Според (OECD, 2026) целенасоченото използване на генеративен ИИ може значително да намали времето за планиране на уроци и ресурси без да прави компромис с качеството.

Настоящото изследване е насочено към преподаватели и предимно асистенти в направление Информатика във висши учебни заведения, търсещи надеждни методи за внедряване на генеративен изкуствен интелект в работния процес, без да отнема основната роля на преподавателя. „ИИ трябва да функционира като инструмент, който допълва и увеличава възможностите на преподавателя, като същият запазва пълния контрол, педагогическа преценка и професионална автономност“ (OECD, 2026).

Настоящата публикация предлага подход за оптимизиране на подготовката на практически упражнения чрез синергично и контролирано използване на два езикови модела с различна архитектурна логика – Gemini и NotebookLM.

Реализация

Технологичната автоматизация в образованието чрез инструменти с изкуствен интелект трябва да има строго спомагателен характер, а преподавателят остава водеща фигура, чийто постоянен контрол гарантира академичния стандарт. Както се отбелязва в официалното ръководство на ЮНЕСКО за генеративния изкуствен интелект в образованието, процесите на използване на тези технологии задължително трябва да гарантират „човешката отговорност за решенията, свързани с точността на генерираното от ИИ съдържание, стратегиите за преподаване или изследване (UNESCO, 2023)”.

Успешното реализиране на този контролиран подход е възможно чрез съчетаване на Gemini (широко спектърен модел за творческо съдържание) и NotebookLM (верифицирана база от знания). Управлявани чрез концепцията „Човекът в работния цикъл“, използването на двата модела значително намалява времето за подготовка на учебни дисциплини по информатика без риск от генериране на неточна или погрешна техническа информация.

Приложени методи

Метод на синергичната интеграция на ИИ модели:

Предложения подход е използван при подготовката на материали за упражнение и курсови проекти. Процесът на подготовка на материалите преминава през няколко етапа. За всяка дисциплина и конкретно занятие редът на използване на езиковите модели е различен и зависи от спецификата на темата и задачата, която трябва да се реализира. Реализирането на подхода е използвано за три типа задачи.

Първи тип задача

Първият тип задача е използван за генериране на казуси от IT индустрията по дисциплината „Облачни технологии“.

Генерирането на казуси, от своя страна, протича през няколко етапа, като първият етап обхваща създаването на самия казус или задача чрез Gemini. Казусите, поставят студентите в ситуация на реална бизнес среда. Ситуациите предлагат на студентите запознаване с характеристиката на зададената им длъжност, разбиране изискванията на клиентите и приложение на теоретичните знания в работещи решения. Длъжности като техническа поддръжка, системни инженери, IT консултанти или други са използвани за ролевите симулации. Според глобалния доклад *The 2026 AI Index Report* (Stanford HAI, 2026), моделът Gemini-3.1-Pro на Google води с резултат от 91,2% в MMLU-Pro (съвременен мултидисциплинарен стандарт за сравнително оценяване на логическото мислене и академичните познания на големите езикови модели), признат в различни научни дисциплини.

Следващият етап е контрол на техническата точност, реализиран от преподавателя с помощта на NotebookLM. Преподавателят предварително залага официалната техническа документация на разглежданата технология и терминологични стандарти. По тази документация преподавателят, с помощта на NotebookLM, дооформя генерирания от Gemini казус и генерира дискусионни въпроси, които да подпомогнат концептуалното разбиране на теоретичните основи. Процесът завършва с проверка от страна на преподавателя, за да се гарантира точността на техническата информация. Реализацията в учебната зала включва дискусия върху теоретичните основи на разглежданата технология и практическо решаване на казуса. Преподавателят функционира като ментор, насочвайки студентите при интерпретирането на техните професионални роли и при прилагането на теоретични знания в реални производствени сценарии.

Фиг. 1. Представяне на водещите модели в бенчмарка MMLU-Pro

Втори тип задача

Вторият тип задача, също е използван в дисциплината „Облачни технологии“ за прилагане на рамка за първоначално оценяване на реферати. Преподавателят зарежда рамката като инструкция в NotebookLM. След това същият качва предадените от студентите реферати директно в затворената среда на модела. Тъй като NotebookLM работи само с подадените му файлове, той проверява всеки реферат спрямо зададената рамка: изчислява броя на цитираните източници, проверява за наличие на задължителни структурни раздели и маркира пропуските като опорни точки. Използването на ИИ в този етап има само предварителен, технически характер. NotebookLM не поставя финални оценки и не заменя преподавателя. Моделът генерира кратък писмен отчет, за всеки реферат. Преподавателят чете този отчет, чете самия текст и взема окончателно решение за оценката. Това гарантира обективност, спестява време за рутинни проверки и запазва водещата роля на човешкия фактор.

Трети тип задача

Подходът още е използван и при подготовка на упражнения по дисциплината „Операционни системи“ за проектиране на задачи по Bash с програмиране с различни нива на трудност. Примерът, който е разгледан, използва работа с командата “grep”. Подготовката на материалите за упражненията започва с NotebookLM, където преподавателят предварително е качил официалния наръчник на Bash (в случая конкретно за командата grep), ръководства и учебници, използвани от катедрата. Допълнително се качва и един текстов файл с примерни

потребителски данни. Моделът извлича различните варианти на командата и специфичната синтактична структура (например за броене на редове или търсене на определена дума без значение дали буквите са малки или главни). Следва подаване на извлечената информация на Gemini, с инструкцията да създаде една задача с три нива на сложност.

Table 1. *Задачи с различни нива на сложност генерирани от Gemini*

Категория	Условие	Усвоени умения
Извличане на данни	Изведете всички студенти от специалност „Информатика“ и пребройте общия им брой във файла.	Филтриране по точен низ и използване на флага за броене на редове.
Локализиране в структура	Намерете студентите с оценка „отличен“ без значение от регистъра на буквите, и покажете номера на реда им във файла.	Комбиниране на флагове за игнориране на регистър и извеждане на индекс на ред.
Експорт и филтрация	Изведете всички студенти, които не са от „първи курс“ и запишете резултата в нов текстов файл.	Прилагане на обратно търсене чрез изключване и пренасочване на стандартния изход.

Преподавателят проверява формулираните условия на задачите преди студентите да имат досег с тях.

Метод на „Човекът в работния цикъл“

Концепцията „Човекът в работния цикъл“ седи изцяло зад приложението на предложения подход за синергично използване на двата езикови модела. Тази концепция подчертава, че ИИ изпълнява единствено ролята на технически асистент, докато преподавателят запазва пълния контрол върху съдържанието. В системния обзор на концепциите и методите за „Human-in-the-loop AI“ се посочва, че човешкият принос има оперативно въздействие върху всеки етап от управлението и надзора на моделите (*Entropy*, 2026). Това теоретично рамкира задължителното участие на преподавателя при филтрирането на задачите и материалите по информатика. Взаимодействието преминава през няколко последователни стъпки:

Подаване на контролиран контекст:

Преподавателят задава конкретните параметри за генериране (в Gemini) или ограничава рамката на знанието чрез качване на проверени текстови източници (в NotebookLM). Технологията не работи автономно, а се задвижва от дефинираните от човека педагогически цели. “Генеративният изкуствен интелект ще постига все по-надеждни резултати, когато работи по предварително зададен шаблон, изграден върху валидирани данни. Например резултатите от анализ на милиони изтекли пароли могат да бъдат използвани за дефиниране на правила, които ограничават често срещани човешки предпочитания, като предвидимите комбинации от символи и най-разпространените дължини на паролите. При подаване на подобен шаблон генеративният модел може да подпомогне за създаването на по-сигурни пароли, които не следват установените човешки модели” (Drankov, 2022).

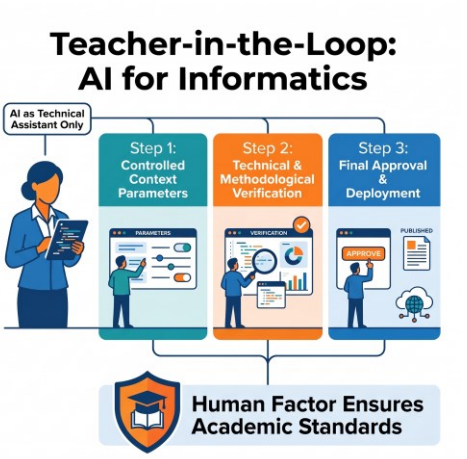
Задължителна техническа и методическа верификация:

Нито един материал, генериран от изкуствен интелект, не се предоставя директно на студентите в суров вид. Преподавателят извършва детайлна проверка за наличие на халюцинации, синтактични грешки в кода (при Bash примерите) или фактологически разминавания с учебната програма. На този етап текстовете се редактират ръчно.

Финална санкция и внедряване:

Преподавателят дава финалното одобрение на материалите (казуси, лабораторни задачи, оценъчни отчети). Само след тази окончателна санкция съдържанието се въвежда в учебния процес.

Чрез тази филтрация технологичната автоматизация подпомага бързината на подготовката извън компютърната зала, но човешкият фактор остава водещ, за да гарантира запазването на академичния стандарт и педагогическата стойност на обучението.



Фиг. 2. “Човекът в работния цикъл“

Резултати

Постигнатите резултати се виждат най-ясно в три основни направления:

Времева ефективност:

Използването на двата езикови модела Gemini и NotebooLM съкращава наполовина времето за подготовка на лабораторни упражнения. Прилагането на подхода в курса по Облачни технологии показва средно 50% съкращаване на времето за методически дизайн. Проектирането на нов практически казус и съпътстващите го ролеви инструкции отнема средно 45 минути, в сравнение с традиционните 90 до 120 минути при изцяло ръчно разработване.

Разнообразие на учебното съдържание:

Прилагането на комбинирания подход постига дидактическо разнообразие в рамките на едно упражнение. Предлагането на няколко различни сценария по време на

едно лабораторно упражнение става възможно с помощта на използването на езиковите модели като асистенти за генериране на учебни материали. На второ място, автоматизираното мащабиране на сложността при задачите по Bash-програмиране осигурява гъвкавост в учебната зала. Докато една част от групата усвоява базовия синтаксис, по-напредналите студенти получават технически по-трудни задачи. Синергията между двата модела позволява диференцирано обучение, което поддържа мотивацията на студентите с различни нива на предварителна подготовка, без да се увеличава времето за подготовка на преподавателя.

Надеждност на оценяване:

Резултатите от прилагането на NotebookLM при рамковото оценяване на студентски реферати показва значително оптимизиране на административната дейност на преподавателя. На първо място, моделът елиминира субективния фактор и възможни пропуски при техническата проверка на структурни компоненти. Чрез този първичен филтър се спестява до 60% от времето за преглед на брой налични източници и правилно цитиране. Това време преподавателят може да пренасочи за по-задълбочено оценяване на техническата компетентност и инженерните решения на студента. В резултат на това, студентите получават по-детайлна и бърза обратна връзка без да се е увеличило натоварването на преподавателя.

Навлизането на генеративен изкуствен интелект в подготовката на курсове по информатика разкрива нови възможности, но и специфични рискове. Основният проблем при по-широко спектърни модели като Gemini е рискът от технически „халюцинации“, представляващи генериране на неточна фактология или неработещ изходен код. Сляпото доверие към подобни инструменти в академична среда е недопустимо, тъй като това би компрометирало качеството на обучението. Предложеният в настоящата разработка подход драстично намалява този риск чрез два защитни филтъра:

1. *Архитектурна изолация чрез NotebookLM*. Чрез ограничаването на базовия модел до затворена среда, съставена само от официални източници (официална документация, учебни пособия, наръчници, Linux man страници), възможността за генериране на фактологически грешни команди (например при Bash упражненията с grep) се свежда до минимум. “Основното предимство се крие в неговата архитектура за генериране с добавено извличане (RAG), която базира резултатите стриктно качени от потребителя документи-източници. Този дизайн значително намалява халюцинациите, което представлява генерирането на неточна или измислена информация, и повишава надеждността и прозрачността на отговорите на изкуствения интелект” (Reyna, 2024). Друго проучване също твърди: „Качествено установихме, че RAG моделите халюцинират по-малко и генерират фактологично верен текст по-често от *BART (Lewis et al., 2020)“.*
2. *Задължителен преподавателски контрол*. Концепцията „Човекът в работния цикъл“ гарантира, че ИИ не взима финални решения. Преподавателят остава водеща фигура, която верифицира педагогическата стойност на всеки казус при внедряването му.

Ограничения на подхода

Въпреки постигнатата оптимизация на времето, подходът има своите ограничения. Прилагането му изисква от преподавателя специфични умения за прецизно конструиране на инструкциите (prompt engineering). Освен това, при високо специализирани или твърде динамично променящи се облачни технологии, моделите могат да срещнат трудност, ако качената документация не се обновява своевременно от преподавателя. Автоматизираното филтриране на реферати в NotebookLM също е ограничено до формалните критерии (структура и брой източници), докато по-задълбоченото проверяване на съдържанието остава изцяло задача на човека.

Заключение

Предложеният подход успешно доказва, че модели като Gemini и NotebookLM могат да играят ролята на мощен сътрудник в подготовката на учебни материали по информатика, стига да се използват контролирано. Синергичното използване на двата езикови модела установява, че автоматизацията на рутинни процеси съкращава времето за подготовка наполовина. Спестеното време, като ценен ресурс за преподавателя, може да бъде пренасочено в полза на студентите, осигурявайки индивидуален подход и допълнителни практически задачи. Концепцията „Човекът в работния цикъл“ потвърждава, че използването на ИИ има само спомагателен характер и крайното качество на учебните материали зависят изцяло от постоянния контрол, уменията за инженерни запитвания и финалната дума на преподавателя.

Литература

Drankov, I. (2022). Improving Password Generation Using Bias from Leaked Data. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski*”, vol. 65, pp. 119–121, 2022.

Arsova-Borisova, K. and Hristov, V. (2024). Peculiarities of Optimization Tasks in Intelligent Systems. *Annual of the Mining and Geology “St. Ivan Rilski*, vol. 67, pp. 203–207, 2024, doi: 10.5281/zenodo.13762802.

Lazaros, K., Vrahatis, A. G., & Kotsiantis, S. (2026). Human-in-the-Loop Artificial Intelligence. *A Systematic Review of Concepts, Methods, and Applications. Entropy, 28(4),* 377. https://doi.org/10.3390/e28040377

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W.-T., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *In Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems* (Article 793, pp. 9459–9474). Curran Associates Inc.

OECD. (2026). *OECD Digital Education Outlook 2026: Exploring Effective Uses of Generative AI in Education*, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/062a7394-en.

Reyna, J. (2025). *The Potential of Google NotebookLM for Teaching and Learning*. The Royal Australian and New Zealand College of Ophthalmologists (RANZCO).

Sha Sajadieh, Loredana Fattorini, Raymond Perrault, Yolanda Gil, Vanessa Parli, Lapo Santarlasci, Juan Pava, Nestor Maslej, Russ Altman, Erik Brynjolfsson, Carla Brodley, Jack Clark, Virginia Dignum, Vipin Kumar, James Landay, Terah Lyons, James Manyika, Juan Carlos Niebles, Yoav Shoham, Elham Tabassi, Russell Wald, Toby Walsh, Dan Weld. "*The AI Index 2026 Annual Report," AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI*, Stanford University, Stanford, CA, April 2026. https://doi.org/10.48550/arXiv.2606.15708

UNESCO. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. https://doi.org/10.54675/EWZM9535

SOFTWARE TOOLS AND METHODS USED FOR MISSING DATA IMPUTATION IN AIR POLLUTION MONITORING OF PARTICULATE MATTER

Desislava Simeonova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: desysimeonova@mgu.bg

ABSTRACT. Missing values constitute a significant challenge in processing data obtained from automatic and citizen-operated air quality monitoring stations. Measurement interruptions may result from technical failures, communication problems, scheduled maintenance, adverse weather conditions, or the removal of invalid observations. In datasets containing concentrations of particulate matter with an aerodynamic diameter of up to 10 µm (PM10), missing observations disrupt the temporal structure of the data, hinder exposure assessment, and may introduce systematic bias into statistical analyses. This article provides an overview of the principal imputation methods and the software tools used for their implementation. The methods examined include simple statistical substitution, interpolation techniques, time-series methods, multiple imputation, the k-nearest neighbours method, Random Forest, and contemporary machine-learning and deep-learning models. The capabilities of Microsoft Excel, R, Python, MATLAB, KNIME, and Orange are compared. A methodology is proposed for selecting and validating an appropriate imputation method for daily PM10 data combined with complete meteorological observations. The main conclusion is that the most suitable method should be selected empirically according to the missing-data mechanism, the duration of measurement gaps, seasonal patterns, and the availability of additional predictors.

Key words: missing data; imputation; PM10; air quality; machine learning.

СОФТУЕРНИ СРЕДСТВА И МЕТОДИ, ПРИЛАГАНИ ЗА ИМПУТАЦИЯ НА ЛИПСВАЩИ ДАННИ ПРИ ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ВЪЗДУХА С ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ

Десислава Симеонова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Липсващите стойности са съществен проблем при обработването на данни от автоматични и любителски станции за мониторинг на качеството на въздуха. Прекъсванията в измерванията могат да бъдат причинени от технически неизправности, комуникационни проблеми, профилактика, неблагоприятни атмосферни условия или филтриране на невалидни наблюдения. При концентрациите на фини прахови частици с аеродинамичен диаметър до 10 µm (PM10) пропуските нарушават времевата структура, затрудняват оценяването на експозицията и могат да доведат до систематично изкривяване на статистическите анализи. Настоящата статия представя обзор на основните методи за импутация и на софтуерните средства за тяхното прилагане. Разгледани са прости статистически замествания, интерполационни техники, методи за времеви редове, множествена импутация, методът на k най-близките съседи, Random Forest и съвременни модели за машинно и дълбоко обучение. Сравнени са възможностите на Microsoft Excel, R, Python, MATLAB, KNIME и Orange. Предложена е методология за избор и валидиране на метод за импутация при ежедневни данни за PM10 в комбинация с пълни метеорологични наблюдения. Основният извод е, че подходящият метод трябва да се избира емпирично според механизма на липсване, продължителността на прекъсванията, сезонността и наличието на допълнителни предиктори.

Ключови думи: липсващи данни; импутация; PM10; качество на въздуха; машинно обучение.

1. Въведение

Надеждното наблюдение на атмосферното замърсяване изисква непрекъснати и съпоставими измервания. Фините прахови частици с аеродинамичен диаметър до 10 µm (PM10) са сред основните показатели за качество на въздуха и са включени в глобалните препоръки на Световната здравна организация (World Health Organization, 2021). Независимо от използваната измервателна инфраструктура, реалните масиви често съдържат пропуски. При официалните станции те могат да възникнат вследствие на калибриране, профилактика и технически откази, а при нискобюджетните и любителските станции допълнителни причини са прекъсване на електрозахранването, нестабилна интернет връзка, замърсяване на оптичния сензор и автоматично отстраняване на стойности извън допустимите граници.

Липсващите стойности не са само технически недостатък. Те могат да променят средните концентрации, вариацията, честотата на превишенията и оценката на сезонните зависимости. Особено проблемни са пропуските през периоди с високо замърсяване, защото запълването им със средни стойности систематично изглажда пиковете. Класическата теория разграничава механизмите „липсващи напълно случайно“ (Missing Completely at Random, MCAR), „липсващи случайно при условие на наблюдаваните данни“ (Missing at Random, MAR) и „липсващи неслучайно“ (Missing Not at Random, MNAR). Съвременната статистическа рамка подчертава, че изборът на метод, анализът на несигурността и чувствителността на изводите трябва да се разглеждат съвместно (Rubin, 1976; Little & Rubin, 2019; Carpenter & Smuk, 2021).

Целта на статията е да систематизира основните методи и софтуерни средства за импутация на липсващи данни при изследвания на замърсяването на въздуха с фини прахови частици и да предложи практически приложима схема за избор и оценяване на методите.

2. Особености на липсващите данни при мониторинг на PM10

2.1. Механизми и модели на липсване

При MCAR липсването не зависи нито от наблюдаваните, нито от липсващите стойности. В екологичния мониторинг такъв случай може да бъде случаен краткотраен срив на комуникацията. При MAR вероятността за липсване зависи от налични променливи, например от влажност, температура или натоварване на сензора. При MNAR липсата е свързано със самата

ненаблюдавана концентрация, например когато сензорът отказва или стойностите се отхвърлят по-често при екстремно замърсяване. MAR често е работното предположение при множествена импутация, но то не може да бъде доказано само от наблюдаваните данни и изисква анализ на чувствителността и ясно формулиране на допусканията (Rubin, 1976; Little & Rubin, 2019; Carpenter & Smuk, 2021).

Практически важна е и геометрията на пропуските: единични липсващи наблюдения, кратки последователни интервали, дълги блокове, периодични пропуски или пропуски в няколко станции едновременно. Един и същ алгоритъм може да бъде точен при единични стойности и неадекватен при многодневно прекъсване.

2.2. Времеви, метеорологични и пространствени зависимости

Концентрациите на PM10 имат автокорелация, сезонност и зависимост от метеорологичните условия. Температурата, относителната влажност, скоростта и посоката на вятъра, атмосферното налягане, валежите и устойчивостта на атмосферата могат да бъдат полезни предиктори. При наличие на няколко станции пространствената корелация допълнително повишава възможностите за възстановяване на липсващи стойности. Изследванията върху данни за качество на въздуха показват, че многомерните подходи често превъзхождат простата интерполация, когато съществуват информативни допълнителни променливи (Junninen et al., 2004; Hadeed et al., 2020).

3. Основни методи за импутация

3.1. Прости статистически замествания

Най-лесните подходи заменят липсващата стойност със средна, медиана, месечна средна или средна стойност за съответния сезон. Те са бързи, прозрачни и подходящи като базова линия за сравнение. Основният им недостатък е намаляването на дисперсията и отслабването на корелациите. При данни за PM10 глобалната средна стойност е особено неподходяща, защото не запазва сезонните пикове и епизодите с висока концентрация.

Методът „последно наблюдение, пренесено напред“ (Last Observation Carried Forward, LOCF) и методът „следващо наблюдение, пренесено назад“ (Next Observation Carried Backward, NOCB) използват съответно последната или следващата наблюдавана стойност. Те могат да бъдат приемливи при много кратки прекъсвания и бавно променящи се серии, но създават изкуствени хоризонтални участъци и не трябва да се прилагат механично при динамични епизоди.

3.2. Интерполационни методи

Линейната интерполация изчислява стойности по правата между две известни наблюдения и обикновено работи добре за единични пропуски или кратки блокове. Сплайн интерполацията използва гладка функция и може по-добре да следва нелинейни промени, но при краищата на серията и при дълги прекъсвания е възможно да създаде нереалистични стойности. Класическо сравнително изследване върху данни за качество на въздуха включва линейна, сплайн и nearest-neighbour интерполация наред с многомерни модели (Junninen et al., 2004).

3.3. Методи за времеви редове

Методите за времеви редове използват автокорелацията и сезонната структура. Плъзгащата средна и сезонното разлагане са приложими когато редът показва устойчив периодичен модел. Авторегресивният интегриран модел с плъзгаща средна (Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA) и сезонният авторегресивен интегриран модел с плъзгаща средна (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average, SARIMA) могат да моделират авторегресивни и сезонни компоненти. Калмановото изглаждане оценява скритото състояние на динамична система и използва информацията преди и след пропуска. Пакетът imputeTS в R среда, обединява средна стойност, LOCF, интерполация, плъзгаща средна, сезонно разлагане и Калманово изглаждане върху структурни и ARIMA модели (Moritz & Bartz-Beielstein, 2017).

3.4. Регресионна и множествена импутация

При регресионната импутация липсващата концентрация се прогнозира чрез метеорологични, календарни и лагови променливи. Линейната регресия е интерпретируема, но може да бъде недостатъчна при нелинейни зависимости. Методът за съпоставяне по прогнозната средна стойност (Predictive Mean Matching, PMM) съчетава регресионен модел с използване на реално наблюдавани стойности от набора от данни. Той не поставя директно стойността, изчислена от регресионния модел, а избира подходяща реално наблюдавана стойност. Чрез този подход импутираните стойности се ограничават до правдоподобни наблюдавани стойности, което е особено полезно при асиметрични разпределения.

Множествената импутация създава няколко завършени набора и комбинира резултатите от анализа, като по този начин отчита несигурността на възстановените стойности. Методът „множествена импутация чрез верижни уравнения“ (Multiple Imputation by Chained Equations, MICE) задава последователно условен модел за всяка променлива с липсващи стойности. При всяка итерация дадена непълна променлива се разглежда като зависима, а останалите променливи се използват като предиктори. Процедурата преминава многократно през всички непълни променливи до стабилизиране на импутираните стойности. Методът е реализиран в широко използвания пакет mice за статистическата среда R (van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011). За времеви редове трябва изрично да се включат лагове, сезонни индикатори и други характеристики, защото стандартният алгоритъм не кодира автоматично времевата структура.

3.5. Метод на k най-близките съседи (KNN) и дървовидни модели

При метода KNN липсващата стойност се импутира въз основа на *k* най-сходни наблюдения, където *k* е предварително зададеният брой съседи. Сходството обикновено се оценява чрез разстояние между наблюденията, например евклидово разстояние. При количествени променливи липсващата стойност се изчислява като средна или претеглена средна на стойностите на най-близките съседи, а при категорийни

променливи се използва най-често срещаната категория. При данни за PM10 сходството може да се определя чрез температура, влажност, вятър, налягане, месец, ден от седмицата и лагови стойности. Методът е интуитивен и улавя локални зависимости, но е чувствителен към мащабирането, избора на k и наличието на нерелевантни предиктори.

Random Forest и missForest моделират нелинейни зависимости и взаимодействия без предварително зададена функционална форма. missForest е непараметричен алгоритъм за смесени типове данни (Stekhoven & Bühlmann, 2012). При големи масиви изчислителната цена е по-висока, а резултатите са по-трудни за интерпретация от линейните модели.

3.6. Дълбоко обучение

Двупосочната рекурентна импутация за времеви редове (Bidirectional Recurrent Imputation for Time Series, BRITS) и многопосочната рекурентна невронна мрежа (Multi-directional Recurrent Neural Network, M-RNN) използват рекурентни невронни мрежи. Моделът за импутация чрез самовнимание при времеви редове (Self-Attention-based Imputation for Time Series, SAITS) прилага механизъм на самовнимание, а по-нови трансформърни и дифузионни модели се стремят да описват сложни времеви и междупроменливи зависимости. Оригиналният модел BRITS извършва двупосочна рекурентна импутация и оптимизира възстановяването съвместно с последващи задачи (Cao et al., 2018), докато SAITS използва блокове с диагонално маскирано самовнимание (Du et al., 2023). При данни за качество на въздуха са предложени и архитектури „от край до край“ (end-to-end), които обучават модела директно върху непълния времеви ред (Kim et al., 2021). Сравнителните изследвания показват, че няма универсално най-добър алгоритъм за всички набори и сценарии на липсване (Hua et al., 2024; Kim et al., 2021). Тези модели изискват големи и разнообразни обучаващи масиви, настройване на множество хиперпараметри и строг контрол срещу изтичане на информация. При кратък запис от една любителска станция рискът от преобучение е съществен и сложният модел може да възпроизведе шум или локални особености вместо обобщими зависимости.

4. Софтуерни средства

4.1. Microsoft Excel

Excel позволява откриване на празни клетки, изчисляване на групови средни, линейна интерполация, регресионна прогноза чрез функцията FORECAST.LINEAR и експоненциално изглаждане чрез алгоритъма „грешка–тенденция–сезонност“ (Error, Trend, Seasonality, ETS) във функцията FORECAST.ETS.

Предимствата са достъпният интерфейс и визуалният контрол. Ограниченията са трудната възпроизводимост, рискът от ръчни грешки, липсата на цялостна множествена импутация и неудобството при системно сравняване на много сценарии. Excel е подходящ за предварително проучване, обучение и кратки пропуски, но не е препоръчителен като единствена среда за сложна научна методология.

4.2. Език за програмиране R

R е език за програмиране и среда за статистически изчисления, която предлага специализирани пакети за статистически анализ, обработка и импутация на данни. Пакетът imputeTS е предназначен основно за импутация на липсващи стойности в едномерни, равномерно разположени във времето редове и включва методи, базирани на интерполация, сезонно разлагане и Калманово изглаждане (Moritz & Bartz-Beielstein, 2017).

Пакетът mice реализира множествена импутация чрез верижни уравнения (Multiple Imputation by Chained Equations, MICE), базирана на последователни условни модели (Fully Conditional Specification, FCS), като поддържа различни методи за импутация, включително Predictive Mean Matching (PMM) (van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011).

Пакетът missForest реализира непараметрична итеративна импутация, базирана на алгоритъма Random Forest (Stekhoven & Bühlmann, 2012). Методът може да обработва едновременно числови и категорийни променливи и не изисква предварително задаване на конкретна функционална форма на зависимостите между тях.

Пакетът VIM (Visualization and Imputation of Missing Values) предоставя средства за визуализация и изследване на структурата и моделите на липсващите данни, както и функции за тяхната импутация. Той подпомага предварителния анализ на липсите и оценката на връзките между липсващи и наблюдавани стойности.

Сред основните предимства на R са възпроизводимостта на анализа, статистическата прозрачност, богатите възможности за визуализация и наличието на специализирани пакети за прилагане и сравнение на различни методи за импутация. Сред ограниченията могат да се посочат необходимостта от умения за програмиране и правилно задаване на структурата на данните и времевите редове.

4.3. Език за програмиране Python

Python съчетава възможности за обработка на данни, статистически анализ и машинно обучение. Библиотеката pandas предоставя функции и средства за времева интерполация и групови трансформации при обработката на липсващи стойности.

Библиотеката scikit-learn включва методите SimpleImputer, KNNImputer и IterativeImputer. Последният оценява последователно всяка характеристика с липсващи стойности чрез модел, в който останалите характеристики се използват като предиктори. IterativeImputer следва основната концепция на MICE – последователно условно моделиране на променливите – но в стандартната си конфигурация обикновено се използва за получаване на единично импутиран набор от данни. За реализиране на множествена импутация е необходимо допълнително организиране на стохастични повторения. Тази концептуална близост улеснява методологичното съпоставяне на анализите, реализирани в R и Python.

Библиотеката statsmodels предоставя средства за моделиране на времеви редове, включително ARIMA и модели в пространството на състоянията, а други специализирани библиотеки разширяват възможностите към алгоритми за машинно и дълбоко обучение. Сред основните предимства на Python са възможностите за

работа с големи масиви от данни, автоматизиране на аналитични конвейери и интегриране на методите за импутация с прогнозни и машиннообучаващи системи.

4.4. MATLAB, KNIME и Orange

MATLAB предоставя функции за откриване и запълване на липсващи стойности, включително заместване със средна или медиана, интерполация по метода на най-близката съседна стойност, линейна и сплайн интерполация чрез функцията fillmissing. Средата разполага и с инструменти за Калманова филтрация, обработка на сигнали, числено моделиране, машинно обучение и невронни мрежи.

Платформата KNIME (Konstanz Information Miner) разполага с възела Missing Value и позволява изграждането на възпроизводими визуални работни процеси за предварителна обработка на данните, импутация, моделиране и оценяване на получените резултати.

Orange предоставя компонента Impute, чрез който липсващите стойности могат да бъдат заменяни със средна или най-честа стойност, да бъдат третирани като отделна категория или да бъдат оценявани чрез моделно базирани подходи.

Основно предимство на KNIME и Orange е възможността за изграждане на аналитични работни процеси чрез графичен интерфейс, което ги прави подходящи за обучение, прототипиране и анализ без необходимост от интензивно програмиране. Използването на визуална среда обаче не отменя необходимостта от коректна статистическа постановка, предотвратяване на изтичането на информация между обучаващи и тестови данни и прилагане на подходящо времево валидиране при анализ на времеви редове.

В таблица 1 е представено сравнение на предимствата и слабостите на основните софтуерни среди.

Таблица 1. *Сравнение на основните софтуерни среди*

Среда	Методи	Гъвкавост	Програмиране	Подходяща употреба
Excel	Средна стойност; интерполация; експоненциално изглаждане „грешка–тенденция–сезонност“ (ETS)	Ограничена	Ниска	Начален анализ и кратки пропуски
R	Множествена импутация чрез верижни уравнения (MICE); Калманово изглаждане; авторегресивен интегриран модел с плъзгаща средна (ARIMA); Random Forest; интерполация	Много висока	Средна/висока	Научни изследвания и възпроизводим анализ
Python	Метод на k най-близките съседи (KNN); итеративна импутация; машинно и дълбоко обучение; ARIMA	Много висока	Средна/висока	Големи данни и автоматизация
MATLAB	Калманово изглаждане; интерполация; машинно обучение	Висока	Висока	Инженерни и динамични модели
Konstanz Information Miner (KNIME) / Orange	KNN; дървовидни модели; компоненти за машинно обучение	Средна	Ниска	Визуални работни процеси

5. Препоръчителна методология за данни за PM10

5.1. Предварителен анализ

Преди импутация трябва да се проверят времевите индекси, дублираните записи, физически невъзможните стойности и съответствието на използваните мерни единици, например μg/m³ за концентрацията на PM10. Необходимо е да се изчислят общият процент липсващи стойности, дължината на всеки блок и разпределението им по месеци, сезони и часове. Пропуските не бива да се смесват с измервания под границата на откриване или с нулеви концентрации.

5.2. Формиране на предиктори

При ежедневни данни за PM10 и пълни метеорологични наблюдения се препоръчва включване на температура, точка на оросяване, влажност, налягане, валежи, скорост и при възможност посока на вятъра. Полезни времеви характеристики са сезон, ден от седмицата, лагове на PM10 от 1, 2, 3 и 7 дни и плъзгащи средни. Месецът и денят от годината не трябва механично да се подават като последователни числа при KNN, невронни мрежи и други модели, чувствителни към разстоянията. За запазване на цикличността се препоръчват трансформациите $\sin(2\pi t/T)$ и $\cos(2\pi t/T)$, където t е позицията в цикъла, а T е неговата дължина. Така 31 декември и 1 януари се представят като близки, а не като противоположни краища на числова скала. При наличие на други станции могат да се добавят едновременни и лагови концентрации от пространствено близки точки.

5.3. Сравнявани методи

За балансиран експериментален дизайн е достатъчно да се сравнят поне пет метода: сезонна медиана като базова линия, линейна интерполация, Калманово изглаждане, KNN и многомерна импутация чрез MICE или Random Forest. Това покрива прости, времеви и многомерни подходи. Дълбок модел е оправдан, когато има достатъчно дълъг многомерен ред и значителни блокови пропуски.

5.4. Валидиране чрез контролирано премахване

Оценката трябва да използва само първоначално наблюдавани стойности. От пълни участъци се премахват изкуствено единични точки и блокове с дължини, сходни на реалните пропуски. Процедурата се повтаря многократно и за различни сезони. Случайното разбъркване на редовете е неподходящо, защото нарушава времевата структура. Важно е обучаващите данни да предхождат тестовия интервал или маскирането да бъде организирано блоково.

Като показатели се използват средна абсолютна грешка (Mean Absolute Error, MAE), корен от средната квадратична грешка (Root Mean Squared Error, RMSE), нормализирана RMSE, систематично отклонение (bias) и коефициент на детерминираност. За екологичната интерпретация трябва допълнително да се сравнят средните, медианите, стандартните отклонения, високите квантили и броят дни над избран праг. При PM10 е целесъобразно да се оцени и възстановяването на дните над 50 μg/m³ – средноденонощната гранична стойност, използвана в европейската нормативна рамка през разглеждания период (European Parliament and Council, 2008). Наблюдаваното превишение се приема като положителен клас, а импутираното – като прогнозирана класификация; изчисляват се точност на положителните прогнози (precision), чувствителност (recall) и F1-мярка (F1-score). Чувствителността показва каква част от действителните превишения са запазени, а точността на положителните прогнози – каква част от определените от метода превишения са реални. Ниска RMSE не е достатъчна, ако методът систематично потиска пиковете под нормативния праг. Сравнителните изследвания върху данни за PM10 и други атмосферни замърсители потвърждават необходимостта от оценка при различни проценти, сезони и структури на липсване (Hadeed et al., 2020; Hua et al., 2024; Kebalepile et al., 2024).

5.5. Анализ на чувствителността

Препоръчва се провеждането на анализ на чувствителността чрез сравнение на резултатите, получени с поне два алтернативни метода за импутация, както и чрез отделно оценяване на тяхната ефективност при кратки и продължителни последователности от липсващи стойности. По този начин може да се установи доколко крайните резултати и изводи зависят от избрания метод и от дължината на пропуските.

При съмнение за механизъм MNAR (Missing Not At Random) е целесъобразно да се разгледат допълнителни сценарии, при които действителните липсващи стойности се приемат за систематично по-високи или по-ниски от първоначално импутираните. Сравнението на резултатите при тези сценарии позволява да се оцени устойчивостта на заключенията спрямо различни допускания за механизма на липсване.

6. Обобщение

Прегледът показва, че изборът на метод не трябва да се основава единствено на наличния софтуер. Простите техники са полезни като референтни модели и при много кратки пропуски, но често намаляват вариацията. Методите за времеви редове са естествен избор при ясно изразена автокорелация и сезонност. Многомерните модели имат предимство, когато метеорологичните променливи и съседните станции съдържат информация за липсващата концентрация. Съвременните дълбоки модели могат да бъдат точни, но усложняват обяснимостта и изискват по-голям обем данни.

За типично изследване с ежедневни PM10 данни от любителска станция и пълни метеорологични показатели най-практичната комбинация е R или Python. R предлага непосредствен достъп до imputeTS, mice и missForest, докато Python е удобен за изграждане на автоматизиран конвейер и сравняване на машиннообучителни модели. Excel може да остане помощен инструмент за визуална проверка, но не трябва да бъде единствен източник на възпроизводимост.

Съществено ограничение на всеки обзор е бързото развитие на методите. Нови архитектури могат да превъзхождат класическите алгоритми върху конкретен набор, но това не отменя необходимостта от локална валидация. Резултатите от една станция, период или климатична зона не трябва автоматично да се пренасят към друга.

7. Заключение

Импутацията на липсващи данни за фини прахови частици е методологичен, а не само технически етап. Коректното решение изисква анализ на механизма и структурата на липсване, използване на времеви и метеорологични зависимости и валидиране върху контролирано създадени пропуски. За кратки интервали линейната интерполация може да бъде достатъчна. При сезонни редове са подходящи Калманово изглаждане и сезонни модели, а при наличие на пълни метеорологични променливи трябва да се оценят KNN, MICE и Random Forest. R и Python осигуряват най-добра комбинация от гъвкавост, възпроизводимост и разнообразие от методи. Окончателният избор следва да се базира на MAE и RMSE, запазването на разпределението и способността за възстановяване на пиковите концентрации, а не единствено на удобството на програмния продукт.

Литература

Cao, W., Wang, D., Li, J., Zhou, H., Li, L., & Li, Y. (2018). BRITS: Bidirectional recurrent imputation for time series. Advances in Neural Information Processing Systems, 31, 6775–6785.

Carpenter, J. R., & Smuk, M. (2021). Missing data: A statistical framework for practice. Biometrical Journal, 63(5), 915–947. https://doi.org/10.1002/bimj.202000196

Du, W., Cote, D., & Liu, Y. (2023). SAITS: Self-attention-based imputation for time series. Expert Systems with Applications, 219, 119619. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119619

European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union, L 152, 1–44 https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj

Hadeed, S. J., O'Rourke, M. K., Burgess, J. L., Harris, R. B., & Canales, R. A. (2020). Imputation methods for addressing missing data in short-term monitoring of air pollutants. Science of the Total Environment, 730, 139140. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139140

Hua, V., Nguyen, T., Dao, M.-S., Nguyen, H. D., & Nguyen, B. T. (2024). The impact of data imputation on air quality prediction problem. *PLOS ONE, 19*(9), e0306303. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306303

Junninen, H., Niska, H., Tuppurainen, K., Ruuskanen, J., & Kolehmainen, M. (2004). Methods for imputation of missing values in air quality data sets. *Atmospheric Environment, 38*(18), 2895–2907. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.026

Kebalepile, M. M., Dzikiti, L. N., & Voyi, K. (2024). Using diverse data sources to impute missing air quality data collected in a resource-limited setting. *Atmosphere, 15*(3), 303. https://doi.org/10.3390/atmos15030303

Kim, T., Kim, J., Yang, W., Lee, H., & Choo, J. (2021). Missing value imputation of time-series air-quality data via deep neural networks. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(22), 12213. https://doi.org/10.3390/ijerph182212213

Little, R. J. A., & Rubin, D. B. (2019). *Statistical analysis with missing data* (3rd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119482260

Moritz, S., & Bartz-Beielstein, T. (2017). imputeTS: Time series missing value imputation in R. *The R Journal, 9*(1), 207–218. https://doi.org/10.32614/RJ-2017-009

Rubin, D. B. (1976). Inference and missing data. *Biometrika, 63*(3), 581–592. https://doi.org/10.1093/biomet/63.3.581

Stekhoven, D. J., & Bühlmann, P. (2012). MissForest—Non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics, 28*(1), 112–118. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597

van Buuren, S., & Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). mice: Multivariate imputation by chained equations in R. *Journal of Statistical Software, 45*(3), 1–67. https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

THREE-POINT GRIP IN WEIGHTLESSNESS

Pavel Sinilkov

Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, E-mail: sinilkov@mail.com

ABSTRACT. By ensuring secure logistics in the Solar System, it is possible to launch a space industry, which will initially be carried out by extracting minerals and fuels from space bodies. First, these will be small space bodies, such as meteorites and comets, and later we will proceed to mastering space bodies like planets. This in turn requires a direct connection between astronautics and robotics, requiring a drastic change in the design of spacecraft. It is of great importance to study the physical phenomena associated with the grip of two or more bodies in weightlessness. The present material will try to shed some light in this area.

Key words:. support, grip, space body, space industry.

ТРИТОЧКОВ ЗАХВАТ В УСЛОВИЯТА НА БЕЗТЕГЛОВНОСТ

Павел Синилков

Институт по Роботика – Българска академия на науките, 1113 София

РЕЗЮМЕ. При осигуряване на сигурна логистика в Слънчевата система е възможно стартирането на космическа промишленост, която ще се осъществи първоначално с добиването на полезни изкопаеми и горива от космическите тела. Това първоначално ще са малките космически тела като метеорити и астероиди, като в последствие ще се пристъпи и към овладяването на космически тела от рода на планетите. Това от своя страна налага пряка връзка между космонавтиката и роботиката, изисквайки драстично изменение на конструкцията на космическите кораби. От голямо значение е да се изучат физичните явления свързани със захвата на две и повече тела в условията на безтегловност . Настоящия материал ще се опита да хвърли малко светлина в тази област.

Ключови думи: опора, захват, космическо тяло, космическа индустрия.

Introduction

All meteorites considered in this material are assumed to have no self-gravity, and there are no forces acting between the spacecraft and the space body. The issue is discussed in more detail in “Opportunities for creating industry outside Earth” (Sinilkov, 2024). Regarding the size of the asteroids considered in the material, these are space bodies that are the maximum approximate size of the spacecraft (i.e. the two engaging bodies are comparable) or slightly larger than the spacecraft. Details can be found in “Nyakoi vazmozhnosti na transportnite sredstva pri dobiva na polezni izkopaemi ot kosmicheski tela” (Sinilkov, 2023).

Usually, when two bodies come into contact, many physical phenomena occur. One of them is the impact. It is known from the theory of impact that during an impact, the so-called impact force is exerted between the striking bodies for a very short time. To a large extent, this impact force is uncontrollable and leads to unpredictable destruction of both bodies, which must be avoided.

In this material, the situation of interest is when two bodies approach each other in outer space. An interesting hypothesis is presented in “Neobhodimostta ot vrazka na kosmonavtikata i robotikata pri dobiva na polezni izkopaemi ot kosmicheski tela” (Sinilkov, 2024), wherein one body (the spacecraft) captures the other body (the asteroid), that is, they merge into one body with minimal impact force between them. The method of synthesis of working bodies is described in “Analitichen sintez na mehanizmi za krainitsi na kracheshti mobilni roboti” (Sinilkov, 2011).

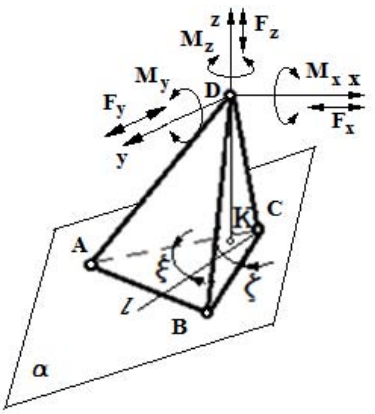
Method

Three-point support

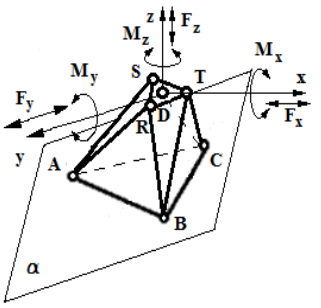
Before considering the grip, the three-point support, which is a geometric-mechanical element of kinematic systems, will be briefly considered. The three-point support is practically the most stable of all supports known in mechanics and meets the minimum requirements of the geometric laws for determining a plane in space.

By definition from geometry*, every three points in space, not lying on a straight line, determine a plane in space.*

In mechanics, in the general case, the three-point support is considered as a triangular pyramid with height *KD*, where point *D* is the top of the pyramid above the plane determined by the three support points *A,B,* and *C*, in space (Fig.1.a).



a)



b)

Fig. 1. Geometric representation of a three-point support (grip) on the plane; a) Basic pyramidal structure; b) The “Steward Platform” mechanism applied to the basic three-point support (grip)

A characteristic feature of the task is that the load on the system is concentrated at point *D*, that is, the top of the pyramid. This is a six-dimensional dynamic load, more precisely, these are three linear components along the three axes of the inertial coordinate system *xDyz* in space and mutually perpendicular components of the moments along these axes.

$$\overrightarrow{F^e} = \overrightarrow{F_x} + \overrightarrow{F_y} + \overrightarrow{F_z} \qquad (1)$$
$$\overrightarrow{M^e} = \overrightarrow{M_x} + \overrightarrow{M_y} + \overrightarrow{M_z}$$

where:

$\overrightarrow{F^e}$ – the principal vector of all external forces for the system;

$\overrightarrow{M^e}$ – the principal moment of all external moments for the system.

It is important to note that the support reactions of this system depend not only on the magnitude of the principal vector of all external forces $\overrightarrow{F^e}$ and the principal moment of all external moments $\overrightarrow{M^e}$, but also on the length of the height of the pyramid *DK*.

Fig. 1.b) shows the “Stuart platform” mechanism. At first glance, this construction is perfect for implementing a support or grip. However, this is not the case, since it can only be considered as a basic kinematic system for a three-point support and a three-point grip. Going deeper into the kinematic analysis of supports and grip, especially in weightless conditions, and especially taking into account the security of contact, it will be noticed that the three-point grip has developed into four-point, five-point, etc. In this development, it is clearly distinguished that the “Steward Platform” is only one basic kinematic structure that provides the basis for the construction of supports and grips.

For use in astronautics, the advantages of this basic mechanism are numerous. On this basis, many spatially closed kinematic systems are synthesised to cover the requirements of certain kinematic systems for support grips.

When considering a three-point support, the following are not mandatory:

1. These are monolithic bodies, as shown in Fig. 1. The important thing here is to determine the three support points *A, B,* and *C* defining the plane in space, as well as to determine the position of other characteristic points in space;

2. The support triangle *ABC* does not have to represent a single unchanging geometric triangle. Of great mechanical importance in the distribution of the forces of the system is that the triangle ABC has the ability to change the sizes of its sides.

As a result of what was described above for the three-point support, it can be said that to find the support reactions of the system at points (*A, B* and *C*), a classical problem for finding support reactions is obtained, in which the most important thing is to ensure that the components that press the support triangle against the plane *a* do not become zero or take on a negative value.

Three-point grip

In the presence of support reactions that repel the support triangle from the plane *a*, the physical phenomenon of support cannot be realised. In the physical phenomenon of grip, the support reactions can acquire different values, without limitation, positive, zero or negative.

It should be immediately clarified that grip, as a phenomenon, has four phases of action:

1. Contact phase - this is the first moment of contact between the two bodies. This is the moment when the impact phenomenon is realised;

2. Grip phase - this is the phase in which a monolithic connection between the two bodies is realised. Here, forces appear between the two bodies, which are considered by mechanics as clamping forces;

3. A phase in which the physical phenomenon of grip ceases to exist and all its clamping forces are zeroed;

4. Repulsion phase or other impact between the two bodies. In this phase, forces acting after phase 3 are observed, which are *motor* for one body and *external* for the other body.

It should be clarified that there is a significant difference between the structural design of the three-point support and the three-point grip, even with the same external load. This mainly follows from the functions that the kinematic system must respond to in both types of execution.

Theoretical statements from the Theory of Impact

In the first phase of the grip, *the physical phenomenon of impact* occurs between the two bodies. Entering *the theory of impact*, the physical phenomenon of impact is characterised by an impact in a very small time interval. In this time interval, the so-called impact force acts, which takes on very high values.

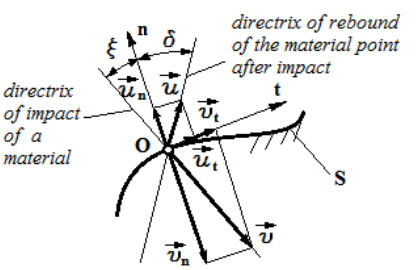


Fig. 2. Schematic diagram of the impact of a material point on a stationary surface

If we hit a material point with mass m on a stationary surface *S(x,y,z,t)= 0*, at an angle ∢ *ξ* to the normal *n* (Fig. 2) of the surface *S*, with a speed *v*, then the reaction to the impact will depend on the physicomechanical properties of the matter of the material point and the surface *S*, at the moment of impact. In this material we will limit ourselves only to the shape

of the bodies, assuming that the physicomechanical characteristics are uniformly distributed over the surface and volume of the bodies.

The normal to the surface at the point of impact is given by expression (2):

$$n = grad\ S(x, y, z, t) = 0 \quad (2)$$

At the moment of contact of the material particle with the surface *S* and upon leaving the point of contact, regarding the velocity (Fig. 2), the following equality holds:

$$grad\ S.v + \frac{dS}{dt} \geq 0 \quad (3)$$

At the initial moment of impact t_0, the basic equation of impact theory, projected onto the normal, takes the form:

$$\begin{aligned} mu_n - mv_n &= I_n^m \\ mu_t - mv_t &= I_t^m \end{aligned} \quad (4)$$

This system of equations is indeterminate because the equations are two and the unknowns are four, i.e. I_t^m, I_n^m, u_t *and* u_n. Newton added two additional empirical relationships, based on a large number of experiments and observations.

The ratio of the absolute values of the normal projections of the relative velocities from the second and first phases of the impact is a constant value and depends only on the physicomechanical properties of the matter.

$$\frac{u_n}{v_n} = \rho \quad (5)$$

This coefficient is called the coefficient of recovery. It varies between *0* and *1*, i.e. $0 < \rho < 1$. At $\rho = 0$ there is a completely plastic impact, that is, there is no second phase of the impact (there is no movement after the first phase, in other words, all the energy of the impact is spent on plastic deformation). At $\rho = 1$ there is a completely elastic impact, that is, there is a complete recovery of the movement after the impact, albeit in a different direction.

The ratio of the absolute values of the tangential projections of the relative velocities from the second and first phases of the impact is a constant value and depends only on the physical and mechanical properties of the matter.

$$\frac{u_t}{v_t} = 1 - \lambda \quad (6)$$

Where: λ is called <u>*the coefficient of instantaneous friction*</u>.

The two empirical relationships introduced by Newton make it possible to solve the equations and find the velocities and impulses during the impact.

As is evident from the above considerations, the impact theory is not an exact theory built on the basis of precise physical quantities and their specific change depending on the change in the surrounding conditions. This is an approximate theory, but it is still based on numerous experiments and the results have been confirmed by practice with satisfactory accuracy.

The relationship between the angle of attack ξ and the angle of reflection after the impact δ is as follows:

$$tan\,\xi = \frac{v_\tau}{v_n}\ ,\ tan\,\delta = \frac{u_\tau}{u_n} \quad (7)$$

or

$$\frac{\tan\delta}{\tan\xi} = \frac{1-\lambda}{\rho}$$

The magnitude of the shock impulse is found by the formula:

$$I^m = \sqrt{(1+\rho)^2 cos^2\xi + \lambda^2 sin^2\delta} \quad (8)$$

Kinetic energy upon impact of a material point. Loss of kinetic energy. The momentum of the system has the form:

$$mu - mv = I^m \quad (9)$$

After multiplying both sides by *u* and *v* respectively, we get:

$$\begin{aligned} mu^2 - mu.v &= I^m.u \\ mu.v - mv^2 &= I^m.v \end{aligned}$$

After conversion, we get:

$$\frac{mu^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} I^m.(v+u) \quad (10)$$

An equality is obtained, which shows that the change in kinetic energy when a material point hits a surface is equal to the product of the impulse of the impact force and half the sum of the attack velocity and the reflected velocity.

The kinetic energy lost as a result of this phenomenon is:

$$\Delta T = -\frac{1}{2} m(v-u)^2 \quad (11)$$

Carnot's theorem expresses the loss of kinetic energy using the coefficient of restitution:

$$\Delta T = -\frac{1}{2} m \frac{1-\rho}{1+\rho}(v-u)^2 \quad (12)$$

At $\rho = 1$, there is a completely elastic impact and $\Delta T = 0$, that is, there is no loss of kinetic energy. At $\rho = 0$ there is practically no second phase of the impact and all the kinetic energy is lost.

When the kinetic energy changes in a mechanical system, Carnot's theorem takes the form:

$$\Delta T = -\frac{1-\rho}{1+\rho} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i (v_i - u_i)^2 \quad (13)$$

where ***i*** is the number of participating material objects in the mechanical system.

Depending on the position of the normal to the surface at the point of impact, whether it passes through the mass centers of the bodies or not, we distinguish between a straight and an oblique impact.

Two bodies make a straight impact if the line connecting their centers of gravity is a common normal at their point of contact and the velocities of their centers of gravity before the impact are directed along this normal. Since a straight impact is an extremely rare phenomenon in grip in weightlessness, its

consideration is deliberately omitted.

Oblique impact of two bodies. The impact of two bodies is called oblique if the absolute velocities of their centers of gravity are not directed along the line connecting them.

$$m_1.u_1 + m_2.u_2 = m_1.v_1 + m_2.v_2 \quad (14)$$

The mathematical approach is analogous to the impact of a material point on a stationary surface. Projecting this equality onto the normal and tangent at the point of contact, we get:

$$\begin{cases} m_1.u_{1n} + m_2.u_{2n} = m_1.v_{1n} + m_2.v_{2n} \\ m_1.u_{1\tau} + m_2.u_{2\tau} = m_1.v_{1\tau} + m_2.v_{2\tau} \end{cases} \quad (15)$$

There are four unknowns in this system of two equations, and to fully determine it, we add the two empirical relationships from Newton's theorem for *the coefficients of restitution and instantaneous friction*.

$$\rho = -\frac{u_{1n}-u_{2n}}{v_{1n}-v_{2n}} \quad \lambda = -\frac{u_{1\tau}-u_{2\tau}}{v_{1\tau}-v_{2\tau}} \quad (16)$$

Minimisation of impact force. According to the conditions of the task, impact forces can be destructive for some types of meteorites, and for missiles (for the level of existing technology at the moment), these forces are disastrous. The solution is to minimise the impact forces at the moment of capture, damp them in time or zero them, if possible.

On this basis, many types of capture designs are possible, which can absorb impact forces and moments in the specified directions. The following options are possible:

1. There is a complete loss of kinetic energy, that is:

$$\Delta T = max \ , \boldsymbol{\rho} = 0 \quad (17)$$

In this case, the coefficient of restitution is zeroed and there is a completely plastic impact, that is, all the kinetic energy is spent on changing the shape of the two captured bodies. Since the properties of the matter of the space body are unknown, the kinematic system of the spacecraft's capture must ensure the zeroing of the coefficient of restitution;

2. When the magnitude of the impact impulse is zeroed:

$$\mathrm{I}^{\mathrm{m}} = \sqrt{(1+\rho)^2\cos^2\xi + \lambda^2\sin^2\delta} = 0 \quad (18)$$

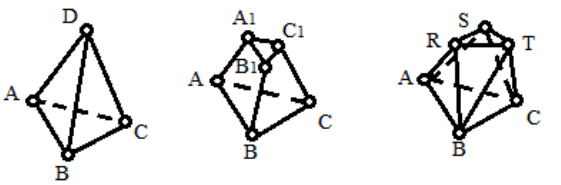
Since momentum is a quantity obtained as a product of mass and velocity, in order to reset the momentum, the velocity must be reset (the option to reset the mass is not relevant, because this means that there is no body). Structurally, this is achieved by moving the three points *A, B,* and *C* of the support triangle so that it resets the coefficients of restoration and instantaneous friction.

The synthesis of the kinematic structure that will realise the grip and connect the two bodies and manipulate the position between them starts from the support triangle *ABC* and provides a conceptual opportunity for:

- Kinematic synthesis of a kinematic system in order to regulate the support reactions at the three points (vertices) *A, B,* and *C* of the support triangle of the grip;
- Constructive realisation of the damping capacity of the kinematic system;
- The possibility of maneuvering (manipulation) and changing the position between the two gripped bodies.

Phase 3 and phase 4 are realised by the action of the kinematic system of the spacecraft and to a greater extent affect its movement.

Some types of schematic solutions of kinematic chains of three-point support and three-point grip for the realisation of locomotion.



a) b) c)

Fig.3 Development of the pyramidal structure of a three-point grip

The three types of kinematic structures of a three-point hitch shown in Fig. 3 show how the kinematic structure of a three-point hitch can be structurally modified, starting from the support triangle *ABC.* This is only an example demonstration of a structural modification.

In position a) in Fig. 3., there is a classic pyramid, where all the links of the pyramid can be extended or contracted.

In position b) in Fig. 3., the pyramidal structure has the shape of a truncated pyramid, in which the unit *A1B1C1* is solid. In othert words, point *D* has become a triple unit.

In the third position c) in Fig. 3., the pyramidal structure has become a “Stuart’s platform”, the mechanism well-known from the theory which has many advantages from the point of view of mechanics.

The synthesis of the kinematic structure, starting from the support triangle, provides a conceptual opportunity for:

- Kinematic synthesis of a kinematic system in order to regulate the support reactions at the three points (vertices) of the support triangle of the grip;
- Constructive realisation of the damping ability of the kinematic system;
- The possibility of maneuvering (manipulation) and changing the position between the two bodies.

Phases 3 and phase 4 are realised by the action of the kinematic system of the spacecraft and to a greater extent affect its movement.

Conclusion

Space industry requires continuous interception of meteorites, transportation to a certain place, and unloading. Therefore:

I. The spacecraft that implements this must have reliable gripping mechanisms;

II. These mechanisms must provide a secure grip so that the rocket and the space body at a given moment constitute a solid and indestructible monolithic whole;

III. In practice, kinematic schemes are constructed that are hybrid, depending on the distribution of support reactions, some of the points in the support triangle or polygon are support, and the rest are gripped.

Here on Earth, in the biomechanics of animals, insects, birds, etc., which land on flowers, trees, or other animals, or climb on them, have limbs that minimise impact forces. The goal is not to transmit kinetic energy to the surrounding structures in their habitat, as this can trigger someone's movement receptors. This incredible similarity between the approach in nature when building supports and grips in technology shows the accuracy of the method for constructive synthesis of supports and grips.

This requires that the structures of spacecraft undergo significant changes, acquiring a new appearance that is adapted for production activities in the conditions of weightlessness.

References

Sinilkov, P. (2011). Analitichen sintez na mehanizmi za krainitsi na kracheshti mobilni roboti. *Nauchni izvestiya na nauchno-tekhnicheskiya savet po mashinostroene*. XXI Mezhdunarodna konferentsiya “Robotika i Mekhatronika 2011”, gr. Varna 19-21 septemvri, 2011. ISSN 1310-3946.

Sinilkov, P. (2023). Nyakoi vazmozhnosti na transportnite sredstva pri dobiva na polezni izkopaemi ot kosmicheski tela. 66–ta Mezhdunarodna konferentsiya na MGU – Sofiya, Oct. 2023.

Sinilkov, P. (2024). Opportunities for creating industry outside Earth, S.E.S., 22 – 25 October, 2024, Sofia, Bulgaria, 146–151, ISSN 2603 – 3313.

Sinilkov, P. (2024). Neobhodimostta ot vrazka na kosmonavtikata i robotikata pri dobiva na polezni izkopaemi ot kosmicheski tela. Mezhdunarodna nauchna konferentsiia “ROBOTIKA I MEHATRONIKA 2024”, Sofiya, 29-30 oktomvri 2024.

METHODS FOR LIMITING THE SLIDING OF THE WHEELS OF UNDERGROUND MINING LOCOMOTIVES

Lyuben Tasev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: luben.tasev@mgu.bg

ABSTRACT. Sliding of the wheels relative to the rail of mine locomotives is one of the main reasons for the wear of the former. This leads to a loss of traction, which in turn leads to a decrease in the acceleration (or braking) of the locomotive. It also brings about intense wear, both on the wheel bandage and on the track. The article will consider several options for limiting this phenomenon.

Key words: underground mining locomotives, wear, anti-sliding system

МЕТОДИ ЗА ОГРАНИЧАВАНЕ НА БОКСУВАНЕ НА РУДНИЧНИТЕ ЛОКОМОТИВИ ЗА ПОДЗЕМЕН ИЗВОЗ

Любен Тасев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Буксуването на колелата спрямо релсата на рудничните локомотиви , е една от основните причини за износването на първата. Това води до загуба на сцепление , което от своя страна до намаляване до спиране на ускорението (спирането) на локомотива. Води и до интензивно износване както на бандажа на колелото, но и на релсовия път. В статията ще се разгледат няколко варианта за ограничаване на това явление.

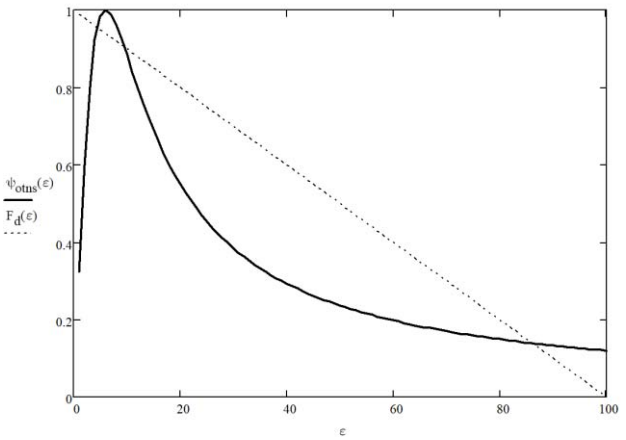
Ключови думи: руднични локомотиви за подземен извоз, износване , противо-боксуваща система

Въведение

Боксуването на колелата спрямо релсата на рудничните локомотиви е една от основните причини за износването на първата. Това води до загуба на сцепление, което от своя страна води до намаляване ускорението на локомотива, а следователно и до интензивно износване както на бандажа на колелото, така и на релсовия път. В статията ще се разгледат възможностите за ограничаване на това явление.

Изложение

Износването на основните възли в рудничния локомотив се определя от реалния път, в който се осъществява триенето и интензивността на износване. Бандажните гривни контактуват с релсата само в определен момент. В зоната на контакта се осъществява определено еластично приплъзване (Тасев, 2015). Това приплъзване представлява отношението на обиколката на бандажната гривна към действително изминатият път. При нормални условия това отношение е в границите от 0,1 до 4 %. В този процес на приплъзване се променя и коефициентът на сцепление. Кривата на изменение на сцеплението започва с възходящ участък. Увеличаването на приплъзването води до увеличаване на сцеплението. Това нарастване продължава до достигане на максималната стойност на коефициента на сцепление. Устойчива работа на локомотива имаме в първия участък, в който при нарастване на приплъзването нараства и коефициентът на сцепление. Работата във втория и третия участък е неустойчива, тъй като с увеличаване на приплъзването, коефициентът на сцепление пада и процесът завършва с боксуване.



Фиг. 1. Изменението на коефициента на сцепление в зависимост от приплъзване

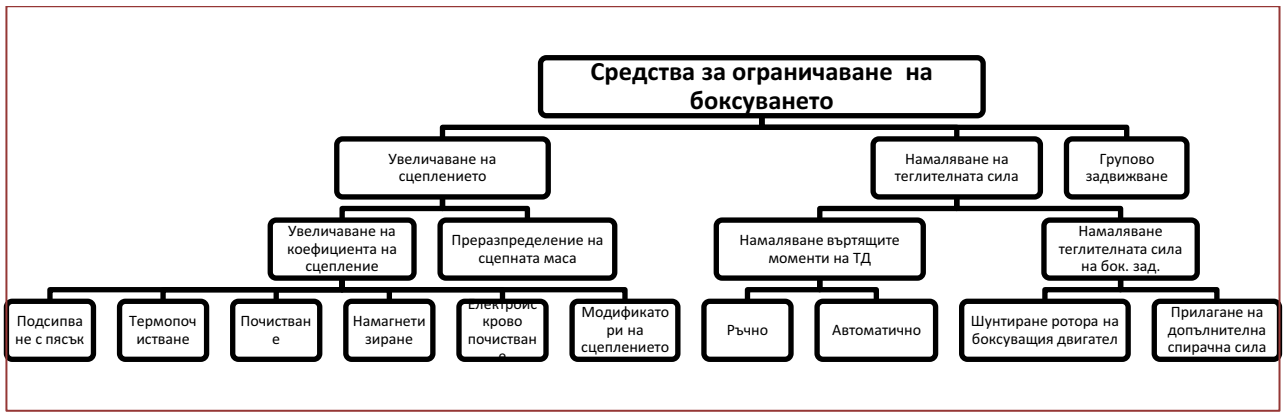
Реалният път на износване се определя от приплъзването на колелото спрямо релсата и може да се опише със следната зависимост (Крагелски, 1978):

$$l_{из} = \varepsilon L = 2\varepsilon\pi R_k n \quad (1)$$

$$i_{из} = l_{из} I_h = 2\varepsilon\pi R_k n I_h \quad (2)$$

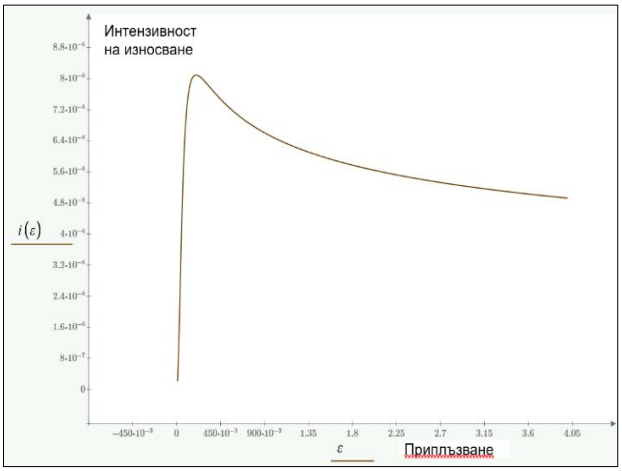
където L е общият изминатият път, km;

Стойностите на износването са в зависимост от относителното приплъзване ε , както се вижда и от горната зависимост. При боксуване стойностите на приплъзването стигат до големи размери, което води до износвания с няколко порядъка по-големи от тези при нормални условия на работа.



Фиг. 2. Средства за ограничаване на боксуването

Анализирайки горната формула, с цел ограничаване на боксуването трябва или да намалим теглителната сила, респективно въртящия момент от двигателя, или да повишим сцеплението. Методи за това са представени на фиг. 3.



Фиг. 3. Изменение на износването спрямо приплъзването за един километър

За намаляване на теглителната сила се ограничава тока, който се подава към двигателя. Това става чрез превключване от машиниста на по ниска степен на контролера. А увеличаването на сцеплението с подсипване с пясък.

Режимът на боксуване е изключително вреден и може да се счита за авариен при работата на рудничните локомотиви. Причина за това е не само интензивното износване на бандажните гривни, но и загуба на тяга и преразход на електрическа енергия.

Установено боксуване се получава винаги когато теглителната (или спирачната сила) е по-голяма от произведението на коефициента на сцепление по нормалния натиск.

$$F_T > fN$$

Масово използваният метод за увеличаване на сцеплението е подсипване с пясък (Переновски 2016). Той е нежелателен, защото води до промяна в режима на триене от сухо към абразивно. Последното е свързано със значително увеличение на интензивността на износване и трябва да се използва само при липса на други варианти.

Съществуват и други методи за увеличаване на коефициента на сцепление, които по различни причини не са намерили приложение в минната практика. С цел пълнотата на изложението ще посоча тези методи.

1. Почистване на релсовите пътища с цел увеличаване коефициента на сцепление.
2. Намагнетизиране на колела с помощта на тяговия ток на двигателя. Методът има известни предимства, но изисква усложняване на конструкцията на локомотива. Използване на чисти от кал и прах релси и др. Тук трябва да се отбележи, че намагнитизираните колела събират изпадналите по линиите магнитни материали.
3. Електроискрово обработване на релсовия път непосредствено преди навлизането на бандажното колело. Методът е сложен, води до интензивно износване на релсите и практически не е намерил приложения.
4. Покритие на работното колело с активизатор на триенето. По този въпрос се работи като известни успехи са постигнали американски и френски специалисти с препарати, който увеличават коефициента на сцепление до 0.4. Използването на този метод е свързано с увеличаване общото съпротивление на движение на подвижния състав.

Увеличение на сцеплението може да се осъществи с преразпределение на масите на самия локомотив (Биличенко, 2010). Много често условията на работа на двете колооси предполагат в режимът на боксуване да е само една от водещите колооси. Това е особено характерно при последователно свързване на двата двигателя. В този случай повишение на сцеплението, респективно ограничаване на боксуването, може да се постигне чрез преразпределение на масите на локомотива. За целта се използва подходяща по размер тежест, която конструктивно е разположена така, че в нормално положение се намира в централната ос на локомотива . При боксуване на коя да е от колосите може да се премести към боксуващата колоос. Затова теглото върху боксуващата колоос ще се увеличи с ½ то теглото на компенсираща плоча, с което се увеличава общото сцепление. Методът не е използван досега и е предложен от автора за патентоване. Системата би била

много ефективна ако се използва задвижване и автоматично управление съгласно показана та блок схема.

Типично за момента рудничните локомотиви за подземен извоз са с единично задвижване на всяка от колоосите и контролерно реостатно управление (Джустров, 2012) на двигателите. При тази схема на управление в началния период на ускоряване на локомотиви двата двигателя се свързват последователно. Това се прави с цел намаляване на загубите при ускоряване на подвижния състав и значително намаляване мощността на пусковите съпротивления (Зъбчев, 2025). Тази схема има предимства от енергийна гледна точка, но има сериозен недостатък. При последователно свързване изменението на натоварването на един от двигателите води до намаляване на неговата честота на въртене. При това напрежението, което пада върху него, намалява съгласно формулата:

$$U_{\partial 1} = C\Phi\omega_1 \tag{3}$$

където:

С – електромеханична константна на съответния двигател;

ω - честота на въртене на двигателя;

Ф – магнитен поток.

Тъй като двата двигателя са свързани последователно, върху втория двигател се подава по-голямо напрежение, определено от зависимостта:

$$U_{Д2} = U - U_{Д1} \tag{4}$$

където U е напрежението, което се подава от контролера.

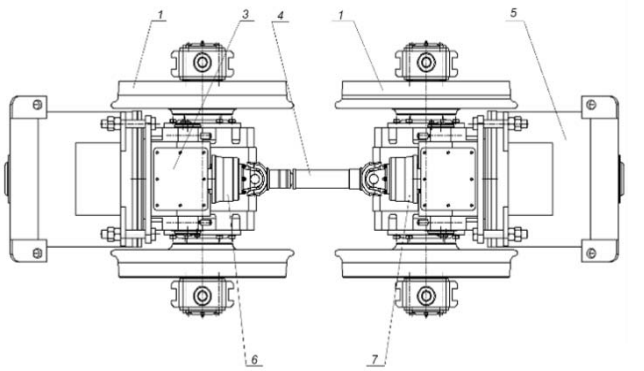
Повишеното напрежение върху втория двигател води до увеличаване на неговата честота и той може да изпадне в режим на боксуване. Тази нестабилност на работа на двигателите при последователно свързване води до намаляване на теглителната сила на машината. Независимо от това при влошаване на коефициента на сцепление на една от колооста при този режим на свързване винаги съществува възможност на изпадане на едното задвижване в режим на боксуване, като другото практически не развива тягова сила. Последно се лимитира от намаления общ ток през двата двигателя, който намалява при изпадане в режим на боксуване на едно от задвижванията.

$$I = \sqrt{\frac{C}{\omega}}, A; \tag{5}$$

За избягване на това критично състояние съществуват електрични и механични методи.

Групово задвижване

По мнение на автора, един много сигурен начин, който не е намерил приложение в рудничните локомотиви, е осигуряване на групово задвижване виж фиг. 4. Подобно задвижване е разработен за 7-тонен рудничен локомотив с намалена база . За да се осигури възможност за вертикално и напречно независимо преместване на двете колооси е запазена самостоятелността на единичните задвижвания. Като се вземе предвид други трудове (Тонкова Г. 2021) кинематичната връзка между тях е осъществена с карданен вал с два пускови предпазни съединителя. Включване на съединител (п. 6) става ръчно или автоматично при разлика на въртене на двете колооси. Съединител (п. 7) има предпазна функция Това изключва постоянното боксуване на коя и да е от колоосите. Нашият опит в рудник “Батанци” показва, че в нестационарни режими се осигурява с 20 % по- голяма тяга на локомотива..



Фиг. 4. Групово задвижване на рудничен локомотив

Въвеждане на допълнително спирачно усилие

Намаляване на теглителната сила чрез въвеждане на спирачно усилие върху буксуващото колело може да намери приложение при последователно свързване на двигателите. При въвеждане на спирачен момент към боксуващата колоос, токът през двигателя нараства, а честота на въртене спада. Двата двигателя са свързани последователно, съответно нараства тока и през двигателя на небоксуващото задвижване. Неговият момент нараства, а теглителната сила на задвижване се увеличава. С дозиране на допълнителния спирачен момент може да се стигне до там, че сумата на двете теглителни сили да е по голяма от съпротивлението на придвижване на подвижния състав, т.е. подвижният състав ще се ускори:

$$F_{k1} + F_{k2} > \sum W \tag{6}$$

Трябва да се отбележи, че целият процес на въвеждане на допълнителна спирачна сила трябва да се извършва прецизно и с потегляне на подвижния състав внимателно да се намали допълнителната спирачна сила и локомотивът да продължи да работи на естествените си характеристики.

Условието за да може локомотива да преустанови боксуването е следното:

$$F_{m1} = F_{m2} \tag{7}$$

$$F_{сц2} = \psi_2 N - F_{сп} \tag{8}$$

откъдето се вижда, че спирачното усилие трябва да е равно на:

$$F_{сп} = \psi_2 N - F_{сц1} \tag{9}$$

където:

ψ_1 – коефициент на сцепление на боксуващата колоос;

ψ_2 – коефициент на сцепление на небоксуващата колоос.

За да се реализира горния процес, е необходимо да се автоматизира. За целта трябва да има датчици за ъгловата скорост на въртене на двете колооси, датчик за ускорение на локомотива, датчици за тока на двигателите, спирачни устройства, снабдени с апаратура за автоматично управление и контролер, съвместяващ работата на системата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледаните методи в статията може да послужат за основата на една сериозна модернизация на рудничните локомотиви за подземен извоз. Авторът счита за най перспективни груповото задвижване и прилагането на спирачно усилие, върху което смята да посвети бъдещите си разработки.

Литература

Тасев, Л. (2015). Физически основи на предаваната тягова сила посредством контакта на триене при руднични локомотиви за подземен извоз. Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски”, Том 58, св. III.

Тонкова Г., Пулев, С. (2021). Намаляване на натоварването при усукващи трептения на вал. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, ISSN: 2738-8808(печатно), ISSN: 2738-8816 (онлайн), том 64, стр. 165–167.

Джустров К., (2012), *Усъвършенстване електрообзавеждането на руднични акумулаторни локомотиви*, дисертационен труд за ОНС Доктор.

Биличенко. (2010). *Снижение енергопотребления на шахтном транспорте*. Днепропетровск: НГУ

Крагелски. (1978). *Основк разчет триен и износ.* Москва: МИР.

Переновски, Н. С. (2016). Ръководство за упражнения по проектиране на миннамеханизация. изд. къща "Св. Иван Рилски", ISBN 978-954-353-313-8.

SHOCK LOADS FROM ROAD BUMPS IN UNDERGROUND LOCOMOTIVES

Lyuben Tasev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: luben.tasev@mgu.bg

ABSTRACT. The article discusses a methodology for calculating the forces that are generated as a result of the passage of the wheel of the mining locomotives for underground transportation over the irregularities of the track, specifically at the joints between the rails. The forces and stresses acting on the wheel have been calculated for the most common locomotives.

Key words: Underground mining locomotives, wear, shock forces, methodology

УДАРНИ НАТОВАРВАНИЯ ОТ НЕРАВНОСТИ НА ПЪТЯ ПРИ ЛОКОМОТИВИ ЗА ПОДЗЕМЕН ИЗВОЗ

Любен Тасев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ В статията се разглежда методология за изчисляване на силите, които се пораждат вследствие на преминаването на колелото на рудничните локомотиви за подземен извоз по неравностите на пътя, конкретно при съединенията между релсите. Пресметнати са силите и напреженията върху колелото за най-разпространените локомотиви.

Ключови думи: Руднични локомотиви за подземен извоз, износване, ударни натоварвания, методология

Въведение

При преминаване през неравности по релсовия път, колесната двойка на локомотива се подлага на ударни ускорения, които се предават директно върху неподресорните елементи – редуктора и тяговия двигател. Част от тази енергия достига до локомотивната рама чрез системата от ресори. В други трудовете (Синапов П., 2013) са разгледани пораждащите се трептения в системата.

Тук ще определим натоварванията върху системата от преминаване през „джонтовете“ на релсовия път. Тези натоварвания оказват негативно влияние върху всички звена от кинематичната верига на локомотива, като най-силно е тяхното въздействие върху непосредствено свързаните компоненти: бандажите, колесните центрове, водещите букси, корпуса на редуктора, носещите лагери и до известна степен тяговия двигател.

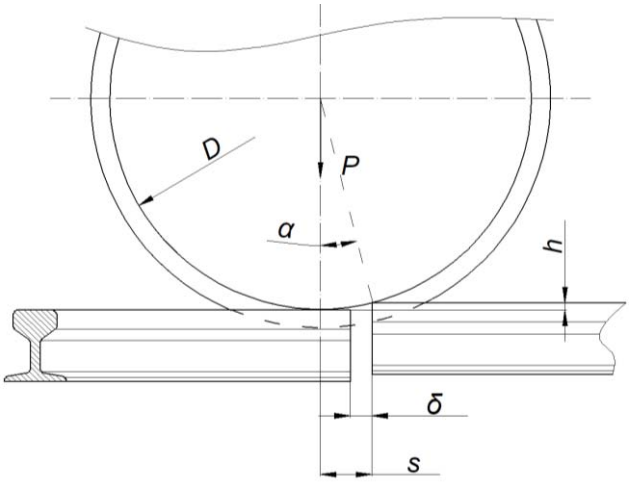
Изложение

Както е отбелязано в други публикации на автора (Тасев, 2012), натоварванията, породени от преминаването на колооста през съединенията на релсовия път (джонтовете), водят най-често до повреди в носещите лагери на колооста. По наблюдения на автора и мнението на техническия персонал на експлоатиращите рудници, тези дефекти не са чести, но отстраняването им е скъпо и времеемко (фиг 1.). Разположението на лагерите е между двете бандажни колела (фиг. 2), което означава, че подмяната на лагера е свързана с разглобяване на цялата колоос. Това не може да стане в ремонтните бази на рудниците, а само в специализирано предприятие оборудвано с хоризонтална хидравлична преса.

Фиг. 1. Колоос К10

Фиг. 2. Счупен носещ лагер

На фигура 3 са показани основните геометрични размери на кинематичната схема за определяне на реакциите и силите в хидравличните цилиндри. На базата на получените сили се прави избор на цилиндри, кормилно управление и хидравлична помпа



Фиг. 3. Схема на преминаване на колело през неравност

От геометрични съображения може да определим разстоянието от центъра на колооста до

$$s = \sqrt{R_k^2 - (R_k - h)^2}, m; \quad (1)$$

Времето, за което колелото ще премине това разстояние s, се опредял по зависимостта:

$$t = \frac{2s}{v} = \frac{2\sqrt{R_k^2-(R_k-h)^2}}{v}, s; \quad (2)$$

където:

R_k – радиус на колелото, m;
h – разликата във височината между релсите, m;
v – скорост на движение на локомотива, m/s.

Ускорението a и силата F_k, с която „джонта“ действа на колооста се определят по долните зависимости:

$$a = \frac{2h}{t^2} = \frac{4.2h.v^2}{R_k^2-(R_k-h)^2} \quad (3)$$

$$F_k = m_k a = \frac{2m_k v^2}{R_k^2-(R_k-h)^2} \quad (4)$$

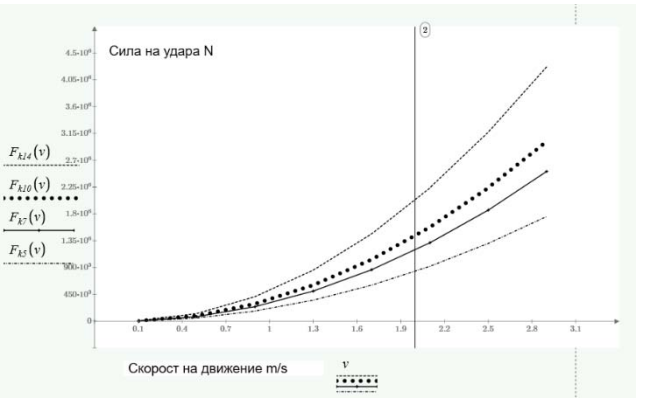
където m_k е масата колооста.

В долната таблица е дадено отношението на силата към скоростта на движение на локомотива за най-разпространените тонажи локомотиви

Таблица 1.

Тегло [t]	0.5 *[m/s]*	1 *[m/s]*	1.5 *[m/s]*	2.0 *[m/s]*
5	$52*10^3$	$208*10^3$	$470*10^3$	$835*10^3$
7	$74*10^3$	$298*10^3$	$671*10^3$	$1.19*10^6$
10	$89*10^3$	$352*10^3$	$805*10^3$	$1.43*10^6$
14	$126*10^3$	$507*10^3$	$1.14*10^6$	$2.03*10^6$

Напреженията, които ще предизвикат тези сили в кинематиката на отделните механизми от неподресорната част на локомотива, са различни. Те са разгледани в други трудове на автора (Тасев, 2013).

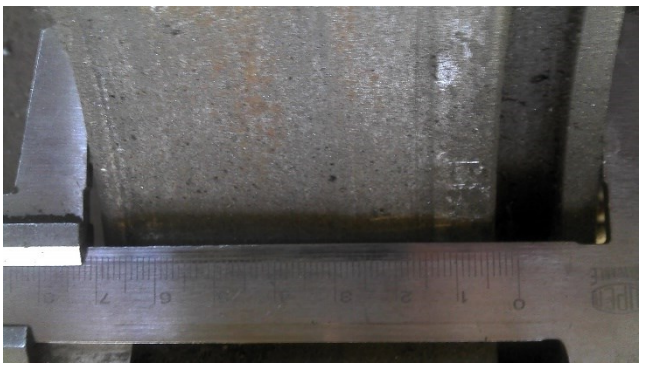


Фиг. 4. Сила на удара

За масовите локомотиви са пресметни напреженията в зависимост от скоростта и са показани в таблица 1, пресметната по (Орлов, 1988).

$$p_0 = 0.6\sigma_0\sqrt{\frac{F_k E}{l.d}}, Pa; \quad (5)$$

Получените стойности на напреженията дори при максимална скорост на локомотива са в границите на допустимите. Това е очакван резултат, тъй като тези локомотиви имат дълъг междуремонтен пробег. Съвсем по-различна става картината, когато в лагерното легло се появи известна хлабина (виж фиг. 3). Тя може да бъде следствие на неправилен монтаж на редуктора, удължаване на болтовете вследствие на динамичните натоварвания и т.н. Тогава освен статичното натоварване, което разглеждахме, се появява и ударно натоварване. Размерът на последното зависи от масата на ударящия елемент, т.е. от колооста с присъедините към нея детайли (букси, зъбни колела, капачки и др.).

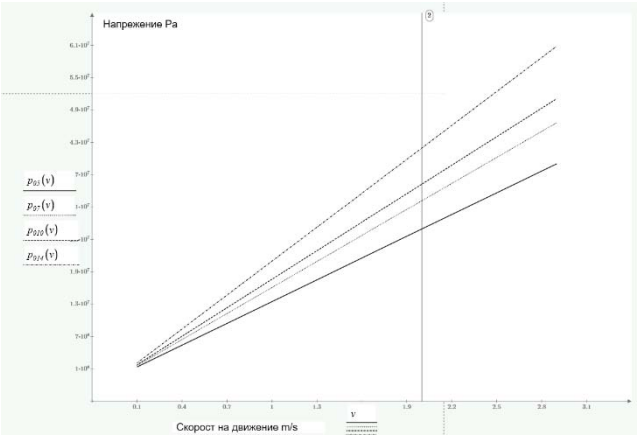


Фиг. 5. Хлабина в лагерното легло

Като се пресметнат по съответните формули (Кисьов, 1980) се получава така нареченото редуцирано тегло. От същия източник коефициентът на динамично натоварване при вертикален удар се определя по зависимостта:

$$k_\partial = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{cm}} . \frac{P_\partial}{P_\partial + G_{red}}} \quad (6)$$

където h е хлабината между лагера и леглото.



Фиг. 6. Напрежения в лагерната черупка

Изводи

Направените изчисления, в комбинация с работите на други автори (Тонкова, 2018 и 2021, Переновски, 2016) могат да послужат за основа на усъвършенстването на единичните задвижвания на рудничните локомотиви. Същите се явяват определящи за ремонта и поддръжката не само на задвижванията, но и на всички елементи от кинематичната схема.

Литература

Синапов, П., Игнатов, И., Кралов, И., Тонкова, Г. (2013). Фрикционни самовъзбуждащи се трептения на колоос на ПЖПС. *сп. „Механика на машините“, година XXI, книга 2*, Издателство ТУ-Варна, ISSN 0861-9727.

Тасев, Л., Тасев, В. (2012). Износване на редукторната група на 10-тонен рудничен контактен локомотив К10. Годишник на Минно-геоложкия университет “Св. Иван Рилски Том 55, ISSN 2738-8808.

Тонкова, Г. (2018). Изследване на якостно деформационното състояние на динамично натоварен вал. *сп. „Индустриални технологии“*, Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, ISSN 1314-9911, том V, Бургас.

Тонкова, Г., Пулев, С. (2021). Намаляване на натоварването при усукващи трептения на вал. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, ISSN: 2738-8808(печатно), ISSN: 2738-8816 (онлайн), том 64, Издателство „Св. Иван Рилски“, София, стр. 165–167.

Тасев, Л. (2013). Възстановяване на механичната част на единичното задвижване на електролокомотив К10. Годишник на Минно-геоложкия университет Св. Иван Рилски”, Том 56, Св.III, ISSN 2738-8808.

Переновски, Н. С. (2016). *Ръководство за упражнения по проектиране на минна механизация*, изд. къща "Св. Иван Рилски", ISBN 978-954-353-313-8

Орлов. (1988). *Основы конструирования.* Москва: Машиностроение

Кисьов. (1980). *Наръчник на Инженера.* София: Техника

TRADITIONAL COMMINUTION TECHNOLOGIES IN THE PROCESSING OF COPPER ORES

Albena Haytova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ivanov@abv.bg

ABSTRACT. The present study examines traditional technologies employed in the processing of copper ores, with a particular focus on mechanical comminution processes—crushing and grinding—as key stages within the mineral processing circuit. The principal technological equipment is analysed, namely semi-autogenous grinding (SAG) mills and ball mills, with emphasis placed on their operating principles, design characteristics, and performance parameters. Special attention is devoted to the energy efficiency and economic aspects of these processes, including specific energy consumption and operational costs.
The significance of this research is based on the increasing global demand for copper as a strategic industrial metal, widely utilised in electronics, energy systems, and infrastructure development. In this context, the optimisation of conventional technologies becomes critically important for enhancing efficiency and sustainability within the mineral resources industry.
The methodological framework is based on a review and analysis of specialised scientific literature and technical documentation provided by leading equipment manufacturers. The results obtained offer a systematised overview of current practices and outline potential opportunities for improving technological processes in copper ore processing.

Key words: copper ores; grinding; SAG mills; ball mills; energy efficiency.

ТРАДИЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА РАЗДРОБЯВАНЕ И СМИЛАНЕ ПРИ ПРЕРАБОТКАТА НА МЕДНИ РУДИ

Албена Хайтова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящото изследване разглежда традиционните технологии в преработката на медни руди, с фокус върху процесите на механично раздробяване и смилане като ключови етапи в минералнообогатителния цикъл. Анализирани са основните технологични съоръжения – полуавтогенни (SAG) и топкови мелници, като се изясняват техните принципи на работа, конструктивни особености и експлоатационни характеристики. Особено внимание е отделено на енергийната ефективност и икономическите параметри на процесите, включително специфичен енергиен разход и оперативни разходи.
Значимостта на изследването се определя от нарастващото глобално търсене на мед като стратегически индустриален метал, широко използван в електрониката, енергетиката и инфраструктурните системи. В този контекст оптимизацията на традиционните технологии придобива съществено значение за повишаване на ефективността и устойчивостта в минерално-суровинната индустрия.
Методологичната рамка се основава на анализ на специализирана научна литература и техническа документация от водещи производители на оборудване. Получените резултати предоставят систематизиран преглед на съвременните практики и очертават възможности за подобрение на технологичните процеси в преработката на медни руди.

Ключови думи: медни руди; смилане; SAG мелници; топкови мелници; енергийна ефективност.

Въведение

През последните години потребността от мед в повечето ключови индустриални сектори нараства значително. Според данни на Международната агенция по енергетика, през 2023 г. общото глобално търсене на мед възлиза на 25,9 милиона тона. По прогнози на агенцията, до 2030 г. това търсене ще надхвърли 31 милиона тона, а до 2040 г. ще достигне над 36 милиона тона. Тези стойности ясно показват не само високите нива на потребление, но и ускорения темп на нарастване на търсенето (Petrova, 2023).

В същото време, още през 2023 г. се наблюдава недостиг на мед, тъй като предлагането е приблизително 21 милиона тона. Очакванията са темпът на нарастване на предлагането да бъде значително по-бавен в сравнение с темпа на търсенето. Според прогнозите, през 2040 г. предлагането от първични източници ще достигне едва около 25 милиона тона. Това ще доведе до дефицит от приблизително 11 милиона тона. Подобен недостиг ще окаже съществено влияние върху индустриите, в които медта е стратегически ресурс, като ще затрудни достъпа до суровината и ще доведе до повишаване на нейната пазарна цена. От своя страна това ще стимулира инвестициите в добива и преработката на мед, както и в разработването на по-ефективни методи за увеличаване на предлагането (Galabova et al., 2025).

Роля на минералнообогатителните процеси

Тъй като откриването на нови находища и разработването на нови рудници е дългосрочен процес, който често отнема десетилетия, основният фактор, който може да окаже по-бърз положителен ефект върху предлагането на мед, са минералнообогатителните процеси. Именно чрез тях може да се постигне по-ефективно извличане на ценния компонент от наличните рудни ресурси.

В този контекст, от една страна се разглеждат възможностите за внедряване на нови технологии, а от друга – усъвършенстването на вече утвърдените традиционни технологии (Dimov et al, 2020). Основните цели са повишаване на производствената ефективност, намаляване на енергийните и експлоатационните разходи, както и увеличаване на добива на висококачествен концентрат.

Цел и задачи на изследването

Основната цел на настоящото изследване е да бъдат разгледани най-разпространените традиционни технологии в преработката на медни руди, с акцент върху процесите на механично раздробяване и смилане като основни етапи в минералнообогатителния цикъл.

За постигането на тази цел се поставят следните задачи: анализ на характеристиките на медните руди, изследване на основните технологични процеси при

тяхната преработка, разглеждане на принципите на работа на полуавтогенните (SAG) и топковите мелници, както и оценка на енергийната ефективност и икономическите аспекти на тези технологии.

Кратко описание на структурата на публикацията

Структурно, публикацията започва с обща характеристика на медните руди и техните основни особености. След това се разглеждат традиционните технологии в преработката, с акцент върху процесите на раздробяване и смилане като ключови етапи в технологичната схема.

В следващите раздели са представени основните технологични съоръжения, използвани в този процес, а именно полуавтогенните мелници (SAG) и топковите мелници, като се анализират техните конструктивни особености, принципи на работа и експлоатационни характеристики. Разгледани са също енергийната ефективност и икономическите аспекти на процесите, включително специфичният енергиен разход и оперативните разходи.

Публикацията завършва с обобщение на основните резултати, както и с анализ на предимствата, недостатъците и възможностите за оптимизация на традиционните технологии в преработката на медни руди.

Обща характеристика на медните руди

Видове медни руди (сулфидни, оксидни)

Рудите представляват природни образувания, съставени от ценен компонент и скална маса без полезни компоненти, като се различават от находищата по това, че рудата е онази част от находището, в която полезните компоненти са концентрирани в количества, позволяващи икономически ефективното им извличане. Когато съдържащият се ценен материал е в достатъчно високо количество, което да позволява икономически целесъобразно извличане, тази руда може да се превърне в минен проект. Медта най-често се среща под формата на сулфидни, оксидни или смесени руди.

Характерно за сулфидните руди, е че ценният материал е под формата на сулфиди. Те са по-разпространеният източник на мед в промишлени количества и се преработват със следната последователност: раздробяване, смилане, флотация, топене и електролитно рафиниране. При тях медта е свързана със сяра и желязо.

При оксидните руди, ценният материал е под формата на оксид, сулфат, силикат или карбонат. Те се преработват чрез хидрометалургични методи като електролиза, например. При оксидните медни руди, медта се среща в окислени минерали като куприт, малахит, азурит и хризокола. Тази разлика е съществена, защото сулфидните минерали обикновено се поддават добре на пенна флотация, докато оксидните минерали често имат по-сложно поведение при флотация и нерядко изискват излужване или комбинирани технологични схеми.

Особености при обогатяване

Спрямо вида на медната руда има особености и при обогатителните процеси. Когато става дума за сулфидни руди, обикновено се използва пенна флотация, където след като рудата е смляна тя се смесва с вода и реагенти, като медните минерали се закрепват за мехурчетата и се отделят на повърхността. Празната порода остава като отпадък. Когато рудата е с оксиден характер, поради различната химична структура и често, по-ниска селективност на флотационните реагенти, обогатителният процес при оксидните руди е по-различен - прилага се директна флотация, сулфидизация преди флотация или хидрометалургични процеси.

Значение на степента на раздробяване

Друга ключова характеристика за ефективността на обогатяването е степента на раздробяване. Раздробяването цели да освободи ценния материал от празната порода. Ако тази първа стъпка не бъде изпълнена достатъчно качествено и частиците са по-големи от необходимото, то частички от медните материали могат да останат заедно с отпадъчните минерали при етапа на флотация, което води до загуба на метал в процеса, и следователно негативен финансов ефект.

Ако обаче смилането е прекомерно, то тогава се образуват фини частици, които също могат да влошат флотацията, да увеличат разхода на реагенти и да повишат енергийните разходи. Следователно, трябва да се намери оптимална степен на раздробяване която е баланс между добро освобождаване и високо извличане на мед, както и приемливи експлоатационни и финансови разходи. Смилането е един от най-енергоемките, но и най-важните етапи в преработката на мед, тъй като именно то осигурява условията за ефективно разделяне на ценните минерали от празната порода

Традиционни технологии в преработката

Основни етапи в технологичния процес

Целта при преработката на медна руда е да се отдели ценният минерал (мед) от празната порода, за да се получи меден концентрат с високо съдържание. Както споменахме вече, при сулфидните медни руди, като основен източник на мед, технологичната схема включва механична подготовка (раздробяване, смилане и класификация), флотационно обогатяване и металургична преработка.

Раздробяване

Като първи етап на механичната подготовка на рудата, „раздробяването намалява размера на частиците на рудата от рудничния добив до такова ниво, че смилането да може да продължи, докато минералът и празната порода се получат като отделни частици“ (Finch, B. A., 2016). От това определение следва, че раздробяването не е самостоятелен процес, а служи за подготовка за следващите етапи за освобождаване.

Съществуват първично, вторично и третично раздробяване. За първичното обикновено се използват челюстни или гирационни трошачки, които обработват най-едрия материал. Вторичното и третичното раздробяване често се осъществяват с конусни трошачки, които осигуряват по-фин продукт и по-добър контрол върху разпределението на частиците спрямо големината им (гранулометричен състав).

Смилане

Смилането следва след раздробяването, като то е и най-енергоемкият етап от обогатителния процес.

Основната задача е да намали размера на частиците до степен, при която ценните минерали ще са освободени от минералите на празната порода. Това е нужно за ефикасното протичане на следващия процес, който обикновено е флотация.

Механизмът на смилане „протича в барабанни мелници, където рудата се подава в хоризонтална мелница, чийто цилиндричен корпус се върти от двигател, предизвиквайки въртене на заряда от руда и смилаща среда“ (Finch, B. A., 2016).

Смилането основно се извършва в полуавтогенни (SAG) и топкови мелници. При полуавтогенните мелници, самото смилане е резултат на взаимодействие между рудата и стоманени тела, обикновено стоманени топки. При сблъсъкът на едно с друго, рудата се разделя на по-малки частици. Процесът протича предимно във водна среда, тъй като мокрото смилане улеснява транспортирането на материала и създава условия за последваща класификация и флотация.

Смилането изисква значителни енергийни ресурси, които често са над 50% от общото енергийно потребление в обогатителната фабрика, поради което оптимизацията на този етап има съществено икономическо значение.

Класификация

При етапа на класификация частиците се разпределят спрямо техния размер и скорост на утаяване. Тя се извършва след смилането с цел отделяне на достатъчно фините частици, които могат да преминат към флотация, от по-едрите, които трябва да бъдат върнати обратно в мелницата за допълнително смилане.

Най-често използваните съоръжения за класификация са хидроциклоните и спиралните класификатори, като хидроциклоните са по-разпространени благодарение на компактната си конструкция, висока производителност и по-добър контрол върху разделянето. Чрез класификацията се формира затворен цикъл на смилане, който води до по-висока ефективност и намаляване на ненужно повторно смилане.

Принципи на раздробяване и смилане

Принципът на раздробяване и смилане се основава на разрушаването на кристалната структура на минералите под въздействие на механични напрежения. „Повечето минерали са кристални материали, в които атомите са подредени в триизмерни решетки, а разрушаването настъпва при превишаване на якостта на междуатомните връзки” (Finch, B. A., 2016). Физически, раздробяването се осъществява чрез прилагането на натиск, удар, срязване или триене.

Според Уилс и Финч, 2016: „При разрушаване чрез натиск продуктите се разделят в две отчетливи фракции – едри частици, получени при разрушаване от опъване, и фини частици, образувани при компресорно разрушаване близо до точките на натоварване“ (Finch, B. A., 2016). Това е важно при избора на подходящ тип трошачка или мелница

Роля на механичната подготовка

Механичната подготовка е основополагащ етап в преработката на медни руди, тъй като тя определя условията за ефективното протичане на всички последващи технологични операции. Основната ѝ задача е да осигури необходимата степен на освобождаване на медните минерали от празната порода, така че разделителните процеси да могат да протекат с висока селективност и минимални загуби.

Недостатъчното раздробяване и смилане водят до наличие на сраснали зърна, при които ценният минерал остава заключен в празната порода. Това води до по-ниско извличане на мед и загуби на метал в хвостохранилището. От друга страна, прекомерното смилане също е неблагоприятно, тъй като води до образуване на твърде фини частици , които влошават флотационните показатели, увеличават разхода на реагенти и повишават енергийните разходи.

Следователно механичната подготовка трябва да бъде оптимизирана така, че да се постигне баланс между достатъчно освобождаване на минералите и икономически ефективна експлоатация.

Място на смилането в технологичната схема

Смилането заема централно място в технологичната схема на минералното обогатяване. То представлява преходната връзка между предварителната механична подготовка и процесите на физико-химично разделяне. След раздробяването материалът все още не притежава необходимата степен на освобождаване, поради което директното му подаване към флотация би довело до ниско извличане и ниско качество на концентрата.

Именно смилането осигурява подготовката на подходящ гранулометричен състав за флотационния процес. Размерът на частиците оказва пряко влияние върху ефективността на закрепване на минералите към въздушните мехурчета, а оттам и върху качеството на получения концентрат.

В съвременните обогатителни фабрики смилането обикновено се осъществява в затворен цикъл с класификация, което позволява постоянен контрол върху размера на продукта и оптимизиране на енергийните разходи. Следователно смилането не е просто междинен процес, а основен фактор за постигане на висока производителност, ниски оперативни разходи и устойчиво използване на минералните ресурс

Основни параметри на процеса

Основните параметри при процесите на раздробяване и смилане са степента на раздробяване, гранулометричният състав, времето, което отнемат и енергийният им разход.

Степента на раздробяване – колко пъти е намален размерът на частиците и показател, свързан с ефективността на процеса.

Гранулометричният състав – определя разпределението на частиците по размер и има пряко влияние върху последващата флотация. Често се използва показателят P80, който показва размера, под който попадат 80% от частиците в продукта.

Времето за производителност зависи от капацитета на оборудването и характеристиките на рудата

Специфичният енергиен разход - показва количеството енергия, нужно за обработката на дадена единица маса материал.

Фактори, влияещи върху ефективността

Един от основните фактори, които влияят на ефективността на смилане, е степента на освобождаване на минералите. Както споменахме, и прекомерното

смилане, и недостатъчното смилане водят до влошаване на ефикасността и увеличаване на разходите. Елемент, който съдейства за постоянния контрол върху размера на продукта е да се използва затворен цикъл.

Други фактори са влажността на рудата, твърдостта й, равномерността на подаване към машините, както и подходящия избор на оборудване. Ако рудата е по-твърда, енергийният разход е по-висок, следователно оборудването се износва по-бързо. Ако подаването на материал към машините е неравномерно, това може да доведе до нестабилна работа на мелниците. Съоръженията и техните характеристики също са ключови. Целта е да се постигне оптимизация на параметрите по отношение на размера на мелницата, вида и броя на машини, скоростта и режима на работа. Тази оптимизация ще доведе до по-ниски оперативни разходи, удължаване на живота на съоръженията и устойчиво използване на минералните запаси.

Основни технологични съоръжения

Полуавтогенни мелници (SAG)

Полуавтогенни мелници (SAG – Semi-Autogenous Grinding Mills) са ключово съоръжение при първичното смилане в преработката на медна руда. Съществуват и автогенни мелници (AG) където няма стоманени топки, а рудата сама изпълнява ролята на смилаща среда. Предимството на полуавтогенните пред автогенните мелници, е че има по-висока интензивност на смилане и по-добър контрол. „Най-високопроизводителните смилащи вериги в минната индустрия използват автогенно (AG) или полуавтогенно смилане (SAG)” (Finch, B. A., 2016).

SAG мелниците са разпространени не само при медни рудници, но и при златни и железни обогатителни процеси с високи количества и ниско съдържание на ценен метал.

Принцип на работа и конструктивни особености. Принципът ба работа на SAG мелниците е въртенето на цилиндричен барабан. При въртенето, материалът се повдига и след това пада, като по този начин се разрушава чрез удар, натиск и абразив. Както посочват Уилс и Финч, 2016, „AG/SAG мелниците могат да обработват руда с едрина до 200 mm и да постигнат продукт с размер 0.1 mm в един етап“ (Finch, B. A., 2016).

Конструкцията на SAG мелницата представлява голям барабан с хоризонтална ос, вход и изход, вътрешна облицовка, решетка (която „служи за задържане на смилащата среда и едрите късове руда, като позволява преминаването на фините частици и пулпата“ (Finch, B. A., 2016) и пулп-лифтери (които помагат транспортирането на материал към изхода.

Обемът на стоманените топки в SAG мелниците е между 4% и 15% от обема на самата мелница.

Предимства и недостатъци. Предимствата на SAG мелницата са висока производителност, възможност за преработка на по-едра руда, по-проста технологична схема следователно по-малък брой технологични стадии, и често, по-нисък капиталов разход.

Високата първоначална капиталова инвестиция е един пример за недостатък. Друг минус на SAG мелницата, особено сравнено с топковите мелници, е че твърдостта и гранулометричния състав на подаваната руда влияят силно на производителността на мелницата. Това води до постоянна нужда от наблюдение и адаптация на режима на работа.

Топкови мелници

Принцип на работа и Конструкция. Топковите мелници се използват за фино смилане в обогатителната промишленост и обикновено се използват след SAG мелниците. Те използват стоманени или керамични топки за а осигурят смилаща среда, от където и идва името им. Целта им е да намалят размера на рудата до такъв, нужен за ефективна флотация.

Конструкцията на топковите мелница е изградена от цилиндричен барабан с вътрешна облицовка, входна и изходна система, задвижващ механизъм и определено количество топки. При въртенето на барабана топките се задвижват и чрез удар и абразив разрушават рудата. Тук отново се предпочита мокро смилане за да се получи пулпа, с добра подготовка за класификация или флотация.

Режими на работа. По отношение на режима на работа, той се определя от скоростта на въртене на барабана. Ако тя е твърде ниска, то топките ще се „вургалят“ и няма да смилат рудата. Ако пък е твърде висока ще се получи центрофуга и смилането ще се повлияе негативно. Според Уилс и Финч, 2016, „*Обикновено работната скорост е 70–80% от критичната скорост*“ (Finch, B. A., 2016)

Сравнение със SAG мелници. Една от разликите между топковите мелници и SAG мелниците, е че топковите подсигуряват по-добър контрол върху финалния гранулометричен състав. От друга страна, топковите мелници са с по-ниска производителност и изискват повече смилаща среда. За да се извлекат ползите и от двете обикновено се комбинират, като се използва SAG мелница за първично смилане и след това топкови за вторично смилане.

Енергийна ефективност и икономически аспекти

Смилането отнема най-много енергия в минералообогатителния процес и следователно има голям ефект върху стойността на крайния продукт. Енергийния разход се измерва в киловат час за тон, което показва колко енергия е изгубена за преработката на тон материал. За оценка на необходимата енергия за постигане на степен на смилане се използва индекса на Бонд[1], като приложението му е още в избора на размер и мощност на мелниците, както и при икономическата оценка на проекта. „*Специфичната енергия, необходима за определен производствен капацитет, се оценява чрез индекса на Бонд*“ (Finch, B. A., 2016).

[1] Bond, F.C. (1961). *Crushing and Grinding Calculations*.

Фактори, влияещи върху консумацията на енергия

Има много фактори, които влияят на консумацията на енергия. По-високата твърдост, например, води до повече нужна енергия. Нестабилното подаване на материал също води до загуба на енергия. Влажността, гранулометричния състав, вида мелница и количеството смилаща среда също имат ефект върху използваната енергия.

Оперативни разходи

Оперативните разходи се състоят от електроенергията, износването на облицовката, ремонт, поддръжка и разход по топките. Колкото е по-голяма мелницата, толкова е по-голям разхода от износването на облицовката и смилащата среда. Изборът на правилен режим на работа също е важен за по-ниски разходи за енергия, по-рядка смяна на облицовката и висока ефективност. От всичко това можем да заключим, че близкото наблюдение и надзор над процеса на смилане има пряко позитивно икономическо значение.

Възможности за оптимизация

Тези разходи не могат да бъдат премахнати, но могат да бъдат оптимизирани. Използването на затворен цикъл с класификация, правилния брой топки в барабана на мелницата, правилния избор на облицовка, както и автоматизирането на управлението са примери за начини за оптимизация.

Анализ и обсъждане

В настоящата публикация са разгледани част от традиционните технологии в преработката на медни руди. Показано е, че механичната преработка е ключова при извличането на мед, като основните процеси са раздробяване. Смилане и класификация. Особено важно е смилането, като етап на подготовка за последващата стъпка на флотация. То пряко влияе върху качеството на концентрата. Комбинирането на полуавтогенните и топковите мелници е широко-разпространено.

Изкарани са основните предимства и недостатъци на тези технологии. Тяхната висока ефективност, широко приложение и възможността да преработват високи количества са примери за предимствата. SAG мелниците позволяват висока производителност и по-опростена технологична схема, докато топковите мелници осигуряват по-добър контрол върху крайния гранулометричен състав. Недостатъците са високата енергийна консумация, износването на оборудването и необходимостта от постоянен контрол върху процеса.

Тенденцията е към оптимизация на тези доказани технологии, като това се изразява в използването на затворени цикли с класификация и други, които от своя страна намаляват енергийния и финансов разход, и увеличават продуктивността,

Заключение

Основните изводи от публикацията са че раздробяването, смилането и класификацията са основни етапи при преработката на мед, които определят ефективността на последващото флотационно обогатяване. При сулфидните медни руди тези процеси са особено важни, тъй като позволяват освобождаване на ценните минерали и получаване на концентрат с високо съдържание на мед. Оптимизацията на тези процеси е от висока важност, тъй като смилането е най-енергоемкият етап в преработката и следователно правилния избор на съоръжения, начин на работа и други изброени могат да доведат до съществено намаляване на енергийния разход и следователно икономическата ефективност.

Балансът между достатъчно освобождаване на минералите и избягване на прекомерно смилане е ключов за добрите технологични резултати.

Перспективите за бъдещо развитие са свързани с повишаване на ефективността.
В моментните условия на растящо търсене на мед и ограничено предлагане, подобряването на обогатителните процеси ще има все по-важна роля. Увеличаване на ефективността може са се окаже ключово за потенциално повишаване на предлагането.

Благодарности: Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г и финансирана от МОН.

Литература

Bahrami A, A. M. (2020). A process mineralogy approach to study the efficiency of milling of molybdenite circuit processing. Sci Rep. Извлечено от https://doi.org/10.1038/s41598-020-78337-8

Bond, F. C. (н.д.). Crushing & Grinding calculations Part I. От F. C. Bond, Mineral Comminution Circuit (стр. 378-548). British Chemical Engineering. Извлечено от https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2015/11/Bond-F-C-1961-Crushing-and-Grinding-Calculations.pdf

Boylston, A. (n.d.). How to ensure energy efficiency in mining 1/4: Comminution circuit design. Retrieved from Метсо: https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/how-to-ensure-energy-efficiency-in-mining-part-one/

Britannica Editors, c. (2018). Encyclopedia Britannica. Retrieved from Encyclopedia Britannica: https://www.britannica.com/science/chalcocite

Britannica Editors, c. (2025). Encyclopedia Britannica. Извлечено от Encyclopedia Britannica: https://www.britannica.com/science/chalcopyrite

Butts, A. T. (2023). Encyclopedia Britannica. Извлечено от Encyclopedia Britannica: https://www.britannica.com/technology/copper-processing

Dimov, E., Bakyrdjieva, R., & Stratiev. N. (2020). The mining industry and the recycling of raw materials as an important element of the Bulgarian economy. *Journal of Mining and Geological Sciences*, 63, 289-292.

Finch, B. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*. Oxford.

Flanagan, D. M. (2026). Copper Statistics and Information. National Minerals Information Center.

G.R. Ballantyne, M. P. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*, стр. 109-114.

Galabova, B., Trifonova, B., & Petrova, V. (2025). Integration of green competencies in entrepreneurial practices for sustainable development of the industry. *The Eurasia* Proceedings of Educational and Social Sciences (EPESS), 43, 102-114.

IEA. (2024). Мед. Париж: Международната агенция по енергетика.

Jena, S. S. (2022). Sustainable Use of Copper Resources: Beneficiation of Low-Grade Copper Ores. Minerals, 12(5), Article 545. Минесота: Университет Минесота. Извлечено от https://doi.org/10.3390/min12050545

Jianhua Chen, Z. X. (2020). Chapter 2 - Electronic properties of sulfide minerals and floatability. Electronic Structure and Surfaces of Sulfide Minerals, стр. 13-81.

Marc Allen, T. D. (2021). MINING ENERGY CONSUMPTION 2021. Извлечено от CEEC The Future: https://www.ceecthefuture.org/resources/mining-energy-consumption-2021

Morrell, S. (2008). A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilisation efficiency. Minerals Engineering, 224-233.

Napier-Munn, T. (2020). Mineral Comminution Circuits. JKMRC.

Petrova, V. (2023). Exploring the opportunities for sustainable management of critical raw materials in the circular economy. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM),26, 664-671

Qicheng Feng, W. Y. (2022). Flotation of copper oxide minerals: A review. International Journal of Mining Science and Technology, стр. 1351-1364.

Yan, A. G. (2016). Mineral Processing Design and Operations.

СЕКЦИЯ

УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

SECTION

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINERAL AND ROW MATERIAL INDUSTRY

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND SAFETY SYSTEM MANAGEMENT FOR A SAFER WORKPLACE

Yosif Antonov, Alexander Tsanov

DPM Krumovgrad, 6900 Krumovgrad; Email: yosif.antonov@dpmmetals.com, alexander.tsanov@dpmmetals.com

ABSTRACT: Artificial intelligence will be implemented in the management of occupational health and safety systems to track and improve workplace safety. Providing monitoring and control, decision-making, and predictive data for upcoming hazards to artificial intelligence enables timely response to prevent them. The transition from the 4th industrial - digital revolution to the 5th industrial - artificial intelligence revolution is the Modification of AI (artificial intelligence) and cyber attacks, which will lead to an increase in the risk and more serious incidents, which is not desirable. After analysing the OSH systems by AI, an operator needs to perform a credibility check because it carries a risk of turning from positives to negatives in management, even the collapse of the OSH systems for a safe workplace.

Key words: cybersecurity, artificial intelligence, OSH, 4th digital revolution, 5th revolution artificial intelligence, risks, improvements.

ИЗКУСТВЕНИЯТ ИНТЕЛЕКТ И УПРАВЛЕНИЕТО НА СИСТЕМИТЕ НА БЕЗОПАСНОСТТА ЗА ПО-БЕЗОПАСНО РАБОТНО МЯСТО

Йосиф Антонов, Александър Цанов

ДПМ Крумовград 6900 Крумовград

РЕЗЮМЕ: Изкуственият интелект ще се внедрява в управлението на системите за безопасност и здраве при работа за проследяване и подобряване на безопасността на работното място. Предоставянето на мониторинга и контрола, вземането на решения и даването на прогнозни данни за предстоящи опасности на изкуствения интелект дава възможност за навременно реагиране за предотвратяването им. Преминаването от 4-та индустриална - дигитална революция към 5та индустриална -изкуствен интелект революция е Модифицирането на ИИ (изкуствен интелект) и кибер атаките , които ще доведат до увеличаване на риска и по сериозни инциденти, което не е желателно. След направен анализ на системите на БЗР от ИИ, операторът е необходимо да направи проверка за достоверност, защото крие риск за обрат от позитиви към негативи в управлението и дори до срив на системите на БЗР за безопасно работно място.

Ключови думи: кибер сигурност, изкуствен интелект, безопасност и здраве при работа (БЗР) , 4-та дигитална революция, 5-та революция изкуствен интелект, рискове, подобрения.

Въведение

Използването на изкуственият интелект в управлението на безопасността означава въвеждането му в процесите и системите, предназначени да гарантират безопасността на работното място. Технологиите като алгоритъм за машинно обучение, прогнозен анализ и компютърно зрение се използват за наблюдение, оценка на риска и подобряването на мерките за безопасност в компаниите в различни сфери от икономиката.

Изкуственият интелект се е развил от теоретични концепции до практически приложения, които помагат за решаването на проблемите, обхващащи всички сфери на развитието на човека. Съвременният изкуствен интелект революционизира икономиките, автоматизира повтарящите се задачи, анализира големи масивни данни за по-добро вземане на решения и оптимизиране на операциите. Най-важното е, че изкуственият интелект е изключително полезен за подобряване на системите за управление на безопасността като изпраща моментни съобщения за евентуални отклонения в процеси по съоръженията.

Намаляване на злополуките и инцидентите, свързани с безопасността

Ежедневното и рутинно управление на безопасността често води до опасности, след което те преминават в инциденти. При прогнозен анализ с инструменти с изкуствен интелект компаниите са по-уверени в предотвратяването на потенциални опасности, които водят до по-малко наранявания и смъртни случаи на работното място.

Подобряване и спазване на законодателството

Цифровите решения, задвижвани от изкуствен интелект, гарантират спазването на стандартите по безопасност чрез непрекъснато наблюдение, идентифициране на опасности на съответното място и бързо вземане на решения за тяхното елиминиране на проблемите в зародиш, както и реакции в извънредни ситуации, чрез въвеждане на добри практики, изготвяне на планове за предотвратяване и ликвидиране на аварии и схеми за уведомяване. Например план за ликвидиране на аварии (ПЛА) трябва да се изготвя при:

- тежки метеорологични условия (ураган, зимни бури) и други природни бедствия (земетресения, горски пожари, наводнения и прочие);
- катастрофи с превозни средства (автомобили, влакове, самолети и др.);
- инциденти с опасни материали като разливи на горива или смазочни материали;
- химични, биологични, микробиологични и радиоактивни бедствия, изпускане на опасни химични вещества и смеси (запалими вещества, дразнители, газ под налягане, токсини, вещества, опасни за околната среда, микроорганизми и др.
- терористични актове;
- граждански безредици.

Увеличаване на икономиите

Стриктно спазване на изискванията за намаляване на риска от глоби, санкции, съдебни спорове, обезщетения и уреждане на регулацията на компаниите. Освен това, чрез получаване на информация за различни фактори, които влияят върху безопасността, компаниите могат по-добре да вземат решения за рентабилни инвестиции в безопасността, оперативни промени, решения и стратегии за управлението на риска

Ползи от внедряване на софтуери с изкуствен интелект за следене управлението на риска:

1. Ефективност на процесите за оценка на риска – получаване на по-бързи и по-точни оценки за риска, което води до по-бързо вземане на решения.
2. Възможност за анализ на разузнавателна информация за заплахи – анализиране на данните от разузнавателната информация с цел елиминиране на потенциални рискове преди възникването им.
3. Мониторинг и сигнали в реално време – с анализиране на данни в реално време предприятията могат да бъдат уведомявани за всякакви промени или нововъзникващи заплахи, както и да получат сигнали за незабавно предприемане на действия.
4. Откриване на измами – изкуствения интелект може да анализира данни, за да идентифицира модели и аномалии, показващи измамна дейност, като по този начин помага на предприятието да предотврати финансови загуби.
5. Намаляване на риска на работното място – може да се идентифицират потенциални рискове за безопасността на работното място
6. Регулаторно съответствие – може да помогне на предприятието да бъде в съответствие с регулациите чрез непрекъснато наблюдение и анализ на данни.

Приложение на изкуствения интелект за безопасност

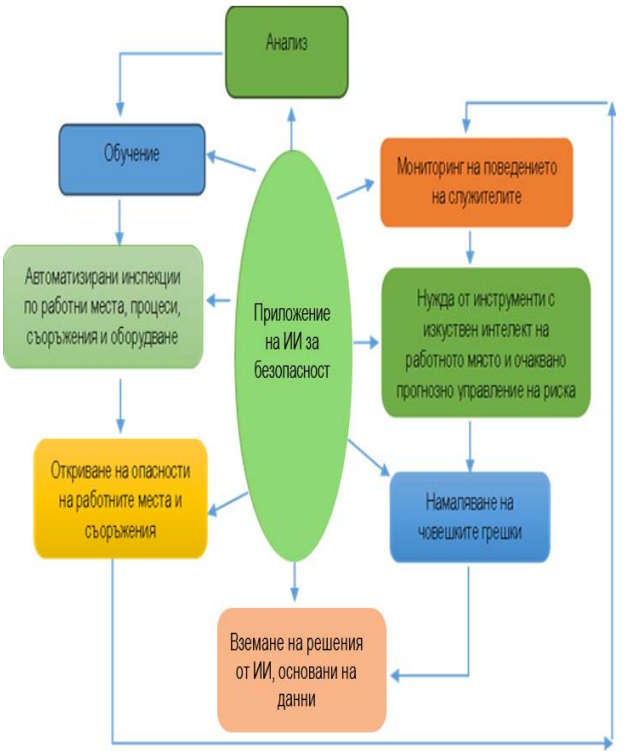
В сравнение с по-старите технологии и ръчни методи, изкуственият интелект в областта на околната среда, здравето и безопасността предлага превъзходна скорост, точност и надеждност, което го прави ценен инструмент за повишаване на безопасността в различни сфери на икономиката.

На фиг. 1 са показани някои начини, по които предприятията използват инструментите на изкуствения интелект.

Анализ

Анализите, базирани на изкуствен интелект използват техника за машинно обучение и анализ на данни за да обработват и усвоят огромни количества данни, свързани с безопасността, от сензорни мрежи, камери и доклади за инциденти. Това спомага за идентифициране на модели, прогнозиране на потенциални рискове, оценка на опасностите на работното място и набелязване на области за подобряване. Някои примери от реалния живот в различни сфери на икономиката:

- производство – инструменти за прогнозен анализ следят производствените процеси на машините, предвиждат повреди, преди да са се случили и предотвратяват инциденти във фабриките;
- строителство – системите преглеждат данни за обекта, за да се предвидят инциденти, като честотата и причините за подхлъзване, спъване, падане и се предложат превантивни действия за тяхното елиминиране;
- здравеопазване – анализират се данните за безопасността на болниците чрез идентифициране на тенденциите и инцидентите, свързани с безопасността на пациентите, като например грешки при вземане на лекарства.



Фиг. 1. Приложение на изкуствения интелект за безопасност

Обучение по безопасност

Целесъобразно е заменянето на дългите дискусии в залата със симулации, виртуална реалност и интерактивни модули, както и създаване на персонализирани и адаптивни курсове за служителите. ИИ позволява на работещите да практикуват справяне с опасни ситуации в безопасна среда и да полагат предварително изпити или кратки тестове, когато им е удобно. Примери в области като:

- добив и преработка на минни суровини – програмите за обучение с виртуална реалност могат да симулират опасни среди като добиването на руда в котлован, работа във фабриката, помагайки на работниците да разберат и практикуват реакции при извънредни ситуации без реални рискове, които се провеждат ежемесечно в реално време като аварийни тренировки от отдел БЗР;
- хотели и заведения за хранене – работниците преминават специализирани курсове по безопасност чрез модули, които ги обучават на правилна работа и използване на пожарогасители, пожарни инсталации и процедури при извънредни ситуации.

Автоматизирани инспекции по работните места, процеси, оборудване и съоръжения

Предприятията могат да създават персонализирани и изчерпателни контролни списъци за рутинни проверки на обекти, проверки на качеството на продуктите и одити (вътрешни и външни независими одити) на процеси, които гарантират точността и надеждността на данните. По-модерните системи използват дронове и технология за компютърно зрение за проверка с висок риск, които не изискват човешка намеса:

- чрез използването на дронове в Минно добивната промишленост може да се инспектират покривни конструкции, откоси над добива, съоръжения за съхранение на минни отпадъци, да се следи състоянието на хвостохранилищата и на тръбопроводите за разливи от пробойни по тях;
- чрез сензори и камери може да се инспектират машините, като се идентифицира местоположението на дефектите в критичните компоненти и агрегати с цел предотвратяване на инциденти, причинени от дефектно оборудване.

Откриване на опасности на работните места и в съоръженията

- системите, управлявани от ИИ, непрекъснато наблюдават средата за промени, като например температурни колебания, токсични газове или физически препятствия, които биха могли да представляват риск за безопасността на работната среда, след което подават сигнал за предприемане на адекватни мерки;
- автономните минни превозни средства са самоуправляващи се самоходни и товарящи машини (челен товарач, сервизна машина), които могат да работят непрекъснато под земята като по този начин не само повишават производителността, но и предпазват работниците от евентуални изтичания на газ или срутвания в минните изработки и пътни артерии.

Мониторинг на поведението на служителите

- камерите и сензорите с ИИ-алгоритъм проследяват и анализират действията на работниците, за да идентифицират опасни поведения, като например неправилно използване на оборудването, не ергономични пози и др. и в случай на откриване на опасно поведение системата може да уведоми ръководителя на дейността или прекия ръководител и да предостави обратна връзка на работниците в реално време;
- камерите с ИИ могат да анализират изражението на лицето, движението на очите, телесната температура и други физиологични данни, за да открият признаци на умора.

Нуждата от инструменти с изкуствен интелект на работното място и очаквано прогнозно управление на риска

Изкуственият интелект не само ускорява оценките на риска, но и помага за създаване на по-безопасна работна среда по начин, който преди беше невъзможен.

Особено полезно е приложението на ИИ с възможност да предвижда ситуации, които е възможно да се случат много преди да се появи и най-малкият признак. Това става въз основа на анализ на текущите условия и обработка в реално време на данни за сходни ситуации.

При протичане на процесите човек си мисли, че машините работят перфектно. Но с изкуствения интелект може да се открие проблем, невидим за хората като ранен признак за износване, напрежение и неизправност. Когато се идентифицира подобен проблем, ще бъдем уведомени за дефектни машини, съоръжения и агрегати, което ще ни позволи да ги отремонтираме преди да се превърнат в сериозна заплаха за безопасността на работното място и процеса.

Това е важно и за откриването на злополуките и нараняванията на работното място. Чрез оценката на риска и условията на труд, поведението на служителите и факторите на околната среда, системата може да определи областите, където работниците е по-вероятно да се подхлъзнат, спънат или да бъдат изложени на друга опасност. Това ще позволи да се предприемат навременни превантивни мерки. За подобряване на тези възможности, е необходимо да се разработи персонализиран софтуер и да се изградят решения с изкуствен интелект, съобразени с необходимите уникални предизвикателства пред безопасността, осигурявайки прецизно откриване на опасности и ефективно смекчаване на риска. Използването на специализиран софтуер гарантира спазването на строги регулаторни стандарти и в същото време предоставяне на надеждни възможности за мониторинг на безопасността в съответната компания.

Намаляване на човешките грешки

Вероятно най-голямата причина за всички злополуки, случвали са се в миналото на работното място, е човешката грешка. Възможно е да пропускаме важни фактори, които могат да доведат до опасности или правим грешни изчисления – грешките се случват, независимо колко добре сме обучени ние или нашите служители.

Изкуственият интелект вероятно няма да допуска подобни грешки. За разлика от човека, той не се разсейва и изморява. Постоянно следи протоколите за безопасност с прецизност, като гарантира, че машините се използват правилно и работниците спазват правилата. Освен това, изкуственият интелект може да автоматизира много процеси и задачи, които поради рутинния си характер биха могли да бъдат пренебрегнати от инспектиращия, служителя или оператора на работното място. В резултат на това рисковете, които биха могли да бъдат неглижирани или забравени от нас, ще бъдат маркирани от изкуствения интелект, което ни позволява да се справим с тях веднага.

Вземане на решения от изкуствения интелект, основани на данни

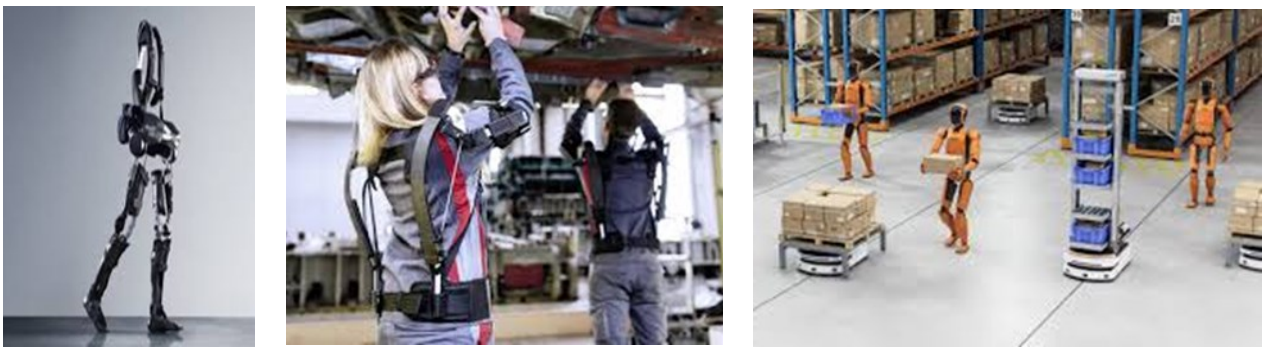
Въпреки, че човешкото присъствие е необходимо, вземането на решения въз основата на интуицията или предположенията е рисковано. Както бе споменато по-напред, човекът прави грешки и цената е много висока дори с фатален изход. Що се отнася до изкуствения интелект, той не прави предположения. Прозренията му се основават на твърди данни, независимо дали става въпрос за:

- идентифициране на опасни зони на работното място;
- избор на най-подходящото време за ремонт;
- оценката на ефективността на мерките за безопасност.

За максимална полза от тези системи, задвижвани от изкуствен интелект, много компании проучват и натрупват данни, свързани с безопасността във всички отдели. Това ще позволи да се направи оценка на безопасността в компанията във времето, да се сравнят текущите данни с данни от предишни периоди с цел да се изясни дали броят на инцидентите се е увеличил или намалил и да се извършат необходимите корекции за подобрение.

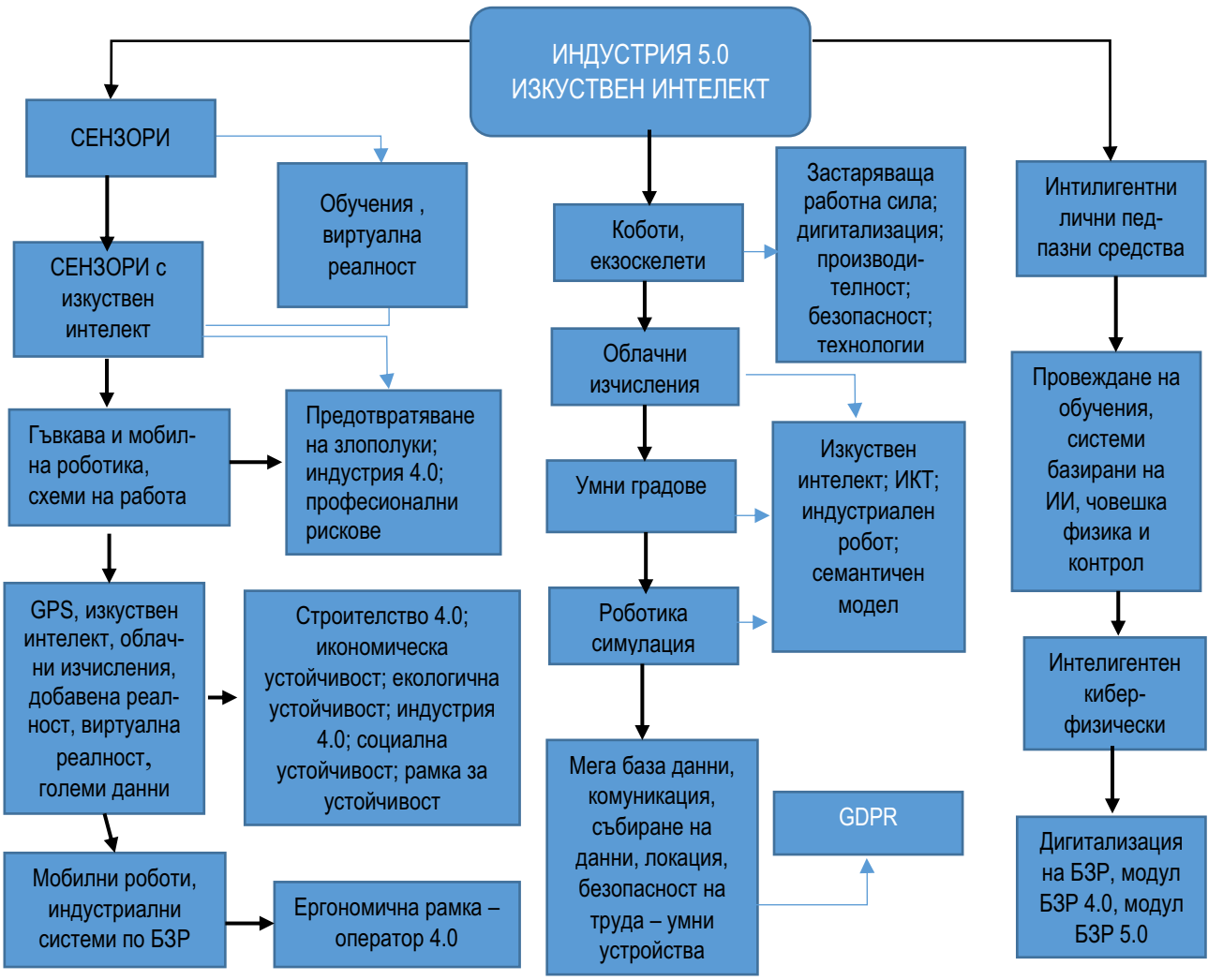
Много екипи по здравословни и безопасни условия на труд обмислят изграждане на ясна рамка за наблюдения в реално време и автоматизирано отчитане на инциденти и техния анализ с цел намаляването им, избягване на прекъсвания и подобрения в приоритетните работни процеси за безопасност.

На фиг. 2 са показани роботи, коботи и екзоскелети. Внедряването им ще освободи мускулното напрежение в човешкото тяло и ще подобри качеството и безопасността при изпълнението на определена дейност.



А). Б). В).

Фиг. 2: А) Екзоскелет; Б) Работници, оборудвани с екзоскелет; В) Коботи, работещи в склад



Фиг. 3. Индустрия 5.0 – изкуствен интелект – интелигентни системи за по-безопасни жилища, обществени и работни места

Индустрия 5.0 (фиг. 3) се базира основно на Изкуствения интелект, който се внедрява в много сфери от човешкия живот за по-голяма безопасност и атрактивност. Използването на ИИ в ежедневието на хората води до намаляване на стреса и увеличаване на безопасността при ползването на зони за отдих, жилища, обществени места и транспорт.

Заключение

Инвестирането в ИИ за управление на безопасността на работното място предоставя множество предимства за компаниите. Но те трябва да подходят стратегически към внедряването му, за да реализират ползите от него. Вниманието трябва да се съсредоточи най-вече върху:

1. *Баланс между изкуствения интелект и човешкия надзор*. Въпреки, че ИИ може да обработва данни и да идентифицира рискове по-ефективно от човека, не е редно да замества *изцяло* човешката преценка. Повечето модели с ИИ могат да утвърдят предубеждението в данните, върху които е обучен и затова човешкият контрол помага за справянето с този проблем, като гарантира етично и справедливо вземане на решение.
2. *Обучение на служителите за отговорно използване на ИИ*. Работниците, служителите и ръководството е необходимо да разбират как работи системата, за да могат да взаимодействат по-добре с нея. Липсата на обучение може да доведе до злоупотреби, погрешно тълкуване или недоверие към системата.
3. *Сигурност при спазване на поверителността на данните*. Системата разчита на огромни количества лични и оперативни данни, включително здравна информация/досиета. Обобщаването на данните на работниците трябва да е свързано със защита на личната информация, като се осигури спазване на законите за поверителност на данните, Общия регламент относно защита на данните (GDPR) и Закона за преносимост и отчетност на здравното осигуряване (HIPAA).
4. *Приложения в реално време.* Изборът на приложение в реално време, като например откриване на опасности, прогнозна поддръжка и наблюдение на поведението, позволява на компаниите да предотвратят инциденти, преди да са се случили, като се спазват основните правила на безопасност.
5. *Започване с малки стъпки и поетапно мащабиране*. Интегрирането на ИИ в системите за управление на безопасността може да наруши съществуващите процеси, правила и процедури, ако бъде внедрен набързо. Необходимо е да се започне по-бавно, да се тества в контролирана среда, след което следва извличане на изводи и при необходимост коригиране на подхода въз основа на обратната връзка.

Литература:

https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj/eng
https://www.hhs.gov/hipaa/index.html
https://www.uvex-safety.com/en/individual-ppe/digital-servicetools/
https://www.hapo.eu/en/12-hapo-exoskeleton

CONCESSIONS IN BULGARIAN LAW: A SYSTEMATIC AND COMPARATIVE REVIEW

Andrey Georgiev

University of Mining and Geology “St. Ivan RIlski”, 1700 Sofia, E-mail: a.georgiev@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents a systematic and comparative analysis of the concession law in Bulgaria. The study covers the entire legislative framework: the Concessions Act, the Underground Resources Act (URA), the Water Act (WA), and the Black Sea Coast Development Act (BSCDA). For each concession type, a detailed analysis is performed across key criteria: subject-matter and object, parties and their requirements, duration, rights and obligations, concession payment, award procedure, and grounds for termination. Special emphasis is placed on concessions for the extraction of underground resources (URA). A comparative law overview covering France, Germany, and Spain is provided and *de lege ferenda* proposals are formulated.

Key words: concession, underground resources, concession grantor, concessionaire.

КОНЦЕСИИТЕ В БЪЛГАРСКОТО ПРАВО: СИСТЕМАТИЧЕН И СРАВНИТЕЛЕН ПРЕГЛЕД

Андрей Георгиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

Резюме. Настоящият доклад представя систематичен и сравнителен анализ на института на концесиите в действащото българско право. Изследването обхваща цялата законодателна рамка: Закона за концесиите, Закона за подземните богатства (ЗПБ), Закона за водите (ЗВ) и Закона за устройството на Черноморското крайбрежие (ЗУЧК). За всеки вид концесия е извършен задълбочен анализ по ключови критерии: предмет и обект, субекти и техните изисквания, срок, права и задължения на страните, концесионно плащане, процедура за предоставяне и основания за прекратяване. Специален акцент е поставен върху концесиите за добив на подземни богатства (ЗПБ). Направен е сравнителноправен преглед (Германия, Франция и Испания) и са формулирани изводи *de lege ferenda*.

Ключови думи: концесия, подземни богатства, концедент, концесионер.

Въведение

В теорията могат да бъдат откроени две основни становища относно правната природа на концесията. Според първото тя представлява разновидност на административния договор, доколкото възниква въз основа на властническо решение на административен орган и е подчинена на специален публичноправен режим. Според второто становище, което е част от българската административноправна теория, концесионното право-отношение има комплексен публичноправен характер, който съчетава административноправни, облигационно-правни, вещноправни и икономически елементи (Дерменджиев и др., 2012).

Настоящото изследване споделя второто становище, тъй като възприема, че концесионното правоотношение не може да бъде обяснено единствено чрез института на административния договор. Концесията възниква след провеждането на административна процедура и чрез властнически акт на компетентния орган, но съдържанието на възникналото правоотношение се реализира чрез двустранен договор, който поражда насрещни имущественоправни права и задължения.

Наред с това предметът на концесията е свързан с предоставяне на ограничени права върху публична държавна собственост или върху изключителна държавна собственост, което въвежда и специфични вещноправни последици.

От икономическа гледна точка концесията се определя като форма на публично-частно сътрудничество, при която основно значение придобиват разпределението на оперативния риск, възвръщаемостта на инвестициите и осигуряването на обществена полза. Съвкупността от посочените характеристики обосновава извода, че концесията надхвърля класическата конструкция на административния договор и се характеризира като самостоятелен комплексен правен институт и като своеобразна договорна форма за разпределение на риска и инвестиционните стимули (Hart, 2003; Hodge & Greve, 2007).

Основната изследователска хипотеза, която се формулира в настоящото изследване, е, че нормативната диференциация на концесионните режими в българското право не представлява несистемна законодателна фрагментация, а е функционално обусловена от конституционния статут, икономическата природа и общественото предназначение на съответния публичен ресурс. Поради това анализът на концесиите не може да бъде ограничен единствено до Закона за концесиите, а е необходимо да обхване и специалните режими, установени в Закона за подземните богатства, Закона за водите и Закона за устройството на Черноморското крайбрежие.

Целта на настоящата статия е да направи опит за систематизация на действащите режими на концесиите в българското право, както и да анализира тяхното икономическо предназначение като механизъм за ефективно управление на публични ресурси чрез участие на частния сектор.

За постигането на тази цел изследването използва нормативен и системен анализ, сравнителноправен метод и функционален подход при оценката на различните концесионни режими. Концесионният модел се разглежда едновременно като правен институт и като инструмент за разпределение на инвестиционния, оперативния и пазарния риск между държавата и частния инвеститор. Това взаимодействие между правната регламентация и икономическите стимули определя ефективността на концесионната политика и нейното значение за устойчивото развитие (World Bank et al., 2017).

Основно изложение

Нормативна уредба

Конституционната основа на концесиите е чл. 18, ал. 1 КРБ, който прогласява изключителна държавна собственост върху подземните богатства, крайбрежната плажна ивица, водите и републиканските пътища, а ал. 6 съдържа конституционна делегация, че условията и редът за предоставяне на концесии се уреждат със закон, което е правното основание за специалните закони в сферата.

Правната рамка на концесиите на законово ниво претърпя съществена реформа с приемането на нов Закон за концесиите (ЗК, обн. ДВ, бр. 96/2017, в сила от 02.01.2018), транспониращ Директива 2014/23/ЕС. С влизането му в сила бяха отменени предходният Закон за концесиите (ДВ, бр. 36/02.05.2006) и Законът за публично-частното партньорство (ДВ, бр. 45/15.06.2012).

Законът за концесиите въвежда ключовите принципи за всяка концесия (публичност, прозрачност, равнопоставеност, недопускане на дискриминация и пропорционалност - чл. 4 ЗК). Законът се прилага за концесии над европейски праг (за период 2026-2027 г. – 5 404 000 евро съгласно делегиран регламент (ЕС) 2025/2151 от 22.10.2025г.).

Успоредно със Закона за концесиите действат специалните закони, уреждащи ресурсни концесии – Закон за подземните богатства (ДВ, бр. 23/12.03.1999), Закон за водите (ДВ, бр. 67/27.07.1999) и Закон за устройството на Черноморското крайбрежие (ДВ, бр. 48/15.06.2007). Тези концесии са изрично изключени от обхвата на ЗК (чл. 25 ЗК).

Подзаконовата уредба включва актове относно мониторинга и контрола, финансово-икономическите елементи, ресурсните плащания, работните проекти и рекултивацията.

Видове концесии

Концесиите се систематизират в две групи: (1) концесии по Закона за концесиите – за строителство (чл. 7 ЗК) и за услуги (чл. 8 ЗК); (2) специални ресурсни концесии по специалните закони - за добив на подземни богатства (ЗПБ), за добив на минерална вода (ЗВ) и за управление на морски плажове (ЗУЧК).

Концесии по ЗК: строителство и услуги

Предмет и обект. Концесията за строителство предполага изпълнение на строителство и предоставяне правото на експлоатация на строежа при поемане на оперативния риск (чл. 7, ал. 1 ЗК). Оперативният риск включва риска от търсенето (demand risk) и/или риска от предлагането (supply risk). При концесията за услуги концедентът предоставя правото на получаване на приходи от услугите (чл. 8, ал. 1 ЗК). Когато едновременно се възлагат строителство и услуги, концесията се определя като концесия за строителство (чл. 10 ЗК). При отсъствие на реален трансфер на оперативен риск договорът е обществена поръчка по ЗОП (чл. 3, ал. 1 от ЗК). В икономическата теория именно разпределението на риска се възприема като основният критерий за ефективност на концесионния модел. Частният партньор поема риска, който може да управлява по-ефективно, докато публичният сектор запазва рисковете, произтичащи от нормативни промени, публичната политика и форсмажорни обстоятелства. С това се реализира принципът за оптимално разпределение на риска, възприет като основен критерий при публично-частните партньорства (Iossa & Martimort, 2012; Siemiatycki & Farooqi, 2012).

Обектът на концесията може да е държавна или общинска собственост, на концесионера или трето лице (чл. 15, ал. 3 ЗК). Приращенията – строежи и подобрения, стават собственост на концедента от момента на изграждането им (чл. 16, ал. 5 ЗК), което е една от основните гаранции за запазване на публичната собственост.

Концедент и концесионер. Концедент е министърът по ресорна компетентност (държавни) или кметът (общински), в едностепенна система. Концесионер може да е всеки икономически оператор (физическо лице, юридическо лице или обединение).

Срок и възнаграждение. Срокът при концесии над европейски праг не може да надвишава времето, необходимо за възвръщане на инвестицията (чл. 34, ал. 3 ЗК). Срокът на концесията може да се удължава, като общият срок на всички удължавания, независимо от основанието за това, не може да е по-дълъг от една трета от конкретния срок, определен с концесионния договор. При концесия за услуги, когато обектът на концесията е държавна или общинска собственост, винаги се дължи концесионно възнаграждение. При концесия за строителство концесионно възнаграждение се дължи, когато обектът на концесията включва съществуващ строеж, който е държавна или общинска собственост. Размерът на задължението за плащане на концесионно възнаграждение се определя от концедента във всеки конкретен случай в зависимост от справедливото разпределение на икономическата и финансовата изгода от концесията между концедента и концесионера и от постигането на социално приемлива цена на услугите, предоставяни с обекта на концесията.

Концесии за добив на подземни богатства (ЗПБ)

Конституционна основа. Подземните богатства са изключителна държавна собственост по силата на чл. 3, ал. 1 ЗПБ и чл. 18, ал. 1 КРБ, независимо от собствеността на земната повърхност. Добивът им е допустим единствено чрез концесия (чл. 4, ал. 2 ЗПБ). Съгласно чл. 2, ал. 1 ЗПБ, подземните богатства включват: метални и неметални полезни изкопаеми, нефт и природен газ, твърди горива, строителни, скалнооблицовъчни материали, минни отпадъци и дълбоки геотермални ресурси.

Процедура за предоставяне на концесия. ЗПБ установява многоетапна система за предоставяне на концесия като се започне от разрешение за проучване, което може да доведе до откриване на геоложко откритие (чл. 21, ал. 2 ЗПБ). При установяване на достатъчно запаси и ресурси геоложкото откритие се превръща в търговско откритие (чл. 21, ал. 3 ЗПБ), което води до пряко предоставяне на концесия за добив. Геоложкото откритие установява наличието на полезното изкопаемо и се регистрира от комисия, назначена от министъра на енергетиката. Търговското откритие потвърждава икономическата рентабилност и поражда преимущественото право на концесия по чл. 54 ЗПБ – уникален институт без аналог при другите видове. Правата

върху геоложката информация и режимът за нейното предоставяне и съхранение се уреждат от ЗПБ, като при прекратяване съответната документация се предава в Националния геоложки фонд.

Права и задължения на концесионера. Концесионерът придобива собственост върху добитите полезни изкопаеми след физическото им изваждане и може свободно да се разпорежда с тях (продажба, преработка, износ). Прехвърлянето на права и задължения на трети лица е допустимо само с разрешение (чл. 25, ал. 2 ЗПБ), т.е. режимът не е забранителен. Задълженията на концесионера включват провеждане на добива по утвърден добивен план, заплащане на концесионно възнаграждение, рекултивация на нарушените терени, управление на минните отпадъци и предаване на геоложката информация в НГФ при прекратяване. Икономическата функция на концесионното възнаграждение е двойна. От една страна то компенсира държавата за предоставянето на изключителното право върху ограничен природен ресурс, а от друга, осигурява участие на обществото в икономическите ползи, реализирани от експлоатацията на находището (Boadway & Keen, 2010; Otto et al., 2006).

Концедент, срок и процедура. Системата е двустепенна: Министерският съвет приема решението, а Министърът на енергетиката сключва договора. Срокът е до 35 г. (чл. 36, ал. 1 ЗПБ), като това е законовото ограничение, обусловено от невъзобновяемия характер на ресурса. Срокът на концесията може да бъде удължен по мотивирано искане на концесионера, направено не по-късно от една година преди изтичането на срока на концесията като общият срок на концесията не може да бъде по-дълъг от 50 години. Процедурите за предоставяне на концесия включват пряко предоставяне по право (чл. 54 ЗПБ), конкурс и търг. Концедентът има право да спре дейността на концесионера при нарушения (чл. 68 ЗПБ), което е израз на контрола, който има държавата, осъществяван чрез Министерството на енергетиката.

От изложеното става ясно, че правният режим по закона за подземните богатства се характеризира със значително по-висока степен на публичноправна регулация в сравнение с общия режим по Закона за концесиите. Подобен законодателен подход е обусловен от особената конституционна защита на подземните богатства като изключителна държавна собственост. Като резултат от това свободата на договаряне е значително ограничена, а законът предоставя на държавата широки контролни правомощия както при предоставянето, така и при изпълнението на концесията. Така икономическият интерес на концесионера е поставен в зависимост от необходимостта от гарантиране на обществения интерес и устойчивото използване на природните ресурси.

Концесии за добив на минерална вода (ЗВ)

Правна природа и предмет. Концесиите за добив на минерална вода са уредени в Закона за водите и Наредба за концесиите за добив на минерална вода. За разлика от концесиите по ЗПБ, ресурсът (водата) е практически възобновяем при разумно ползване в рамките на утвърдения годишен експлоатационен ресурс. Предметът е ограничен изчерпателно до бутилиране на натурална минерална вода и/или газирани и други напитки, в състава на които се включва минерална вода и до извличане на ценни вещества. Балнеолечебните, рехабилитационните и СПА цели следват различен режим, включващ издаване на разрешително за ползване, а не концесия.

Уникални особености. Концесиите за добив на минерална вода се характеризират с няколко своеобразни специфики. На първо място, налице е абсолютна забрана за прехвърляне на правата и задълженията по договора, т.е. по-ограничителен режим дори от ЗПБ. На второ място, налице е гратисен период, в рамките на който концесионерът е освободен от плащане до въвеждането в експлоатация на бутилиращото предприятие. На трето място, предвидено е задължително разпределение на не по-малко от 50% от концесионното плащане в полза на общинския бюджет, което е своеобразна форма на фискална децентрализация, чрез която част от икономическата полза от използването на публичния ресурс остава в общината, върху чиято територия се осъществява експлоатацията (Oates, 2004).

Процедура и срок. Процедурата е открита и включва едновременно подаване на заявление и оферта, без да е необходимо допълнително договаряне. Критериите за оценка са нормативно регламентирани (размер на концесионното възнаграждение за 1 куб. м минерална вода; срок на концесията; размер на предоставената гаранция; срок за пълно усвояване на ресурса). Максималният срок на концесията е до 35 г. с допустимо удължаване в рамките на тази граница (чл. 5, ал. 3 Наредбата). Двустепенната система за предоставяне на концесия е аналогична като при концесиите за добив на подземни богатства, т.е. Министерският съвет или Общинският съвет взема решение, а Министърът на околната среда и водите или кметът сключват договор с избрания концесионер.

С оглед изложеното, може да се приеме, че концесиите за минерални води разкриват особен баланс между икономическата експлоатация на природния ресурс и неговото обществено предназначение. За разлика от подземните богатства, при които доминира националният икономически интерес, при минералните води законодателят поставя по-силен акцент върху участието на местните общности чрез разпределение на част от концесионните плащания към съответните общини. Това решение е пример за ограничена фискална децентрализация и създава предпоставки за по-тясна връзка между използването на природните ресурси и регионалното развитие.

Концесии за морски плажове (ЗУЧК)

Морските плажове са изключителна държавна собственост (чл. 18, ал. 1 КРБ). С изменение от 2019 г. (ДВ, бр. 60/2019) тези концесии са изрично изключени от ЗК и се уреждат изцяло от Закона за устройството на Черноморското крайбрежие. Концедент при тези концесии е Министърът на туризма, а концесионер е юридическо лице или едноличен търговец. Процедурата е открита и се изразява в едновременното подаване на заявление и оферта, без да е необходимо допълнително договаряне. Срокът на концесията за морски плаж е до 20 години, като концесионерът е длъжен да осигури водното спасяване, обезопасяването на прилежащата акватория, здравното и

медицинското обслужване, санитарно-хигиенното поддържане на морския плаж, свободен и безплатен достъп до морския плаж, както и да заплаща концесионно възнаграждение. Извършването на строителни и монтажни работи по морските плажове е забранено.

От сравнението с останалите концесионни режими се установява, че правният режим на концесиите за морски плажове демонстрира различна философия на законодателното регулиране. Докато при концесиите за добив основен приоритет е стопанското използване на природния ресурс, при морските плажове водещо значение придобиват гарантирането на свободния обществен достъп, безопасността на посетителите и опазването на околната среда. Различната обществена функция на морските плажове обяснява и съществените различия в съдържанието на концесионните задължения.

Таблица 1. *Систематично сравнение на видовете концесии по ключови критерии*

Критерий	Конц. за строит. / услуги (ЗК)	Конц. за подз. богатства (ЗПБ)	Конц. за мин. вода (ЗВ)	Конц. за морски плаж (ЗУЧК)
Правна основа	чл. 7, чл. 8 ЗК	чл. 4, ал. 2 ЗПБ	чл. 47 ЗВ	Чл. 7, ал. 1 от ЗУЧК
Конст. основа	чл. 18, ал. 5 КРБ	чл. 18, ал. 1 КРБ – изкл. държ. собств.	чл. 18, ал. 1 КРБ	чл. 18, ал. 1 КРБ
Предмет	Строеж / услуги + право на приходи	Физическо извличане на полезни изкопаеми	Само бутилиране или извличане на ценни в-ва	Стопанско управление на плаж
Изключена от ЗК	НЕ – ЗК я урежда	ДА – чл. 25, ал. 1 ЗК	ДА – чл. 25, ал. 2 ЗК	ДА – чл. 25, ал. 3 ЗК
Концедент	Министър / Кмет	МС (решение) + Мин. Енергетика	МС или ОС + Министър на околната среда и водите / Кмет	Министър на туризма
Срок	според периода за възвръщане на инвестицията; общият срок на удължаванията не може да надвишава 1/3 от първоначалния срок.	До 35 г., но не повече от 50 години (чл. 36, ал. 2 ЗПБ)	До 35 г. (чл. 5, ал. 3 Наредбата)	до 20 години (чл. 7, ал. 1 от ЗУЧК)
Прехвърляне	Ограничено при условия в договора	Само с разрешение (чл. 25, ал. 2 ЗПБ)	Абсолютно забранено (чл. 8, ал. 2 Наредбата)	По правило непрехвърляемо
Оперативен риск	Задълж. при концесионера – конститутивен	Присъщ за добивната дейност	Пазарен риск при концесионера	Сезонен риск при концесионера
Разпределение на конц. възнаграждение	100% при концедента	100% в държавния бюджет	Не по-малко от 50% държавен + не по-малко от 50% общ. бюджет (чл. 47, ал. 4 ЗВ)	При концедента
Гратисен период	Не е предвиден	Не е предвиден	ДА – до въвеждане в експл. на бутилиращото предприятие	Не е предвиден
Икономически ефект	Частни инвестиции в инфраструктура	Генериране на ресурсна рента	Развитие на бутилиращата индустрия	Туристически приходи

Прекратяване

Основанията за прекратяване на концесии за услуги и строителство по Закона за концесиите включват изтичане на срока, взаимно съгласие, виновно неизпълнение, обективна невъзможност за изпълнение, влязло в сила решение на Съда на Европейския съюз, установяващо нарушение на правото на ЕС, установено основание за изключване към момента на сключване, ликвидация или несъстоятелност. При прекратяване концесионерът предава обекта, а приращенията остават за концедента.

При концесиите за добив на подземни богатства специфичните основания за прекратяване са изчерпване на запасите преди изтичане на срока, спиране и последващо прекратяване по чл. 68 ЗПБ при нарушения, прехвърляне без разрешение като при прекратяване задължително е да се извърши рекултивация на нарушените терени.

При концесиите за минерална вода специфични основания са отрицателно решение по издадена оценка за въздействие върху околната среда, нарушение на абсолютната забрана за прехвърляне и др.

При концесиите за управление на морски плажове специфичните основания за прекратяване са пълното погиване на обекта на концесията, както и при последващо възникване на опасност за националната сигурност и отбраната на страната, за живота и здравето на гражданите, за околната среда, за защитените територии, зони и обекти и за обществения ред и др.

Сравнителноправен преглед

Директива 2014/23/ЕС. Директива 2014/23/ЕС хармонизира единствено режима на концесиите за строителство и услуги, като въвежда общи принципи относно прозрачността, равнопоставеността, недопускането на дискриминация и задължителното прехвърляне на оперативния риск върху концесионера. Ресурсните концесии, включително тези за добив на подземни богатства и минерални води, остават извън нейния материален обхват и продължават да се уреждат от националното право на държавите членки. Това не означава, че те са изцяло извън приложното поле на правото на Европейския съюз, тъй като върху тях намират приложение общите принципи на Договора за функционирането на Европейския съюз, правилата относно държавните помощи, конкуренцията и екологичното законодателство. Българският Закон за концесиите е приет с цел транспониране на Директива 2014/23/ЕС и възпроизвежда основните ѝ концепции относно концесиите за строителство и услуги (European Commission, 2023).

Франция. Френският модел традиционно се характеризира със силно централизирано управление на природните

ресурси. Съгласно Code minier (Закон за минното дело) достъпът до добив преминава през двуфазен режим, включващ разрешение за проучване, последвано от концесия за експлоатация, предоставяна с декрет на Conseil d'État (Държавен съвет). Концесионните плащания постъпват основно в държавния бюджет, а ролята на местните власти остава сравнително ограничена. В сравнение с френската уредба българският модел е сходен по отношение на двуетапния достъп до добив и засилената държавна роля, но се отличава с института на търговското откритие и преимущественото право за получаване на концесия, които насърчават инвестициите в геоложките проучвания (Code minier, 2011; Otto et al., 2006).

Френският модел се характеризира с историческа приемственост и висока степен на институционална стабилност. Концесията традиционно се възприема като инструмент за осъществяване на публични функции, а не единствено като способ за предоставяне на права за стопанска експлоатация. Това обяснява защо френското право запазва значителни контролни правомощия на публичния орган през целия срок на договора. За българското право този модел е показателен с възможността публичният интерес да бъде защитаван не само при предоставянето на концесията, но и чрез постоянен административен контрол върху нейното изпълнение.

Германия. Германската система, уредена в Bundesberggesetz (Федерален закон за минното дело), възприема различен подход като разграничава полезните изкопаеми, принадлежащи на държавата (bergfreie Bodenschätze), от тези, които могат да бъдат собственост на притежателя на земята (grundeigene Bodenschätze). Германската правна система не изгражда единен концесионен модел, а регулира отделните видове публични ресурси чрез специализирани закони, съобразени с федералното устройство на държавата. Това позволява по-гъвкаво адаптиране на правната уредба към спецификата на отделните отрасли, но същевременно води до по-висока нормативна сложност. Българският модел следва сходна логика чрез съществуването на специални режими за подземните богатства, минералните води и морските плажове, макар и в рамките на унитарна държава.

Испания. Испанското законодателство съчетава стабилна нормативна рамка с широка компетентност на автономните общности при управлението на публичния сектор. Особено внимание в испанската доктрина и практика заслужава изрично регламентираният в Закона за договорите в публичния сектор механизъм за възстановяване на икономическото равновесие на концесионния договор (restablecimiento del equilibrio económico). Този правен институт служи като гаранция за икономическата устойчивост на дългосрочните частни инвестиции, без обаче да заличава изискването концесионерът реално да понася оперативния риск на пазара. Този балансиран подход осигурява гъвкавост на договора при настъпване на непредвидими обстоятелства или регулаторни промени от страна на публичния сектор. (Gimeno Feliú, 2019)

Изследваните правни системи разкриват обща тенденция към разграничаване между концесиите за строителство и услуги и концесиите за експлоатация на природни ресурси, като последните запазват значителна национална специфика. Независимо от различията в законодателните решения могат да бъдат откроени няколко общи характеристики като засилено значение на прозрачността при предоставянето на концесиите, стремеж към ефективно разпределение на икономическия риск между държавата и концесионера, както и постепенно увеличаване на ролята на екологичните и социалните критерии при управлението на природните ресурси.

На този фон българският модел заема междинно място между силно централизирания френски подход и по-децентрализираните решения, възприети в Германия. Докато България запазва централизирания характер на предоставянето на ресурсните концесии, тя вече въвежда ограничени механизми за участие на местните власти в икономическите ползи, какъвто е режимът по чл. 47, ал. 4 от Закона за водите. Това показва постепенно развитие към по-балансиран модел на управление, при който защитата на държавния интерес се съчетава с насърчаване на регионалното развитие.

От икономическа гледна точка сравнението разкрива, че съвременните европейски концесионни модели се развиват в три основни направления – оптимално разпределение на риска между публичния и частния сектор, гарантиране на възвръщаемостта на дългосрочните инвестиции чрез механизми за поддържане на икономическото равновесие и постепенно увеличаване на участието на местните общности в приходите от експлоатацията на природните ресурси. Тези тенденции могат да бъдат използвани като ориентир при бъдещото усъвършенстване на българската концесионна политика (OECD, 2012; Siemiatycki & Farooqi, 2012; World Bank et al., 2017).

Заключение

В настоящата разработка се предлага систематизация на концесионните режими и извежда връзката между конституционния статут на публичния ресурс и интензивността на публичноправната регулация. Тя потвърждава, че българското концесионно право не представлява единен правен режим, а система от четири самостоятелни подрежима, обединени единствено от общата конституционна концепция за управление на публичната собственост чрез предоставяне на ограничени права на частноправни субекти. Концесиите в България образуват многопластова правна система, в която ЗК и специалните закони (ЗПБ, ЗВ, ЗУЧК) следват принципно различни режими, обусловени от конституционния статут на обектите. Изследването показва също, че съвременният концесионен модел вече не може да бъде разглеждан единствено като юридическа конструкция, а и като инструмент за привличане на частни инвестиции, разпределяне на икономическия риск по най-ефективния начин и осигуряване на справедливо участие на обществото в икономическите ползи от използването на националните природни ресурси. В това се състои и особеният баланс, който правният режим на концесиите поддържа между правната сигурност и икономическата ефективност, който е необходимо да бъде водещ критерий при бъдещото развитие на българското концесионно законодателство.

Извършеният анализ разкрива, че действащата правна уредба на концесиите осигурява стабилна нормативна

основа, но се нуждае от усъвършенстване с оглед повишаване на нейната систематичност, предвидимост и икономическа ефективност.

На първо място, de lege ferenda следва да се обсъди частична кодификация на концесионното законодателство чрез уеднаквяване на основните понятия, принципи и правила относно предоставянето, изменението и прекратяването на концесиите, като специалните закони запазят само особеностите, обусловени от характера на съответния публичен ресурс. Това би ограничило нормативната фрагментация и различното тълкуване на сходни правни институти.

На второ място, необходимо е по-прецизно нормативно уреждане на механизмите за възстановяване на икономическото равновесие на концесионния договор. Необходимо е да бъдат определени ясни предпоставки, методология и граници на допустимата договорна адаптация при настъпване на непредвидими икономически промени, което би повишило правната сигурност за концедентите и инвеститорите (Hart, 2003).

На трето място, целесъобразно е да се въведе задължителна предварителна оценка за икономическата целесъобразност на концесионния модел. Тази оценка следва да се основава на принципа *value for money* и да включва сравнение с традиционното публично възлагане по критерии като разпределение на риска, разходи през жизнения цикъл, качество на услугата и обществена полза.

На четвърто място, de lege ferenda следва да се предвиди периодична оценка на изпълнението на концесионните договори чрез нормативно определени показатели за ефективност. Контролът следва да обхваща не само законосъобразното изпълнение и инвестиционните програми, но и качеството на услугите, устойчивостта на инвестициите, икономическите резултати и изпълнението на екологичните ангажименти (European PPP Expertise Centre, 2015; World Bank et al., 2017).

На пето място, необходимо е да се разшири участието на местните общности в икономическите ползи от експлоатацията на природните ресурси. Законодателят би могъл да предвиди по-широко приложение на механизми за споделяне на концесионните приходи с общините, при наличие на достатъчен административен и финансов капацитет за тяхното ефективно използване.

На шесто място, необходимо е нормативно и технологично развитие на публичността на концесионния процес. Националният концесионен регистър следва да включва стандартизирана информация за инвестиционните програми, концесионните плащания, екологичните задължения и резултатите от контролната дейност, с което да се засилят общественият надзор и отчетността.

Тези предложения потвърждават поставената хипотеза, че различните концесионни режими не представляват несистемно отклонение от единна уредба, а са обусловени от конституционния статут и обществената значимост на съответния ресурс. Поради това бъдещото развитие на концесионното право може да бъде насочено към укрепване на общите принципи на регулиране, без да се премахва необходимата специфика на отделните режими.

Литература

Дерменджиев, И., Костов, Д., & Хрусанов, Д. (2012). *Административно право на Република България* (5. прераб. и доп. изд.). Сиби.

Закон за водите. [Прегледан: 20.04.2026]. Достъпен от: https://www.lex.bg/laws/ldoc/2134673412

Закон за концесиите. [Прегледан: 20.04.2026]. Достъпен от: https://lex.bg/bg/laws/ldoc/2137178490

Закон за подземните богатства. [Прегледан: 20.04.2026]. https://www.lex.bg/laws/ldoc/2134650880

Закон за устройството на Черноморското крайбрежие. [Прегледан: 20.04.2026]. Достъпен от: https://lex.bg/laws/ldoc/2135555697

Конституция на Република България. [Прегледана: 20.04.2026] Достъпна от: https://lex.bg/laws/ldoc/521957377

Boadway, R., & Keen, M. (2010). Theoretical perspectives on resource tax design.

In P. Daniel, M. Keen, & C. McPherson (Eds.), *The taxation of petroleum and minerals: Principles, problems and practice*. Routledge.

Bundesberggesetz [Прегледан на: 20.04.2026]. Достъпен от: https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/

Code minier [Прегледан на: 20.04.2026]. Достъпен от: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/legislation/FranceConsolidatedMiningCode_English.pdf

Directive 2014/23/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the award of concession contracts. (2014). *Official Journal of the European Union, L 94*, 1–64.

European Commission. (2023). *Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the functioning of Directive 2014/23/EU on the award of concession contracts and on the impact on the internal market of the exclusions set out in Article 12* (COM(2023) 460 final).

European PPP Expertise Centre. (2015). *The guide to guidance: How to prepare, procure and deliver PPP projects*. European Investment Bank.

Feliú. G. (2019). El riesgo operacional en el nuevo modelo de concesiones: una visión sustantiva. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 53, 14–49.

Oates, W. (2004). An Essay on Fiscal Federalism in: Environmental Policy and Fiscal Federalism, chapter 22, pages 384-414, Edward Elgar Publishing. https://ideas.repec.org/h/elg/eechap/3284_22.html

OECD. (2012). *Recommendation of the Council on principles for public governance of public-private partnerships*. OECD Publishing.

Otto, J., Andrews, C., Cawood, F., Doggett, M., Guj, P., Stermole, F., Stermole, J., & Tilton, J. (2006). *Mining royalties: A global study of their impact on investors, government, and civil society*. World Bank.

Siemiatycki, M., & Farooqi, N. (2012). Value for money and risk in public-private partnerships. *Journal of the American Planning Association, 78*(3), 286–299. https://doi.org/10.1080/01944363.2012.715525

World Bank, Asian Development Bank, & Inter-American Development Bank. (2017). *Public-private partnerships reference guide* (Version 3.0). World Bank.

INTEGRATION OF QR CODE TECHNOLOGY IN THE EXHIBITIONS OF THE GEOLOGICAL MUSEUMS AT THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY “ST. IVAN RILSKI” – SOFIA, BULGARIA

Elitsa Zareva, Kamelia Marinova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: elitsa.zareva@mgu.bg; k.y.marinova@mgu.bg

ABSTRACT. This article presents the results of the implementation of QR code digitisation in the exhibitions of the Museum of Unique Crystals, the Museum of Geology and Paleontology, and the Museum of Mineralogy, Petrography, and Mineral Resources at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”. The initiative is aimed at improving the accessibility, interactivity, and educational value of the three museums. Through QR technology, visitors can access information, high-quality images, and bilingual descriptions via their smartphones, which brings museums in line with modern digital practices. The indexed exhibitions enrich visitors’ knowledge and support Earth science education for both university students and amateur audiences. Building on previous digital initiatives, such as virtual tours and information guides, this innovation contributes to increased visitor engagement. Among the key achievements are the creation of the first specialised exhibition of fluorescent minerals and the first 3D models of fossils at the university, integrated with QR technology in support of modern STEM-oriented education. The implementation of technology significantly improves the museum's educational impact, digital accessibility, and its alignment with modern STEM-oriented practices.

Key words: QR code digitisation, STEM education, museum exhibitions, 3D models, fluorescent minerals.

ИНТЕГРИРАНЕ НА QR КОД ТЕХНОЛОГИЯ В ЕКСПОЗИЦИИТЕ НА ГЕОЛОЖКИТЕ МУЗЕИ В МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“ – СОФИЯ, БЪЛГАРИЯ

Елица Зарева, Камелия Маринова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата статия представя резултатите от внедряването на QR код дигитализация в експозициите в Музея на уникалните кристали, Музея по геология и палеонтология и Музея по минералогия, петрография и полезни изкопаеми в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“. Инициативата е насочена към подобряване на достъпността, интерактивността и образователната стойност на трите музеи. Благодарение на QR технологията посетителите могат да получат достъп до информация, висококачествени изображения и двуезични описания чрез своите смартфони, което привежда музеите в съответствие със съвременните дигитални практики. Индексираните експозиции обогатяват знанията на посетителите и подпомагат обучението по науки за Земята както за студенти, така и за любителска аудитория. Надграждайки върху предишни дигитални инициативи, като виртуални разходки и информационни гидове, тази иновация допринася за повишена ангажираност на посетителите. Сред ключовите постижения са създаването на първата специализирана изложба на флуоресцентни минерали и първите 3D модели на фосили в университета, интегрирани с QR технологията в подкрепа на съвременното STEM-ориентирано образование. Внедряването на технологията значително подобрява образователното въздействие на музея, дигиталната достъпност и съответствието му със съвременните STEM-ориентирани практики.

Ключови думи: QR код дигитализация, STEM образование, музейни експозиции, 3D модели, флуоресцентни минерали.

Introduction

Modern museums strive to combine traditional exhibitions with innovative digital technologies to provide a more accessible, interactive, and educational experience for their visitors. In the digital age, the expectations for the museum spaces are evolving with visitors seeking not only a visual observation of the exhibits, but also access to additional information that broadens their understanding of the objects and processes presented. In this context, QR (Quick Response) codes are establishing themselves as an effective tool for digitising museum collections. The technology is a two-dimensional matrix code created in 1994 by Masahiro Hara for the Japanese company Denso Wave with an initial commercial and logistical purpose (Koleva, 2013).

Developed to optimise inventory tracking and manufacturing component management processes, QR codes have established themselves as one of the most common modern communication and distribution tools, thanks to the functionality and capabilities of mobile devices. They are easily accessible through smartphone cameras and are effectively used in various fields, including education (Tofan, 2017). Their main advantage is in providing synthesised, structured, and reliable information directly to the visitor's personal mobile device. They offer fast, convenient, and consistent access to rich information content via mobile devices, while allowing the integration of text, images, scientific notes, video, and audio content (Williams and Howarth, 2012).

This study examines the application of QR codes in the geological museums at the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski". The main goal is to analyse the benefits of digital indexing of exhibitions in terms of increasing accessibility and interactivity, as well as increasing the educational and scientific value of museum collections.

Material and methods

In museum practice, QR codes are widely used as a means of digital indexing and expanding information about the exhibitions. They represent an effective tool for modernising the museum environment (Caballero and Aguilera, 2019).

In exhibition halls, they are located directly on the display cases, providing access to additional content related to the variety of rocks, minerals, and fossils displayed. Unlike traditional one-dimensional (1D) linear barcodes, QR codes have a significantly greater information capacity – over 4000 characters compared to approximately 20 for conventional ones. A great advantage is their exceptional reliability and durability, as they can be scanned at different angles thanks to the three

position markers in their corners and can still be read even if partially damaged.

Around 2008 – 2009, as a development of the standard static QR code, the dynamic QR code appeared. Compared to static QR codes, which contain permanent and unchangeable information, the dynamic QR codes use a short URL (Uniform Resource Locator) or unique identifier pointing to an online resource. After scanning, a user’s device first opens an intermediate link, which subsequently redirects to the corresponding content. Thanks to this redirection mechanism, the content or final destination can be changed at the server level without the need to replace or reprint the QR code itself (Dix and Jones, 2024).

The methodology for developing and implementing QR codes in the geological museums at the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" is based on the use of static QR codes. In the future we will most likely switch to using dynamic QR codes because of their greater flexibility.

The study includes a total of 23 display cases distributed in three exhibition spaces – 10 display cases in the Museum of Unique Crystals, 12 display cases in the Museum of Geology and Paleontology, and 1 display case in the Museum of Mineralogy, Petrography, and Mineral Resources. The methodology was developed in five stages (Fig. 1).

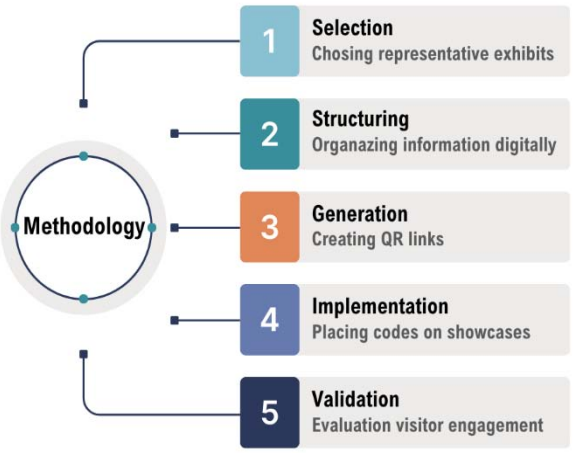


Fig. 1. Methodology for QR-based museum exhibition digitalisation

First stage

During the first stage, the exhibition units were **selected**. Criteria included the scientific significance of the exhibits, visitor interest, and potential for enriching the digital content. The selected showcases contain representative mineral, rock and fossil specimens, which allow supplementing the information through multimedia resources.

Second stage

In the second stage, the information content is **collected** and **structured**. The methodology for digitising the exhibition includes the creation of individual QR code for each showcase, linked to an online digital catalogue. The catalogue contains structured information about the exhibits, high-resolution images, and scientific notes. The content is adapted for accessibility, clarity, and bilingual presentation.

Third stage

The third stage involves **generating** QR codes with an individual code created for each showcase leading to the corresponding digital content. Static QR codes were used, generated through the Canva built-in QR code generator. Each code was tested for functionality, speed of access, and compatibility with various mobile devices.

Fourth stage

In the fourth stage, the **positioning** and **design** of the codes was carried out. The QR codes were placed directly on the display cases, allowing visitors to gain immediate access to the information on site via smartphone. At the same time, the possibility of remote access for continuing education was also provided. They were **integrated** on the display cases through printed labels, which were consistent with the aesthetics of the exhibition. Various factors were taken into account when placing them – height, lighting, and easy recognition by visitors.

Fifth stage

The fifth stage involves pilot **testing** in a real museum environment, where visitors' interaction with the QR codes is monitored. Various indicators are evaluated – frequency of use, time to access content, level of engagement.

Results and discussion

So far, the technology has been applied in the Museum of Unique Crystals, where 10 display cases are indexed, each of which is accompanied by detailed scientific information about the minerals with high-quality photos (Fig 2a, b). For the convenience of the visitors, a digital catalogue of the museum display cases has been created, accessible by scanning on site. Visitors have access to this information even after leaving the museum.

Fig. 2. Indexing with QR codes at the Museum of Unique Crystals a) View of a museum display case with a QR code (red arrow); b) on-site scanning.

The display cases from the Paleontology collection at the Museum of Geology and Paleontology include a variety of fossils, presented and arranged by fossil genera, with the exhibits accompanied by detailed scientific descriptions presenting information about the origin, age, and characteristic features of the organisms under consideration. Along with

scientific information, the display cases are also accompanied by three-dimensional models of selected fossils (Fig 3a).

The 3D fossil models were created by scanning selected specimens using a Revopoint MINI 2 3D scanner. The resulting data was processed using Revo Scan 5 and uploaded to the online 3D model sharing and viewing platform Sketchfab. The platform allows adding textures, animation, and explanatory notes to the models, making them extremely informative and suitable for presentation purposes in the museums (Fig. 3b, c).

Fig. 3. Indexing with QR codes in the Museum of Geology and Paleontology: a) Paleontology exhibition; b) QR codes embedded with scientific information and 3D models of fossil exhibits; c) scanning of a fossil specimen.

In connection with the preparation of the scientific justification for the exhibition dedicated to fluorescent minerals, analyses of their mineral composition and fluorescence activators were performed. For this purpose, X-ray diffraction and spectroscopic methods were applied. The analyses were conducted at the X-ray powder diffraction laboratory of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski” and at the Institute of Optical Materials and Technologies "Acad. Yordan Malinovski" at the Bulgarian Academy of Sciences. The results are included in the text, accompanying the QR code, combined with photographs under LED and UV (365 mn) light (Fig. 4).

Fig. 4. a) Exhibition of fluorescent minerals at the Museum of Mineralogy, Petrography, and Minerals, indexed with a QR code; b) Brochures for the geological museums at the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski".

Rotational models (Dollhouse) were created during the digitisation process, and 3D virtual tours of the museum exhibits were generated and integrated into the "Virtual Bulgaria" portal. In this way, visitors are provided with interactive access to the exhibits, which can also be viewed remotely.

Indexing the museum's fluorescence exhibit using QR codes provides visitors not only with visual information, but also with detailed scientific data on fluorescence activators (Fig. 4a). Analyses were conducted to determine the mineral composition and fluorescence activators. The results of these studies allow for the provision of accurate and scientifically based information on mineral phases and fluorescence activators. In this way, the exhibit becomes a valuable resource for visitors interested in mineralogy and physics, and for students and scientists, facilitating educational and research processes through direct access to reliable scientific data.

The spread of QR codes extends beyond the museum space to include websites, social media platforms, and printed materials such as brochures, flyers, and posters, released in 2024 and 2025 (Fig. 4b). In this way, museums reach a wider audience, including prospective students and external visitors. It provides quick and convenient access to information about museum collections, educational opportunities at the university, and various areas of Earth sciences.

One of the significant innovations in recent years, which complements the implementation of QR codes, is the use of virtual tours in the museums of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" (Marinova et al., 2022). In a previous project, the exhibits were scanned and presented through 3D rotational models (Dollhouse), allowing observers to freely navigate the museum space and view individual parts of the exhibits with interactive tags in Bulgarian and English. The virtual tours were integrated into the "Virtual Bulgaria" Internet portal. Through the generated QR codes, visitors gain direct access to selected showcases, halls or exhibits during the virtual visit. Feedback shows that this approach significantly increases interest in museums and overall attendance.

Indexing museum exhibits through QR codes allows the integration of physical visits with digital technologies both on site and remotely. This improves the quality of the museum experience, stimulates interest in Earth sciences, and encourages attendance. This approach represents a modern, technologically advanced, and easily accessible tool for promoting and interpreting museum collections (Miladinov, 2024). It is aimed at a diverse audience and seeks to generate sustained interest, personal engagement, and active participation. In addition to its communication function, the QR code system plays an essential educational role, providing quality scientific content, applicable in both face-to-face and distance or online learning.

The applicability of QR codes in a museum environment can be defined as a multidimensional category that includes educational, communication, technological, and management aspects of museum activities. In the context of the increasing digital transformation of cultural institutions, QR codes are a mediator between the physical exhibit and the expanded digital content. In terms of information, QR codes provide access to extended descriptions and multimedia resources that go beyond the limitations of traditional exhibition labels. Extended content can include video materials, audio guides, interactive visualisation, 3D models, etc., which increase the degree of personalisation of the experience. By providing interactive educational materials, the museum strengthens its pedagogical

function and stimulates the active participation of visitors in the learning process (Fig 5).

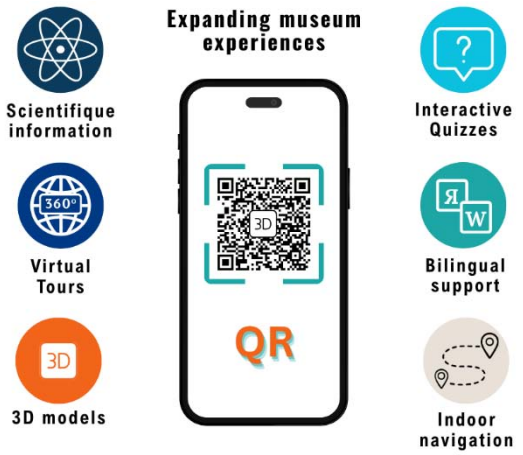


Fig. 5. Enchanting visitor experience with digital access

From an accessibility perspective, QR codes significantly expand museum communications. Through bilingual and potentially multilingual versions of content, they contribute to greater social engagement and equal access to exhibits. In this way, the technology performs not only an informational, but also a social function within museums.

Implementing QR codes in a museum environment can reduce costs for printed materials and maintenance of physical audio guide devices. It provides flexibility in updating content, which increases organisational efficiency and sustainability of the museum institution.

In the context of modern museum practices, the implementation of QR codes is being established as an effective method for digitisation and enrichment of content. Their application in the field of providing information about exhibits allows guidance to expanded text and multimedia resources, which contributes to a deeper perception by visitors. Resources are optimised by reducing the need for printed materials, which has both an economic and environmental effect. The level of impact in this area can be defined as high (Table 1).

QR technologies also play a significant role in ensuring bilingual accessibility. By redirecting to translated versions of the content, prerequisites are created for expanding the international audience of museums. In turn, this contributes to increasing cultural exchange, and the impact is defined as high (Table 1).

The integration of interactive content, such as augmented reality (AR), including virtual tours and 3D models, is one of the most significant innovations related to the use of QR codes. These technologies transform passive observation into active participation, stimulating engagement and interest in the exhibits (Pérez-Sanagustín et al., 2016). For this reason, this area is characterised by a very high level of impact (Table 1).

The presence of QR codes facilitates the collection of feedback by providing direct access to surveys and evaluation forms. This allows the systematic accumulation of empirical data on the user experience. The data obtained could be used for subsequent analysis and optimisation of museum practices (Balhaf et al., 2025). Given the activity of visitors, the impact in this aspect can be defined as medium (Table 1).

In educational terms, QR codes contribute to expanding learning opportunities by providing additional resources aimed at students. This supports the integration of museums into the educational process, while the level of impact remains high. In the context of STEAM education (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics), QR codes are a kind of bridge between traditional content and interactive digital tools (Table 1). Through them, students gain access to multimedia materials, virtual demonstrations, 3D models, and interdisciplinary connections that stimulate participatory learning, promote critical thinking, creativity, and practical skills (Dressler and Kan, 2018).

Table 1. *Applications and impact of QR codes in a museum environment*

Application area	Additional functionality	Advantage for visitors	Advantage for museums	Level of impact
Information for the exhibits	Link to extended description, video	Deeper understanding	Reduce the need for printed materials	High
Bilingual support	Redirection to translated text	Accessibility for foreigners	Audience growth	High
Interactive content	AR/3D models, video	Engaging experience	Increasing interest in the exhibition	Very high
Feedback	Link to survey	Easy sharing of opinions	Data collection and analysis	Intermediate
Educational resources	Additional materials for students	Educational support	Strengthening the educational role	High
Social impact	Sharing on the Internet and social networks	Remote access	Increased publicity	High

The social dimension of QR codes is manifested through the possibilities for easy sharing of content in a digital environment, including social networks. In addition, the use of QR codes provides remote access to digital information and museum content. It also increases the visibility and public recognition of museum institution, events, and cultural sites, creating a broader connection with the audience. In this context, the level of impact is also assessed as high (Table 1).

Conclusions and recommendations

The implementation of QR codes in the geological museums at University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" demonstrates significant benefits in terms of accessibility, interactivity, and educational impact. QR codes allow visitors to access detailed scientific information, high-quality images and bilingual descriptions directly through their mobile devices, on-site and remotely.

Their integration into the digital catalogue and virtual tours further enhances visitor experience by enabling interactive exploration and encouraging self-directed learning. The results of the analyses of the mineral composition and fluorescence activators of museum exhibits provide scientifically validated content, making the exhibits a valuable resource for students, researchers, and the general public. The use of QR codes in university and museum contexts, combined with virtual tours and digital catalogs, represents a modern, technologically advanced, and effective approach to improving museum accessibility, educational outcomes, and visitor engagement.

The possibility of active interaction with digital content transforms the traditional model of passive observation into a more dynamic and interactive one. Longer time spent in front of exhibits and the frequency of use of digital resources are interpreted as indicators of increased motivation and interest. From the point of view of accessibility, QR codes significantly expand communications in the museum. Through bilingual versions of the content, they contribute to greater social engagement and equal access to the exhibits. In this way, technology performs not only an informational, but also a social function within museums.

In future, we intend to transition to the use from static QR codes to dynamic ones due to their greater flexibility and the possibility of easily updating content without the need to regenerate the codes. This flexibility in updating content management will improve the efficiency and sustainability of the museum institution.

The applicability of QR codes in a museum environment is not limited to their technological function as a means of quick access to information. They are a complex tool for educational media, social engagement, institutional efficiency, and digital communication, transforming the traditional museum experience into a more interactive form that is adaptable to the modern requirements of visitors.

Acknowledgements. The presented results were obtained within the framework of a project for artistic and creative activity in the field of science № XT006/01.04.2025 "Software 3D Reconstruction and Visualisation of Museum Exhibits".

References

Balhaf, K., Hassan, Y., Saleh, K., AlSufyani, A., Bakhuraisah, S. Bindahman, S. (2025). Improving Museum Visitor Experience Using QR Code Technology: Creation of a Mobile Application for Al Ghaydah Museum. *Engineering and Technology Journal* e-ISSN: 2456–3358, 10, 7, 5821–5826. https://doi.org/10.47191/etj/v10i07.29, I.F. – 8.482

Caballero, P., Aguilera, F. (2019). Evaluation for QR codes in environmental museums. *Global Journal of Information Technology: Emerging Technologies, 9*(2) 29–32. https://doi.org/10.18844/gjit.v9i2.4268

Dix, A., Jones, E. (2024). A flexible QR-code infrastructure for heritage. In *2024 Workshop on Advanced Visual Interfaces and Interactions in Cultural Heritage, AVICH 2024. vol. 3798, CEUR Workshop Proceedings*, 2024 Workshop on Advanced Visual Interfaces and Interactions in Cultural Heritage, AVICH 2024, Genoa, Italy, 4/06/24.

Dressler V., Kan, K. (2018). Mediating Museum Display and Technology: A Case Study of an International Exhibition Incorporating QR Codes. *Journal of Museum Education, 43*, 159–170. https://doi.org/10.1080/10598650.2018.1459081

Koleva, Z. (2013). The "QR code" tool and its marketing applications - First Scientific Seminar of doctoral students, postdoctoral students, and young scientists of the University of Technology "St. St. Cyril and Methodius", 17.01.2013, "Faber" Publishing House, Veliko Tarnovo. (In Bulgarian)

Marinova, K., Sachanski, V., Stoykov, St., Pazderov, R., Banushev, B., Vatskicheva, M., Zareva, E., Dimitrov, M., Chaush, B., Kostadinov, S. (2022). Digitalisation and creation of a 3D 360-degree HDR 4K virtual tour with interactive tags of the *Ilia Deleff* Museum of Unique Crystals, the Museum of Geology and Paleontology, the Museum of Mineralogy, Petrology, and Mineral Resources and the Museum of Physics at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”. *Rev. of Bulg. Geol. Soc., 83*(3) 349–350.

Miladinov, P. (2024). *Effects of the introduction of new technologies in museums*. University Publishing House "St. Kliment Ohridski", 135 pp. (In Bulgarian)

Pérez-Sanagustín, M., Parra, D., Verdugo, R., García-Galleguillos, G., Nussbaum, M. (2016). Using QR codes to increase user engagement in museum-like spaces. *Computers in Human Behavior, 60*, 73–85.

Tofan, Florin-Cătălin. (2017). QR Codes Implementation in Museum Exhibitions. *Studii si Comunicări, 25,* 142

Williams, P., Howarth, A. (2012). Using QR codes to aid accessibility in a museum. *Journal of Assistive Technology. 6*(4). https://doi.org/10.1108/17549451211285771.

ANALYSIS OF FINANCIAL INDICATORS FOR SUSTAINABILITY OF COMPANIES FROM THE MINERAL AND RAW MATERIALS INDUSTRY

Nina Kasapska

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: n.kasapska@mgu.bg

ABSTRACT. Sustainable development of the mineral and raw materials industry implies a balance between economic efficiency, environmental protection, and corporate social responsibility. This industry is characterised by long-term investments and specific risks, which makes financial stability fundamental for the survival and development of the business. This leads to the critical importance of financial indicators, as companies in the sector are faced with balancing production demand, capital expenditure, investor needs, and taking ESG issues into account. The purpose of the study is to analyse the financial indicators for sustainable development that are significant for companies in the mineral and raw materials industry. The findings of the study provide an opportunity to assess and manage the risk factors facing the ecological transition and sustainable development of industrial companies.

Key words: financial indicators, sustainability, enterprises, risk management.

АНАЛИЗ НА ФИНАНСОВИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗА УСТОЙЧИВОСТ НА ПРЕДПРИЯТИЯТА ОТ МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

Нина Касапска

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Устойчивото развитие на минерално-суровинната индустрия предполага балансиране между икономическата ефективност, опазването на околната среда и социалната отговорност на предприятията към обществото. Тази индустрия се характеризира с дългосрочни инвестиции и специфични рискове, което прави финансовата стабилност фундаментална за оцеляването и развитието на бизнеса. Именно, заради това финансовите показатели са критично важни, тъй като предприятията от сектора са изправени пред балансиране търсенето на продукцията, капиталовите разходи, необходимостта на инвеститори и отчитане на ESG въпросите. Целта на изследването е да анализира значимите за предприятията от минерално-суровинната индустрия финансови показатели за устойчиво развитие. Изводите от изследването дават възможност за оценка и управление на рисковите фактори пред екологичния преход и устойчивото развитие на индустриалните предприятия.

Ключови думи: финансови показатели, устойчивост, предприятия, управление на риска.

Въведение

Минерално-суровинната индустрия е в основата на ресурсната осигуреност на останалите сектори в икономиката на страната. Нарастващите изисквания за устойчивост и динамичната промяна в технологиите поставят предизвикателства пред управлението на предприятията от сектора на минералите и суровините, с които те трябва да се справят в последните десетилетия. Осигуряването на развитието на компаниите от този бранш, в условията на спазване на социално-екологичните показатели, не е възможно без ефективна система за управление на риска, фокусирана върху постигането на стратегическа устойчивост.

Минерално-суровинната индустрия е изложена на високи и специфични финансови рискове, които следва да се управляват постоянно, за да могат предприятията от сектора да отговарят на законовите изисквания, на корпоративната етика и морал и същевременно да бъдат финансово устойчиви и рентабилни. Това води до значими по размер инвестиционни програми на дружествата от индустрията, във връзка с които съблюдаването, анализирането и изследването на финансовите показатели на компаниите са от съществено значение.

Преглед на литературата

Концепцията за устойчиво развитие и съответно понятието „устойчивост“ се свързват с доклада „Брундтланд“ (1992) - на името на Гру Харлем Брундтланд, председател на Световната комисия по околна среда и развитие към ООН . В него се дава определение за развитие/икономически растеж, който е в състояние да задоволи нуждите на настоящето, без да застрашава възможностите на бъдещите поколения. Посочени са и трите стълба: икономическа, екологична и социална устойчивост.

„Икономическата устойчивост е основната характеристика на компанията, която функционира в съгласие с външната бизнес среда, е нейната икономическа устойчивост, която й осигурява конкурентни предимства пред останалите пазарни агенти“ (Касърова, 2010). Авторът разглежда и финансовата устойчивост, като проявление на икономическата и в обобщение дава следното определение за нея: финансовата устойчивост е „икономическа категория, характеризираща система от икономически отношения, при които предприятието е способно да функционира в условията на риск и променяща се бизнес среда, осигурявайки платежоспособност, балансираност на финансовите потоци, независимост от привлечения капитал и реализиране на финансови резултати, чийто обем е достатъчен за саморазвитие и удовлетворяване на интересите на всички заинтересовани страни“.

В научните разработки по въпроса за връзката между устойчивите (ESG) практики и финансовото представяне на компаниите, учените не са на единно мнение относно корелацията между двете. Според Теорията на заинтересованите лица (Stakeholder theory) корелацията е положителна, т.е. устойчивите практики, съответно инвестициите в тази посока, водят до по-добри финансови резултати за компаниите. Теорията е разработена от Р. Едуард Фрийман и постулира, че една компания е успешна,

само ако създава стойност за всички свои заинтересовани страни, а не само за акционерите си. Докато според неокласическата теория и теорията за компромиса (Trade-off theory), която е развитие на неокласическата, корелацията е отрицателна.

Направено е проучване за влиянието на ESG практиките във финансовото състояние на компаниите от Централна и Източна Европа от Siwiec и Karkowska (2024), като е изследвана извадка от 48 компании от региона за периода от 2017 г. до 2021 г. Изследваните компании са от 5 държави – Полша, Чехия, Румъния, Словения и Унгария и са от 11 индустриални сектора.

Обследвана е връзката между резултатите от платформата Рефинитив (вече част от LSEG - London Stock Exchange Group) за т. нар. ESG рейтинг – ESG резултат, включително отделни резултатите по трите стълба – Околна среда, Социална отговорност и Управление с избран показател за финансова стабилност – Възвръщаемост на активите (измерен през печалбата преди такси). Двете хипотези на изследването са следните: 1) Съществува положителна връзка между ESG представянето и финансовото представяне на една компания и 2) Връзката между ESG отчитането и представянето на компанията зависи от сектора, в който тя оперира (финансов или нефинансов). Резултатът от изследването е, че е доказано положително въздействие на ESG практиките върху финансовото състояние на компаниите.

Не е намерена литература по темата относно подобно изследване в Европа, отнасящо се изрично до минерално-суровинната индустрия с оглед спецификата й и същественото й отличаване от останалите сектори. Но в Китай е направено научно изследване конкретно за тази индустрия от Zhand и Mao (2024) за периода 2018 г.– 2022 г. и ESG практиките, съответно инвестирането на средства в тази посока, корелират положително с финансовото представяне на компаниите. Изследвани са следните показатели: Възвръщаемост на активите и Задлъжнялост (Leverage), както и Ръст в оперативната печалба спрямо предходната година. Другите променливи, които са ползвани са: размер на компанията; концентрация на собственост (делът на акционерът с най-висок размер собственост), опит (възраст на бизнеса). По отношение на променливите величини, свързани с устойчивостта (ESG) е ползван ESG рейтинг (резултат на база Wind ESG рейтингова система).

В своя публикация Carrim (2025), управляващ партньор във водеща правна и консултантска кантора от Южна Африка Webber Wentzel посочва, че финансирането на минерално-суровинната индустрия с цел добавяне и увеличаване на стойност в наши дни се усложнява и вече не зависи само от нуждата от собствен капитал и традиционен привлечен капитал (дълг). Индустрията среща следните нови предизвикателства: балансиране търсенето на продукцията, капиталовите разходи, необходимостта на инвеститори и отчитане на ESG въпросите.

България е сред страните с ключов принос за ресурсната осигуреност на Европа – ние сме един от основните производители на цинк и мед в Европа, осигурявайки 14%-15% от европейското производство на мед, 8% на олово и 4% на цинк по данни от началото на 2024 г. Страната е на трето място в Европа по добив на мед и на четвърто място по добив на цинк. Тази позиция на страната в международния пазар подчертава важността на стабилността и устойчивостта на минната индустрия.

Доказателство за важността на устойчивостта за предприятията от минерално-суровинната индустрия са инвестиционните проекти на дружествата от този сектор през последните години. „Секторът инвестира в модернизация и устойчивост. Минната индустрия се адаптира към бъдещето с внедряването на дигитални системи за мониторинг, автоматизация на производствените процеси и високотехнологични средства за безопасност. Разходите за опазване на околната среда в сектора надхвърлят 54 млн. лв. през 2024 г. Те се инвестират в пречиствателни станции, рекултивация на терени, дронове за агрообработка и екологичен мониторинг.“ (Григорова, 2025)

В контекста на минерално-суровинната индустрия темата за ESG инвеститорите често е на дневен ред за компаниите поради тяхната природа и отпечатък именно върху околната среда и социалния компонент. От една страна, инвестирането в ESG индикатори неминуемо проправя път към нови възможности и финансиране на проекти. В този смисъл инвеститорите се грижат активно за тази страна на бизнеса си. От друга страна, са вътрешните и външните заинтересовани страни, които все повече изискват прозрачни отношения и ефективност по въпросите, касаещи ESG (Петрова и Трифонова, 2022).

Тази индустрия се характеризира с дългосрочни инвестиции и специфични рискове, което прави финансовата стабилност фундаментална за развитието на бизнеса. Специфични финансови рискове, пред които са изправени компаниите от сектора са ценовите рискове и високите капиталови разходи:

Бранкова-Златанова (2013) разграничава три разновидности на ценовите рискове, характерни за сектора.

Изменение на цената на готовата продукция (концентрата). Това се обяснява с факта, че стабилността в този сектор зависи в голяма степен от борсовите цени на металите, върху които компаниите не могат да влияят. След възходящия тренд след 2021 г., цените на някои метали леко спаднаха през 2024 г., но все пак остават по-високи от тези преди COVID-19 кризата и над нивата от 2023г.

Колебания на курса на валутата (валутен риск). Немалка част от продажбите и от доставките са в долари, докато разходите за себестойност са в лв. до 2025 г., а от 2026 г. съответно в евро.

Изменение на цената на материалите и горивата. Характерно за сектора е, че той е енергоемък, а разходите за енергия са трудно контролируеми, освен ако не се правят инвестиции, насочени за собствено производство на енергия. През 2024 г. в България са изплащани компенсации за ток, за периода от 01.07.2024 г. до края на годината; през 2023 г. също са изплащани компенсации (енергийна субсидия).

Ежегодната необходимост от високи инвестиционни разходи и осигуряване на средства за тяхното финансиране са другия финансов риск, специфичен за компаниите от минерално-суровинната индустрия. Доказателство за това е високият дял на дълготрайни активи в балансите на дружествата от сектора, както и ежегодните капиталови разходи.

Извършването на анализ на финансовите показатели на база на информацията от счетоводните отчети в минерално-суровинната индустрия е от критично значение,

понеже секторът е пряко свързан с изчерпаеми ресурси, високи капиталови разходи и значително въздействие върху околната среда и обществото. С анализиране на тези показатели се онагледява как предприятията балансират целите за постигане на печалба с дългосрочната екологична и социална устойчивост.

За анализиране на икономическата устойчивост, и в частност на финансовата и капиталова устойчивост в минерално-суровинния сектор се използват специфични финансови показатели, които отразяват капиталоинтензивния характер на индустрията, включително и зависимостта от пазарните цени на суровините, както и факта, че секторът е енергоемък. Това са показатели за рентабилност (ефективност) и за капиталовата структура. Тези показатели са избрани, защото капиталовите средства (собствен ресурс, дълг, алтернативни източници – джойнт венчър предприятия, сливания, авансиране от клиенти, стратегически дялови инвестиции и други) имат съществено значение за предприятията от сектора.

Методология

Изследването се основава на публикуваните одитирани финансови данни за периода 2023 г.-2024 г. за 6 компании (КЦМ АД, Холдинг КЦМ 2000, Асарел Медет АД, ДПМ Челопеч ЕАД, ДПМ Крумовград ЕАД и Златна Панега Цимент АД). Избраните дружества оперират в минерално-суровинната индустрия. Използваните методи са следните: статистико-икономически метод за обработка на емпирични данни; анализ-синтез, сравнение, аналогия, индукция и дедукция, вторично изследване и експертна оценка. На базата на публикуваните счетоводни данни са изчислени следните финансови показатели:

1.Показатели за рентабилност и възвръщаемост

Тези показатели демонстрират способността на предприятието да генерира стойност от вложения капитал.

Рентабилност на продажбите (EBITDA марж)

$$EBITDAm = \frac{X}{Y}, \quad (1)$$

където:

X– приходи от продажби;

Y – оперативна печалба преди лихви, данъци и амортизация.

Индикаторът е важен за сектора, тъй като разходите за амортизация (нефинансови) са големи с оглед високия дял на дълготрайните активи в баланса на дружествата. Това е причината да е избран той, а не марж на нетната печалба.

Рентабилност (Възвръщаемост) на Дълготрайните активи (РДА)

$$\text{РДА} = \frac{(\text{Нетна печалба})}{\text{Дълготрайни активи}} \quad (2)$$

Този показател е важен за индустрия с огромен материален капитал (машини, съоръжения, находища), каквато е минерално-суровинната индустрия.

Рентабилност (Възвръщаемост) на собствения капитал (ROE)

$$ROE = \frac{\text{Нетна печалба}}{\text{СК}} \quad (3)$$

Коефициентът отразява ефективността, с която се използва капиталът.

2.Показатели за финансова автономност и задлъжнялост

Коефициент на финансова автономност (ФА)

$$\text{ФА} = \frac{(\text{Собствен капитал}}{(\text{Общо активи})}) \quad (4)$$

Финансов ливъридж (ФЛ)

$$\text{ФЛ} = \frac{\text{Нетен финансов дълг}}{\text{СК}} \quad (5)$$

Коефициент за задлъжнялост (КЗ) „Нетен финансов дълг/ EBITDA“.

$$\text{КЗ} = \frac{\text{Нетен финансов дълг}}{EBITDA} \quad (6)$$

Този коефициент показва за колко години външния дълг може да бъде изплатен на база на генерираната историческа оперативна печалба за година.

Коефициент на задлъжнялост (КЗ) Привлечен капитал/ Собствен капитал

$$\text{КЗ} = \frac{\text{Привлечен капитал}}{\text{СК}} \quad (7)$$

По отношение на показателите за финансов дълг е избрано да се изследват нетния дълг, т.е. “Дълг (заеми и лизинги) – Парични средства”, тъй като се счита за по-точен. Обосновката е, че по този начин се показва колко е реалния дълг на дадена компания, в случай че тя реши да ползва наличните парични средства за незабавно погасяване на част от дълга. Докато капиталовата структура се изследва с показателя Привлечен Дълг/Собствен капитал, където финансовия дълг (заеми и лизинги) участва с брутната си стойност.

Конкретно тези показатели са избрани като подход за измерване на икономическата устойчивост, и в нейното проявление финансова устойчивост с оглед на:

- Финансовите коефициенти за рентабилност показват способността на компанията да създава стойност, да генерира печалба и да увеличава впоследствие Собствения капитал (в случай, че нетната печалба не се разпределя в пълния си размер към собствениците под формата на дивидент);
- Финансовите коефициенти, свързани с капиталовата структура показват доколко компанията е финансово независима от кредитори, каква е ролята на финансирането за дейността, както и каква е платежоспособността по отношение възможността за изплащане на дълга.

Обект на изследване са:

Холдинг КЦМ 2000 АД и КЦМ АД

Главното дружество в групата е КЦМ АД, с дейност производство основно на олово и цинк. Холдинг КЦМ 2000 АД се формира през 2022 г. чрез обединяване на бизнес дейностите на групата дружества, свързани с пловдивската компания КЦМ АД и родопските минни дружества Горубсо-Мадан АД, Върба-Батанци АД (добив на оловно-цинкови руди и преработката им до оловен и цинков концентрат) и Лъки Инвест АД (добив на оловно-цинкова руда) в обща холдингова структура. За целите на прозрачност на бизнеса създаването на холдингова група с представяне на консолидиран финансов отчет е положителна стъпка. Групата е пример за осъществяването на „кръгова икономика“, предвид: наличие на добивни компании, както и на металургична компания.

Група ДПМ Металс

Разгледани са двете дружества на групата, опериращи в България, с дейност добив на злато: ДПМ Челопеч ЕАД(добив на златно-меден концентрат и на пиритен концентрат) и ДПМ Крумовград ЕАД (добив на златно-меден концентрат) . Специфично за групата е, че двете компании, опериращи в България, са с балансовият дълг изцяло към компанията-майка. Те ползват външен дълг от търговски банки за финансиране на оборотните си нужди – чрез многоцелеви кредитни линии, ползвани през 2023 г. и 2024 г., изцяло за задбалансови ангажименти (за банкови гаранции и акредитиви).

Асарел-Медет АД

Основната дейност е добив и обогатяване на медна и меднопиритна руда, бизнес историята е дълга. Дружеството има собственост и в други бизнеси в региона на гр. Панагюрище– болница, хотелиерство, други. Характерно за компанията е ежегодното продължаващо инвестиране в програми за устойчиво развитие.

Златна Панега Цимент ЕАД

Дружеството е част от международната група с гръцка собственост Titan, един от големите производители на цимент и бетон в България. Според изследване на Георгиева (2026) в „Капитал“ компанията е в топ 10 сред производителите на строителни материали в България за 2024 г. Продукцията на това дружество е от критично значение за минерално-суровинната индустрия, тъй като участва в строителството на подземния добив и в наземната инфраструктура на мините. Основното предизвикателство е намаляването на въглеродните емисии и съответно инвестициите на дружествата от сектора са насочени в иновации, свързани с това. Асортиментът на Титан Златна Панега включва две марки цимент, разработени през 2023 г, с 35% по-нисък въглероден отпечатък в сравнение със стандартно произвеждания. В допълнение, дружеството е първото в България от този сектор със собствен фотоволтаичен парк

Изследователски процес

На база обработена финансова информация от последните публикувани счетоводни отчети (за 2023 г. и за 2024 г.) се изследват показатели за рентабилност и показатели за финансова автономност и задлъжнялост.

Таблица 1: *Показатели за рентабилност*

	Изме-рител	КЦМ АД		Холдинг КЦМ 2000 АД		Асарел Медет АД		ДПМ Челопеч ЕАД		ДПМ Крумовград ЕАД		Златна Панега Цимент АД	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
EBITDA (рентабилност на продажбите)	%	2%	9%	3%	11%	30%	39%	44%	62%	77%	72%	21%	26%
Рентабилност на ДА	%	-7%	-1%	-6%	1%	29%	31%	63%	142%	102%	140%	14%	23%
Рентабилност на СК	%	-11%	-1%	-8%	2%	26%	29%	61%	86%	86%	96%	12%	21%

Въз основа на данните от таблица 1 се наблюдава:

✓ Положителна тенденция в показателите за рентабилност, което се дължи в голяма степен на благоприятни пазарни условия – ръст в цените на металите и на строителните материали (отнася се за Златна Панега Цимент) и повишено търсене на продукцията на компаниите;

✓ Изключение прави единствено ДПМ Крумовград ЕАД по отношение на показателят Рентабилност на продажбите (EBITDAm 72% за 2024 г. спрямо 77% за 2023 г.). Въпреки това, компанията продължава да е с най-висок марж от всички изследвани дружества;

✓ Прави впечатление съществено по-ниската рентабилност на продажбите за двете дружества от група КЦМ, въпреки възстановяването/подобрението през 2024 г. (Холдинг КЦМ 2000 АД /11% за 2024 г./ и КЦМ АД /9% за 2024 г./) спрямо останалите компании. Единствено за тях стойностите на показателите за рентабилност на ДА и на СК са отрицателни и с ниска положителна стойност само за холдинга за 2024 г.

Таблица 2: *Показатели за финансова автономност и задлъжнялост*

	Изме-рител	КЦМ АД		Холдинг КЦМ 2000 АД		Асарел Медет АД		ДПМ Челопеч ЕАД		ДПМ Крумовград ЕАД		Златна Панега Цимент АД	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
СК/ Общо активи %	%	**47%**	**47%**	**54%**	**55%**	**69%**	**69%**	**57%**	**72%**	**45%**	**50%**	**86%**	**81%**
Нетен Финансов дълг/ СК (Gearing)	%	**66%**	**65%**	**48%**	**46%**	**-5%**	**-16%**	**-6%**	**-29%**	**23%**	**31%**	**-3%**	**-4%**
Нетен Финансов дълг/ EBITDA (Leverage)	в пъти	**17,15**	**2,87**	**9,50**	**2,12**	**-0,15**	**-0,34**	**-0,07**	**-0,27**	**0,17**	**0,51**	**-0,17**	**-0,14**
Привлечен капитал/СК	в пъти	**1,12**	**1,11**	**0,85**	**0,81**	**0,45**	**0,44**	**0,77**	**0,40**	**1,24**	**0,98**	**0,16**	**0,24**

Въз основа на данните от таблица 2 могат да се изведат следните изводи

- ✓ сравнително стабилна капиталова структура на дружествата от сектора и през двата разглеждани периода: СК е минимум 50% от размера на активите и Привлечен капитал/Собствен капитал е под 1-ца. Може да се отбележи, че в КЦМ АД на индивидуално ниво съотношенията не са постигнати, но на консолидирано ниво в Холдинг КЦМ 2000 АД са. За ДПМ Крумовград през 2023 г. СК е под 50% (45%) и съответно Привлеченият капитал (основно съставен от финансов дълг) го превишава, но смекчаващ риска фактор е това, че заемите са към компанията-майка, а не към външни кредитори.
- ✓ въпреки че три от разглежданите компании (ДПМ Челопеч ЕАД, ДПМ Крумовград ЕАД и Златна Панега Цимент АД) разпределят и изплащат дивидент през 2024 г., надвишаващ размера на печалбата за предходната година, финансовата им автономност остава висока.

Анализ на получените резултати

Предвид капиталоемкия характер на минерално-суровинната индустрия показателите за рентабилност и финансова автономност са от съществено значение за компаниите от сектора. Вследствие анализа на получените резултати в таблица 1 могат да бъдат направени следните заключения:

За всички разглеждани компании показателите за рентабилност се подобряват през 2024 г. спрямо 2023 г. Отчитайки инвестиционните разходи за милиони и през двете години във всяка една от фирмите и факта, че рентабилността на СК се подобрява, се стига до заключение, че не разчитат прекомерно на нов дълг за финансиране на капиталовите разходи. Тога ги прави устойчиви на кризи и непредвидени обстоятелства.

С най-ефективно управление и съответно с най-висока възвръщаемост на инвестициите в дълготрайни активи и на СК и за двата разглеждани периода (2023 г. и 2024 г.) са двете компании от група ДПМ: ДПМ Челопеч ЕАД и ДПМ Крумовград ЕАД. Това може да се обясни с: 1) най-висок марж на печалбата в тези дружества; 2) в абсолютна стойност печалбата е близка до размера на СК; 3) по-нисък дял на ДА в баланса в сравнение с другите компании.

Управлението на инвестициите в Асарел Медет АД и в Златна Панега Цимент АД, както и на капитала, предоставен от собствениците, също се оценява като ефективно и води до извод за дългосрочната стабилност и производителност на компаниите. Рентабилността на ДА и на СК при тях за двата разглеждани периода е положителна величина и се подобрява през 2024 г. Това е повлияно от положителния тренд в рентабилността на продажбите (EBITDA и нетна печалба). Най-съществен размер инвестиции през 2024 г. са направили Асарел Медет АД (през 2024 г. над 100 млн. лв.), като същевременно се повишава рентабилността на СК (от 26% през 2023 г. на 29% през 2024 г.)

Двете дружества от група КЦМ (Холдинг КЦМ 2000 АД и КЦМ АД) не са напълно съпоставими с останалите компании. Основното дружество в групата е заето в металургия, а не директно в добивната промишленост. Неприемливите стойности на показателите за рентабилност на СК и на ДА се дължат освен на отрицателния финансов резултат, вследствие на високи амортизационни разходи и за двата периода и на форсмажорни обстоятелства през 2023 г., и на високия дял на ДА в баланса на дружествата и инвестиционните ежегодни разходи (на ниво холдинг: над 39 млн. лв. за 2023 г. и над 25 млн. лв. за 2024 г.). Стъпвайки на следните изчисления за показателите за рентабилност за 2024 г.: EBITDA/ДА 16% и EBITDA/СК 21%, както и видно от възстановяване на рентабилността на продажбите (до 9-11%) до нивата от предходни години може да се заключи, че финансовото състояние и на тези две компании е стабилно и управлението на инвестициите и капитала е ефективно.

Въз основа на анализа на резултатите от таблица 2 относно финансовата автономност и задлъжнялост изводите са следните:

Всички разгледани компании с изключение на двете дружества от Холдинг КЦМ не разчитат на външен дълг в голяма степен. Благодарение на високите наличности на парични средства и съществено намаляване на дълга през 2024 г. в Асарел Медет АД и в двете компании от група ДПМ двата коефициента Нетен дълг/EBITDA и Нетен дълг/СК са с отрицателни стойности, а за ДПМ Крумовград ЕАД –

дружеството би могло да изплати финансовия си дълг към свързани компании за по-малко от 1 година. Златна Панега Цимент АД също не разчита основно на външен дълг. Въпреки високите инвестиционни разходи, необходими за продължаване на дейността и запазване на конкурентоспособност, стойностите на показателите за задлъжнялост са показателни за това, че инвестиционните политики не са агресивни.

Група КЦМ разчита на външно финансиране от банки в голяма степен, не само на собствени средства. Вследствие на голямата авария през 2023 г. и спряното производство в Оловен цех за 6 месеца тогава, стойността на показателите за тази година са неприемливи. Факторите, смекчаващи риска са следните: дейността е възстановена през 2024 г. и е получено застрахователно обезщетение през 2024 г. в размер над 13 млн. лв. Съответно през 2024 г. показателите показват сравнително приемлив риск, въпреки по-високата задлъжнялост на двете компании в сравнение с други изследвани дружества – като финансовия дълг би могъл да се изплати за под 3 години. В бъдеще може да се очаква допълнително намаляване на този срок.

Основните изводи, които се налагат от изследването са, че в минерално-суровинната индустрия се открояват следните рискове:

- ежегодно високи разходи за инвестиции –на база изследваната информация за 2023 г. и за 2024 г. сумите за капиталови вложения са за милиони във всяка една от анализираните компании
- висок дял на ДА спрямо всички активи и висок размер на ДА в абсолютна стойност– през 2024 г. с най-нисък дял на ДА са ДПМ Крумовград ЕАД (35%) и ДПМ Челопеч (43%), за останалите компании делът е над 60%
- значителни суми, необходими на финансиране – включително СК и оперативна печалба преди лихви, данъци и амортизация (EBITDA), стратегически партньорства и външен дългосрочен дълг.

Заключение

В заключение може да се обобщи, че дружествата от минерално-суровинната индустрия реагират адекватно на рисковите фактори, пред които са изправени и успяват да поддържат финансова стабилност. С най-съществено значение от изброените в статията рискове е капиталоемкия характер на бизнеса, както и силното влияние на борсовата цена на металите и цената на електро енергията върху реализирания оперативен финансов резултат. Тук се откроява значимостта и ролята на финансирането за тези инвестиции. От направеното изследване и анализа на резултатите от него се вижда, че ежегодно трябва да се осигуряват значителни по размер източници за финансирането им и от избора на алтернатива (собствени средства – СК и оперативна печалба, външен дълг, привличане на инвеститори с дялово участие и други) зависи капиталовата структура на дружествата. Спазването на устойчиви практики, инвестирането на средства в тази посока и отчитането на устойчивостта влияе положително върху управлението на рисковете и съответно води до достъп до финансиране от международни институции.

Литература

Бранкова-Златанова, Б. (2013). *Стратегически рискове за минните проекти*, с. 33.

Георгиева, М. (2026). Топ 10 производители на строителни материали: С поредни силни продажби, https://www.capital.bg/biznes/promishlenost/2026/03/10/4876712_top_10_proizvoditeli_na_stroitelni_materiali_s_poredni/

Касърова, В. (2010). Модели и показатели за анализ на финансовата устойчивост на компанията, Научен ръкопис, депозиран в НАЦИД-ЦНТББИКП № Нд20/2010 http://eprints.nbu.bg/508/1/Modeli_za_stoinosten_analiz_burgas_doklad.pdf

Петрова, В., Трифонова, Б. (2022). Минерално-суровинната индустрия през призмата на ESG инвестирането и целите за устойчиво развитие на ООН, *сп. Геология и минерални ресурси*, София, ISSN 1310-2265, бр. 2-3, с. 10-15

Siwiec, K., Karkowska, R. (2024). Relationship between ESG and Financial Performance of Companies in the Central and Eastern European Region; *Central European Economic Journal (CEEJ)*, ISSN 2543-6821, Sciendo, Warsaw, Vol. 11, Iss. 58, pp. 178-199, https://doi.org/10.2478/ceej-2024-0013

Zhang. Y, G. Mao, (2024). Study of the Impact of ESG Performance on The Financial Performance of Mining Companies; *“Frontiers in Business, Economics and Management”, vol. 15, No 1*, pp. 126-132; DOI: https://doi.org/10.54097/mrbw8f75

Carrim, R, (2025). The future of mining depends on the industry’s ability to finance itself, https://www.webberwentzel.com/News/Pages/the-future-of-mining-depends-on-the-industry-s-ability-to-finance-itself.aspx

Годишни финансови отчети и одиторски доклади на изследваните компании: Търговски регистър и регистър на юридическите лица с нестопанска цел https://portal.registryagency.bg/CR/Reports/VerificationPersonOrg

INFLUENCE OF THE BULGARIAN MINING INDUSTRY ON THE DEVELOPMENT OF REGIONS

Veselin Mitev, Emil Dimov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: v.mitev@mgu.bg; emil.dimov@mgu.bg

ABSTRACT. The report presents the results of a comparative analysis of some of the achieved economic and social indicators of the Bulgarian mining industry in general and by individual statistical regions of Bulgaria during the period 2018 ÷ 2023. The changes in the economic indicators were analysed: number of mining enterprises, number of personnel, and level of wage costs in the “Mining and Quarrying Industry” subsector. The aim of this study is to outline the territorial distribution of the number of mining enterprises, the personnel engaged in them, and the level of wage costs in the "Mining and Quarrying Industry" subsector by statistical regions during the period 2018 ÷ 2023, through an analysis of the available industry and national statistical information. The indicator of gross annual salary by economic activities in Bulgaria in 2023 is also presented. The results of the comparative analysis substantiate that the Bulgarian mining industry has a significant impact on the socio-economic development and well-being of the regions and municipalities.

Key words: Bulgarian mining industry, comparative analysis, socio-economic impact.

ВЛИЯНИЕ НА БЪЛГАРСКАТА МИННА ИНДУСТРИЯ ВЪРХУ РАЗВИТИЕТО НА РЕГИОНИТЕ

Веселин Митев, Емил Димов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В доклада са представени резултатите от проведен сравнителен анализ на част от постигнатите икономическите и социални показатели на българската минна индустрия общо и по отделните статистически райони на България през периода 2018 ÷ 2023 г. Анализирано е изменението икономическите показатели: брой на минните предприятия, брой на персонала и равнището на разходите за възнаграждения в подсектор „Добивна промишленост“. Целта на настоящото изследване е чрез анализ на наличната браншова и национална статистическа информация да се очертае териториалното разпределение на броят на минните предприятия, на персонала, ангажиран в тях и равнището на разходите за възнаграждения в подсектор „Добивна промишленост“ по статистически райони през периода 2018 ÷ 2023 г. Представен е и показателят брутна годишна работна заплата по икономически дейности в България през 2023 г. Резултатите от проведения сравнителен анализ обосновават, че българската минна индустрия оказва съществено влияние върху социално-икономическото развитието и благосъстоянието на районите и общините.

Ключови думи: българска минна индустрия, сравнителен анализ, социално-икономическо въздействие.

Introduction

The mining industry, in addition to being important for the mineral and raw material independence and economic development of the country, also has a significant impact on the socio-economic development and well-being of regions and municipalities.

According to Blagoev (2019), the industrial sector of the Bulgarian economy is traditionally defined as a structurally determining sector, and the mining industry, as part of the sector, occupies due importance both in providing employment (especially in some regions of the country) and in the formation of the gross domestic product (GDP).

According to Arias et al. (2014), “Despite the predominant global scale and scope of the mining industry, its impact on socio-economic development is most noticeable at the regional level.” In this regard, it is at the regional and municipal level that the effect of the mining industry on the socio-economic development of the regions is most noticeable and therefore essential for the development of the individual regions of the country.

Over the past thirty years, significant transformations have taken place in the mining industry, changing the ways in which mining companies are organised within the territories where they operate (Castaño et al., 2019). One of the most important transformations is the way mining companies are functionally organised, moving from a vertical integration model to a horizontal one and outsourcing non-core activities in order to improve economic efficiency and reduce costs (Morris et al., 2012).

Research data and methods

The sources of information for this survey are: national and international databases with scientific information, statistical data of the National Statistical Institute (NSI) of the Republic of Bulgaria, and its information system "INFOSTAT". The methods used in the development of this study are: research of scientific literature and statistical information, analysis and synthesis, system approach, method of inter-business comparisons, and graphical methods for analysis of time series and structures.

The purpose of this study is to outline the territorial distribution of the number of mining enterprises, the personnel involved in them, and the level of remuneration costs in the Mining and Quarrying Industry subsector by statistical regions in the period 2018 ÷ 2023 through analysis of the available sectoral and national statistical information. In this study, we have limited ourselves to conducting a comparative analysis of part of the achieved economic and social indicators of the Bulgarian mining industry by the individual statistical regions of Bulgaria in the period 2018 ÷ 2023.

Key economic indicators of the mining and quarrying subsector

Based on the indicators Wages and salaries, and Persons employed in the mining industry, the indicator Wages and salaries, per employee has been calculated

The main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector of Bulgaria in the period 2018 ÷ 2023 are presented in Table 1.

Table 1. *Main economic indicators of Bulgaria's mining industry in the period 2018 ÷ 2023*

Mining and quarrying industry - total	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Number of enterprises, num.	373	354	359	379	404	390
Wages and salaries, BGN'000	454973	415738	483440	525294	575655	653185
Employed persons, num.	21554	19174	20313	19749	18736	18653
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	21.109	21.682	23.800	26.599	30.725	35.018

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

For the analysed period from the data in Table 1, there is a clear trend of increasing the number of mining enterprises in Bulgaria, the wages and salaries as a whole and per person, and decreasing the number of employed persons. The number of enterprises increased from 373 in 2018 to 390 in 2023, the number of employed persons decreased by 13.46%, and the wages and salaries increased by 43.57%. This leads to a sustained increase in the wages and salaries per employee by 65.89% for the entire period, which is significantly above the national average.

A study of the competitiveness of the Bulgarian mining industry (Mitev et al., 2025) summarises the following: "In the period 2018-2024, the Bulgarian mining industry increased its economic indicators, labour productivity, staff remuneration, and competitiveness."

Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the different statistical regions of Bulgaria

The main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the statistical region North-West in the period 2018 ÷ 2023 are presented in Table 2.

Table 2. *Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the North-Western region in the period 2018 ÷ 2023*

North-Western Region	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Number of enterprises, num.	39	39	40	43	48	42
Wages and salaries, BGN'000	3579	3793	3761	4621	6291	7086
Employed persons, num.	283	305	307	430	424	410
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	12.647	12.436	12.251	10.747	14.837	17.283

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

The data in Table 2 shows that the number of enterprises in the North-Western region increased from 39 in 2018 to 42 in 2023. This leads to a sustainable increase in wages and salaries per employed person of 136.66%, which is significantly above the average for the North-Western region of the country.

The main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the Northern Central statistical region in the period 2018 ÷ 2023 are presented in Table 3.

Table 3. *Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the Northern Central region in the period 2018 ÷ 2023*

Northern Central Region	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Number of enterprises, num.	25	22	23	24	25	28
Wages and salaries, BGN'000	26591	28888	30773	31884	18651	19927
Employed persons, num.	1465	1419	1481	1428	762	755
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	18.151	20.358	20.779	13.061	24.476	26.393

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

The data in Table 3 show a slight increase in the number of enterprises in the Northern Central region. They increased from 25 in 2018 to 28 in 2023, the number of employed persons almost halved, and the wages and salaries decreased by 25.07%. The wages and salaries per employee increased almost 1.5 times. The wages and salaries per employee of the enterprises in the mining industry here is also above the average for the region.

The main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the statistical region North-East in the period 2018 ÷ 2023 are presented in Table 4.

The data in Table 4 show a slight decrease in the number of enterprises in the North-Eastern region. They decreased from 40 in 2018 to 38 in 2023, the number of employed persons decreased by 9.65%, and the wages and salaries increased by more than 1.5 times. The wages and salaries per employee increased by 62.88%. The remuneration of the staff of the enterprises in the mining industry is still above the average for the statistical region.

Table 4. *Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the North-Eastern region in the period 2018 ÷ 2023*

North-Eastern region	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Number of enterprises, num.	40	37	31	33	36	38
Wages and salaries, BGN'000	10732	8327	7305	7875	13271	15794
Employed persons, num.	715	458	441	480	633	646
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	15.010	18.181	16.565	16.406	20.965	24.449

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

The main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the statistical region South-West in the period 2018 ÷ 2023 are presented in Table 5.

The data for the Southwestern region, presented in Table 5, show an increase in the number of mining enterprises in the region. They increased from 123 in 2018 to 135 in 2023. The wages and salaries during the period increased by 52.98%. The wages and salaries per employee increased by 84.23%.

Table 5. *Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the South-Western region in the period 2018 ÷ 2023*

South-West Region	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Number of enterprises, num.	123	118	117	132	144	135
Wages and salaries, BGN'000	122665	128161	141537	149167	160293	187648
Employed persons, num.	6255	5392	5487	5259	5200	5194
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	19.611	23.767	28.346	28.380	30.826	36.129

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

Almost half of the enterprises in the subsector operate in this statistical region and the remuneration paid is one of the highest for the subsector, occupying second place in the branch.

Table 6 presents the main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the statistical region Southern Central in the period 2018 ÷ 2023.

Table 6. *Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the Southern Central region in the period 2018 ÷ 2023*

Southern Central	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Number of enterprises, num.	89	78	87	88	95	90
Wages and salaries, BGN'000	100743	61212	116292	126109	140972	153923
Employed persons, num.	4681	3388	4499	4283	4162	4120
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	21.522	18.067	25.848	29.445	33.871	37.360

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

The data in Table 6 show a slight increase in the number of enterprises in the Southern Central region. They increased from 89 in 2018 to 90 in 2023, the number of employed persons decreased by 11.98%, and the wages and salaries increased by 52.79%. The Wages and salaries per employee during the period increased by 73.59% and were the highest in the subsector and the highest in the statistical region.

The main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the statistical region South-Eastern in the period 2018 ÷ 2023 are presented in Table. 7.

Table 7. *Main economic indicators of the Mining and Quarrying subsector in the South-Eastern region in the period 2018 ÷ 2023*

South-Eastern Region	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Number of enterprises, num.	57	60	61	59	56	57
Wages and salaries, BGN'000	188703	185637	184512	205638	232505	264429
Employed persons, num.	8155	8212	8098	7869	7555	7528
Wages and salaries per employee, BGN'000/employed person	23.140	22.606	22.785	26.133	30.775	35.126

Source: according to INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165

The data for the South-Eastern region, presented in Table 7, show a slight variation in the number of enterprises in the region. Their number in 2023 remained at the level of 2018 and the number of employed persons decreased by 7.69%. The wages

and salaries during the period increased by 40.13%. The wages and salaries per employee increased by 51.80%. In the South-Eastern statistical region, the remuneration paid in terms of amount is in third place for the branch and the highest for the statistical region.

Regional distribution of Mining and Quarrying enterprises in Bulgaria

Fig. 1 presents the regional distribution of the number of Mining and Quarrying enterprises by statistical regions. The figure is built according to data from Table 2 to Table 7.

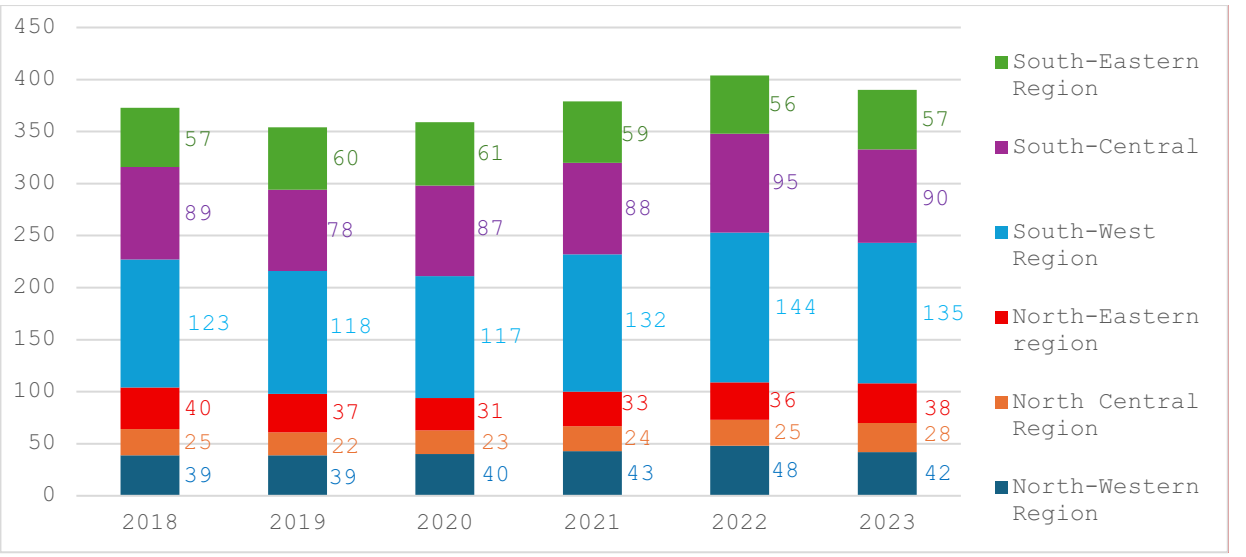


Fig. 1. Regional distribution of Mining and Quarrying enterprises by statistical regions

The data in Fig. 1 shows that one-third of the Mining and Quarrying enterprises are concentrated in the South-Western region, followed by the Southern Central, the South-Eastern, the North-Western, the North-Eastern, and the Northern Central.

Regional distribution of employed persons in the Mining and Quarrying industry

Fig. 2 presents the regional distribution of the employed persons in the Mining and Quarrying subsector by statistical regions by years. The figure is built according to data from Table 2 to Table 7.

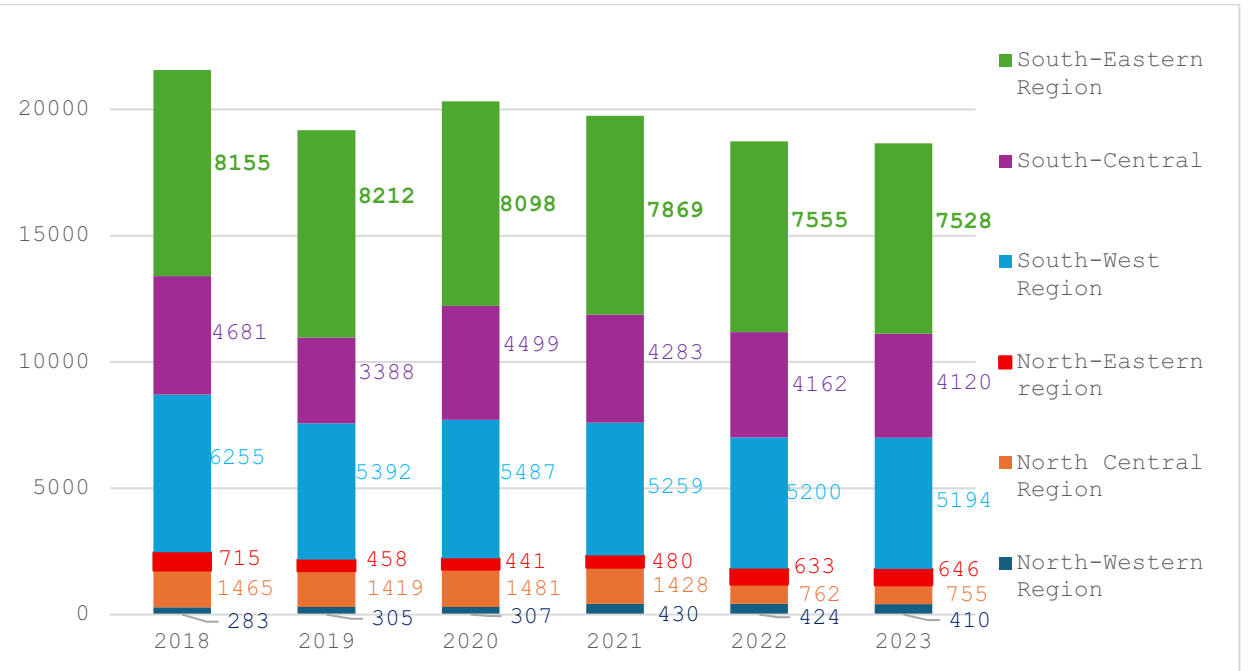


Fig. 2. Regional distribution of the employed in the Mining and Quarrying subsector by periods

The data in Fig. 3 show the largest number of employed persons from the Mining and Quarrying subsector is concentrated in the South-Eastern region, followed by the Northern Central, the Southern Central, the North-Eastern, the Northern Central, and the North-Western.

Regional distribution of labour costs in the Mining and Quarrying industry

In Fig. 3, the change in the wages and salaries per employee of the Mining and Quarrying subsector by statistical regions is presented. The figure is built according to data from Table 2 to Table 7.

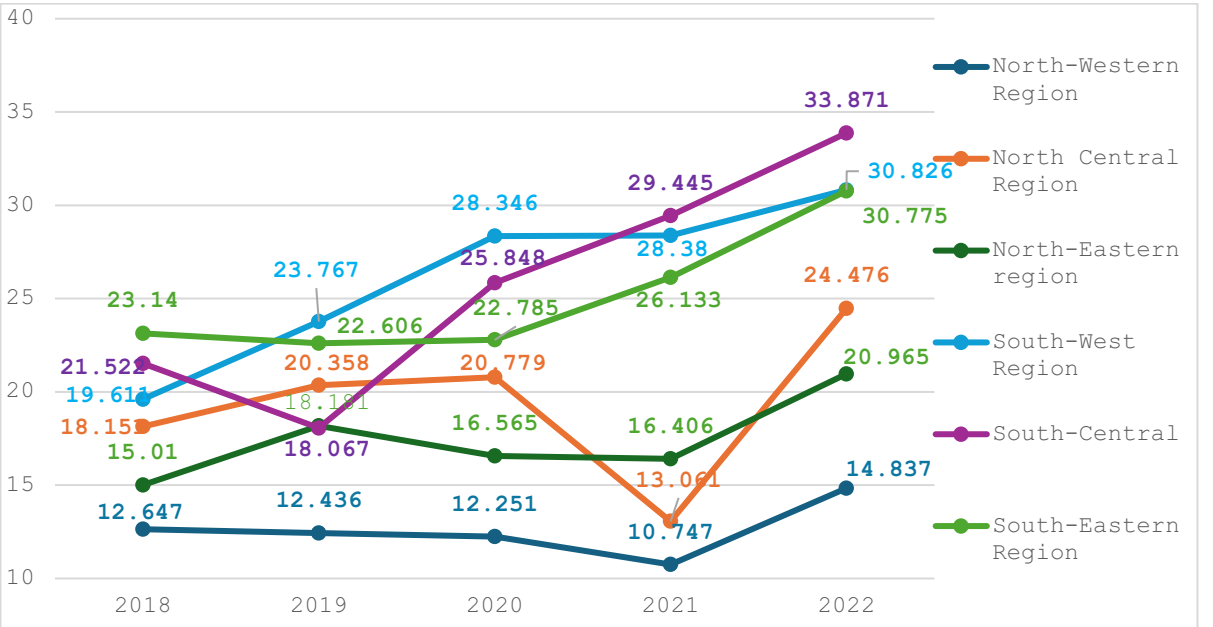


Fig. 3. Amendment of Wages and salaries per employee of the Mining and Quarrying subsector by statistical regions

The change in the annual wages and salaries per employee, presented in Fig. 3, shows some dynamics in the individual years. The highest wages and salaries per employee were made in the Southern Central region, followed by the South-Western, the South-Eastern, the Northern Central, the North-East and North-Western.

Fig. 4 presents the indicator gross annual salary by economic activities in Bulgaria in 2023, except for: unidentified activities of households as employers and undifferentiated activities of households in the production of goods and services for self-consumption (T); activities of extraterritorial organisations and services (U). The figure was generated using NSI data.

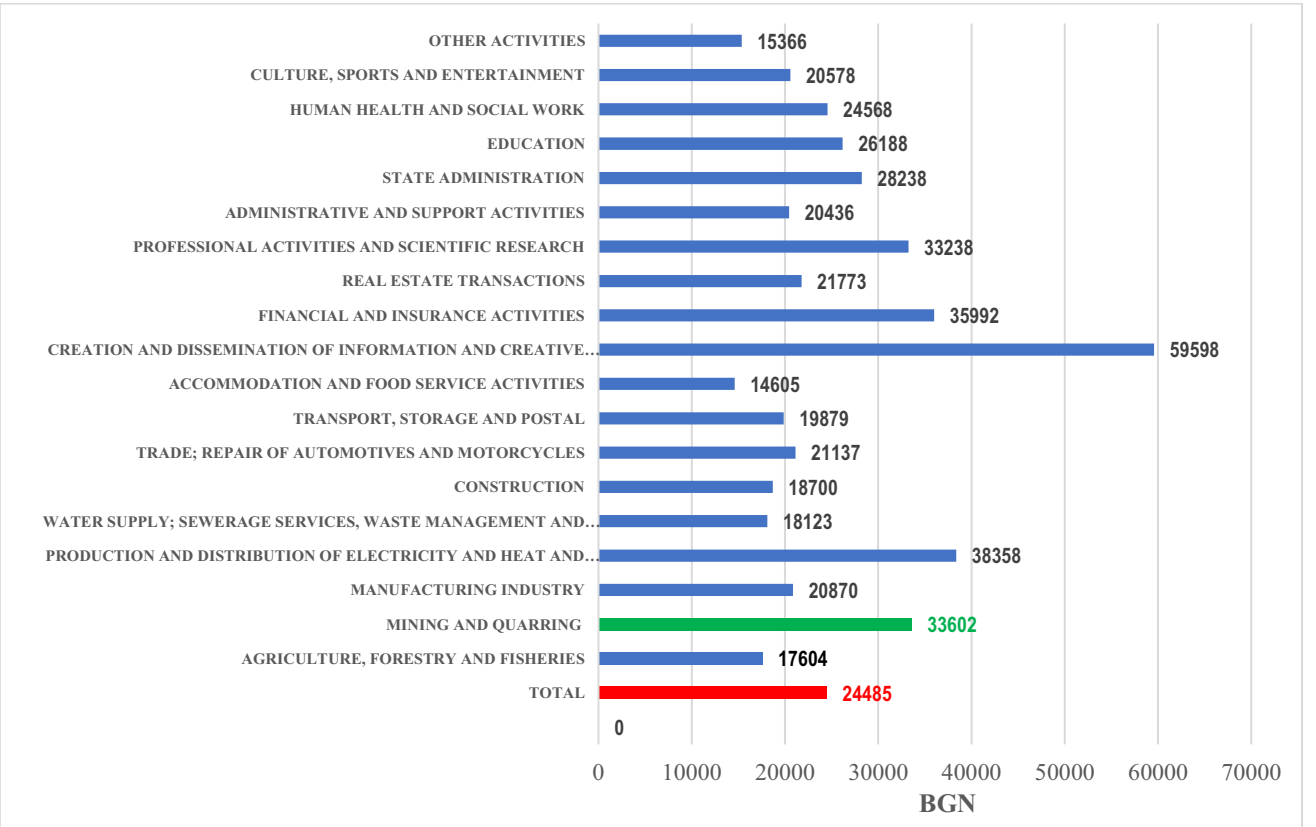


Fig. 4. Gross annual salary by economic activities in Bulgaria in 2023

The source for generating the Fig. 4 is based on NSI data, 2026, https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=567 and https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=2246.

From Fig. 4 it is evident that the average gross annual salary in the Mining and Quarrying subsector in 2023 was higher than the national average by BGN 9117, or by 37.24%. In 2023, the mining industry moved from third to fourth place among the highest-paid economic activities in the country. In 2023, it increased by BGN 4089, or by 13.85%; nevertheless it was also overtaken by economic activity "Financial and insurance activities".

Conclusion

The comparative analysis shows that the Bulgarian mining industry has a significant impact on the socio-economic development and well-being of regions and municipalities. It provides high labour incomes to the population of the regions. It provides livelihood for another 120 000 persons employed in ancillary activities. In a large part of the municipalities, the mining industry is the main employer, insurer, and taxpayer and supports local municipalities with the implementation of several infrastructure, social, donation and charitable programs and projects.

References

Arias, J. E., Rubio-Ramírez, J. F., & Waggoner, D. F. (2014). *Inference based on SVARs identified with sign and zero restrictions: Theory and applications* (International Finance Discussion Papers No. 1100). Board of Governors of the Federal Reserve System. https://www.federalreserve.gov/pubs/ifdp/2014/1100/ifdp1100.pdf

Blagoev, D. (2019). Rolyata na dobivnata promishlenost v industrialniya sector na bulgarskata ikonomika – traditsii, sastoyanie, tendentsii i predizvikatelstva. *Minno delo i geologiya*, *2*, 17-22. *https://mdg-magazine.bg/wp-content/uploads/2022/01/BR2_19WEB.pdf#page=19* (accessed: 11 April 2026).

Castaño, A., Lufín, M. & Atienza, M. (2019). A structural path analysis of Chilean mining linkages between 1995 and 2011. What are the channels through which extractive activity affects the economy? *Resources Policy*, *60*(3), 106-117 *https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.12.007.*

Martín, A., Atienza, M. & Cademartori, J. (2014). Large mining enterprises and regional development in Chile: between the enclave and cluster. *Journal of Economic Geography*, 14(1), 73-95. *https://doi.org/10.1093/jeg/lbt007.*

Morris, M., Kaplinsky, R. & Kaplan, D. (2012). One thing leads to another—Commodities, linkages, and industrial development. *Resources Policy*, *37*(4), 408–416. *https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.06.008.*

Mitev, V., Hristov, Y., Cherchelanov, A., & Arsova, E. Competitiveness of the Bulgarian Mining Industry. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 68*, 2025. *https://doi.org/10.5281/zenodo.17160965.*

INFOSTAT – Information System of National Statistical Institute of Bulgaria,

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=231 (accessed 11 Match 2026)

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=567 (accessed 11 Match 2026)

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=2246 (accessed 11 Match 2026)

https://infostat.nsi.bg./infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2165 (accessed 11 Match 2026)

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL MINE WATER TREATMENT TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY: SMART GOALS AND LIFE CYCLE ASSESSMENT

Katerina Nikolova, Svetlana Bratkova, Anatoliy Angelov, Petia Genova, Miglena Ivanova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ivanov@abv.bg

ABSTRACT. Mine water poses a significant environmental risk due to its high acidity and metal and sulphate concentrations. It also represents a potential resource in the context of circular economy. This paper presents a comparative analysis of conventional and non-conventional/innovative technologies. The analysis is structured according to circular economy principles, focusing not only on removal efficiencies but also on opportunities for resource recovery. A Life Cycle Assessment (LCA)-based approach is applied to compare the environmental impacts of different technologies. Example SMART goals for mine water management within sustainable mining operations are proposed. The advantages and limitations of each group of technologies, as well as the prospects for combined hybrid systems consistent with circular economy principles, are discussed.

Key words: mine water treatment; circular economy; metal recovery; LCA; SMART goals.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА КОНВЕНЦИОНАЛНИ И НЕКОНВЕНЦИОНАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ПРЕЧИСТВАНЕ НА МИННИ ВОДИ В КОНТЕКСТА НА КРЪГОВАТА ИКОНОМИКА: SMART ЦЕЛИ И LCA

Катерина Николова, Светлана Браткова, Анатолий Ангелов, Петя Генова, Миглена Иванова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Минните води представляват значителен екологичен риск поради високата си киселинност, концентрации на метали и сулфати, като същевременно представляват потенциален ресурс в контекста на кръговата икономика. В настоящата разработка е представен сравнителен анализ на конвенционални и неконвенционални/иновативни технологии. Анализът е структуриран съгласно принципите на кръговата икономика, като се фокусира не само върху ефективността на отстраняване, но и върху възможностите за оползотворяване на ресурсите. Прилага се подход, базиран на оценка на жизнения цикъл (LCA), за сравняване на въздействието на различните технологии върху околната среда. Предлагат се примерни SMART цели за управление на минните води в рамките на устойчиви минни операции. Обсъждат се предимствата и ограниченията на всяка група технологии, както и перспективите за комбинирани хибридни системи, съответстващи на принципите на кръговата икономика.

Ключови думи: пречистване на минни води, кръгова икономика, възстановяване на метали, LCA, SMART цели.

Introduction

Mining industry is a major consumer of water and generator of contaminated effluents. Mine water – including acid mine drainage (AMD), neutral mine drainage, tailings seepage and process water – often contains elevated concentrations of Fe, Mn, Al and a range of base and trace metals, such as Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, and As, together with high sulphate loadings (Akcil & Koldas, 2006; Nordstrom, 2011). In the case of AMD, the oxidation of sulphide minerals, primarily pyrite and pyrrhotite, leads to low pH, high redox potential, and enhanced metal mobility, often over decadal to centennial time scales (Younger et al., 2002; Johnson & Hallberg, 2005).

Historically, mine water management has been dominated by “end-of-pipe” approaches focused on meeting discharge limits, typically through lime neutralisation and metal hydroxide precipitation. Such linear solutions convert dissolved pollutants into large volumes of sludge that require long-term storage and management, while the water itself is discharged after single use.

In contrast, contemporary policy frameworks emphasise resource efficiency, climate mitigation and circular economy concepts, aiming to retain materials and water in circulation for as long as possible and to reduce primary resource extraction (Ellen MacArthur Foundation, 2015; European Commission, 2020). In a circular economy perspective, mine water is not only an environmental liability but also a potential source of:

- Metals and metalloids (Cu, Zn, Ni, Co, REEs, and others) that can be recovered and fed back into value chains (Falagán et al., 2017);
- Mineral products, e.g. gypsum, iron oxyhydroxides, and other precipitates that can be used as sorbents or construction materials after appropriate stabilisation (Lottermoser, 2011);
- Industrial wastewater with a high salt content, high metal ions, and high hardness that can be reused for processing, dust suppression, or even potable use after advanced treatment (Xu et al., 2024);
- Energy carriers, in particular in biological processes where organic substrates and sulphates can be transformed into biogas or reduced sulphur species that can be further valorised (Kaksonen & Puhakka, 2007).

Realising this potential requires a shift from purely compliance-driven treatment towards integrated systems that maximise resource recovery while minimising environmental burdens over the full life cycle. This, in turn, calls for robust decision-support tools such as Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate the environmental performance of alternative treatment trains beyond local water quality improvements (ISO 14040, 2006; Guinée et al., 2011).

In parallel with these policy developments, mining industry is under increasing pressure from investors, regulators, and civil society to demonstrate alignment with environmental, social, and governance (ESG) criteria. Water-related risks - including competition for freshwater with other users, long-term liabilities associated with tailings and mine water discharges, and the

potential for catastrophic failures - are now explicitly recognised as material financial risks. This has accelerated interest in mine water treatment and reuse options that both ensure regulatory compliance and contribute to corporate climate and resource-efficiency strategies by reducing freshwater abstraction, lowering life-cycle greenhouse gas emissions, and producing secondary products from waste streams (Matebese et al., 2024).

Despite significant progress in individual technologies and numerous case studies, there is still a lack of systematic, comparative assessments of conventional and innovative mine water treatment systems from a circular economy and life-cycle perspective. Many published studies focus on local water quality outcomes or short-term operational performance, while overlooking upstream and downstream burdens associated with reagent manufacture, energy supply, sludge management, and recovery of by-products. Moreover, decision-making in practice is often driven by capital and operating costs, with environmental performance assessed only qualitatively. Addressing this gap requires integrated analyses that combine process-level understanding of treatment technologies with LCA-based quantification of environmental impacts and explicit formulation of SMART targets that can guide the transition from linear, end-of-pipe treatment towards genuinely circular mine water management (Mancini et al., 2024).

This paper aims to:

- evaluate key conventional and innovative mine-water treatment technologies in terms of removal performance, resource and energy demand, sludge production, and resource-recovery potential;
- demonstrate how life-cycle assessment can identify environmentally preferable system configurations and expose trade-offs across impact categories;
- present exemplar SMART targets for mine-water management that are grounded in circular-economy principles and informed by existing case studies.

Mine water treatment technologies

Conventional technologies

Lime neutralisation and metal hydroxide precipitation. Lime neutralisation followed by metal hydroxide precipitation is by far the most widely applied AMD treatment technology worldwide (Johnson & Hallberg, 2005; Akcil & Koldas, 2006). Calcium hydroxide or calcium carbonate is added to raise the pH, leading to the hydrolysis and precipitation of Fe(III), Al(III), and other metals as hydroxides, while calcium sulphate (gypsum) forms at high sulphate concentrations. The process is robust, well understood, and capable of achieving regulatory compliance for many metals. However, its drawbacks are substantial. High reagent demand and embodied emissions: Lime production is energy-intensive and associated with significant CO_2 emissions (Norgate & Haque, 2010). Large volumes of low-density sludge, often containing 1–5% solids, which require thickening, dewatering, and long-term storage, with associated costs and environmental liabilities. Limited selectivity and recovery: Metals are immobilised in a mixed sludge that is usually not economically attractive for recovery, especially when derived from dilute streams. From a circular economy standpoint, pure lime neutralisation is essentially a linear risk-transfer operation: dissolved contaminants are converted into a solid waste with limited valorisation options. Nevertheless, it remains a key component in many treatment trains, especially as a polishing or safety barrier.

Coagulation–flocculation and filtration. To improve solids separation and colloidal-metal removal, coagulants ($FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$) and polymeric flocculants are commonly dosed after neutralisation, followed by sedimentation and filtration (sand/multimedia filters, filter presses) to enhance effluent clarity and reduce suspended solids; however, these steps increase chemical consumption and sludge production, with life-cycle impacts largely driven by reagent manufacture, transport and sludge handling (Aguilar-Garrido et al., 2023). Circular opportunities include substituting conventional coagulants with iron-rich industrial residues, optimising dosing, and using high-efficiency flocculants to cut chemical demand, and improving dewatering to lower sludge volumes and enable potential reuse or valorisation (Matebese et al., 2024).

Ion exchange. Ion-exchange resins can selectively remove target cations or anions (e.g., U(VI), As(V), Cr(VI), base metals) and are therefore frequently deployed as polishing steps or for recovery of high-value metals in relatively low-salinity mine water, since high ionic strength, competing ions and solids reduce efficiency in many feed streams (Lebron et al., 2023). From a circular-economy perspective, ion exchange is attractive because regeneration solutions concentrate metals and can feed hydrometallurgical recovery routes; however, resin manufacture, regeneration reagents, and spent-regenerant management contribute substantially to life-cycle impacts, so integration into broader valorisation schemes is critical to maximise benefits (Roa et al., 2024).

Membrane technologies. Membrane processes (UF, NF, RO, membrane distillation/crystallisation) are increasingly applied for mine-water polishing and reuse where high-quality permeate is required: UF removes suspended solids/colloids, while NF/RO provide high rejection of dissolved salts and metals and produce a concentrated brine suitable for downstream recovery or crystallisation. Advanced approaches, such as membrane distillation and membrane crystallisation, enable simultaneous water recovery and salt/mineral recovery from concentrate streams, improving circularity when integrated with ion-exchange or selective precipitation steps (Lebron et al., 2023; Nthunya et al., 2025). Key trade-offs include energy/carbon intensity of desalination, brine management, and potential for resource recovery from the concentrate, which must be assessed in a life-cycle framework to determine overall circularity (Gómez et al., 2024). Aligning membrane technologies with circular economy principles requires access to low-carbon electricity, integration with metal and salt recovery (e.g. crystallisation of gypsum or sodium sulphate), and design for high recovery ratios to minimise brine volumes.

Conventional biological processes. Conventional biological treatment systems (e.g. activated sludge, biofilters) are less commonly used for highly acidic and metal-rich mine water, but they play a role where organic contaminants, nitrates or cyanide are present (Johnson & Hallberg, 2005). In neutral or weakly contaminated streams, biological processes can offer low-energy polishing and partial nutrient removal. In AMD contexts, the more relevant biological processes are

sulphate-reducing and metal-precipitating systems, which are discussed below under non-conventional technologies.

Non-conventional and innovative technologies

Passive treatment systems. Passive treatment systems, such as constructed wetlands, anoxic limestone drains, and successive alkalinity-producing systems, rely on natural geochemical and biological processes to neutralise acidity, reduce sulphate, and precipitate metals, and are therefore widely used for low-cost, low-energy remediation of mine-impacted water (Daraz et al, 2023). They generally require minimal energy and routine operational input once established, although performance is sensitive to influent acidity, hydraulic loading, and media selection. Recent comparative life-cycle studies indicate that passive systems can have substantially lower global-warming potential and cumulative energy demand per cubic metre treated than fully active chemical systems, while trading off larger land requirements, lower controllability, and site-specific treatment timescales (Alam et al., 2023). From a circular-economy perspective, passive systems contribute through low operational resource demand, opportunities for co-benefits (habitat creation, landscape rehabilitation), use of local/secondary materials (e.g., organic substrates, industrial by-products) as reactive media, and by enabling downstream recovery routes when coupled with hybrid trains — but long-term media stability, metal fate in sediments, and risks from media clogging remain critical design considerations.

Permeable reactive barriers (PRBs). PRBs are in-situ systems installed in the path of contaminated groundwater flows filled with reactive media, such as elemental iron, limestone, organic matter, or industrial residues (Sakr et al., 2023). They promote processes such as sulphate reduction, redox transformation, and sorption. An emerging trend is the use of industrial by-products (e.g. steel slags, red mud) as PRB media, effectively turning waste streams into remediation resources. This directly supports circular economy objectives by coupling remediation with waste valorisation. Long-term performance, permeability maintenance, and stability of immobilised contaminants remain critical design considerations (Salih et al., 2024).

Electrochemical processes. Electrochemical (EC) processes, such as electrocoagulation and electrooxidation, generate coagulants or oxidants in situ and can efficiently remove metals and other contaminants; recent bench- and pilot-scale studies report high removal efficiencies for Ni, Cr, Fe and other ions and show potential reductions in sludge volume compared with chemical coagulation in specific cases. Their compatibility with circular-economy principles depends on the carbon intensity of the electricity supply, the ability to combine electrochemical steps with downstream recovery (e.g., metal-rich flocs suitable for recovery), and the durability/recyclability of electrodes; as power decarbonisation progresses, the relative life-cycle performance of EC technologies is expected to improve (Mao et al., 2023).

Adsorption using secondary raw materials and bio-based sorbents. Adsorption is widely used for polishing and targeted contaminant removal in mine effluents; there is growing interest in low-cost sorbents derived from industrial and agricultural residues (e.g. biochar, fly ash, steel slags, red mud, and other biosorbents) because they can combine lower material cost and environmental burden with waste-valorisation opportunities (Gallego-Ramírez et al., 2023). These residue-derived adsorbents can reduce dependence on virgin activated carbons, enable co-valorisation of another industry's waste stream, and, where suitably stabilised, permit beneficial reuse of spent sorbents (for example as components in construction materials), but each pathway requires demonstration of long-term stability and acceptable leachability of immobilised metals (Xu et al., 2022). Crucially, LCA-supported assessments (and where possible integrated LCA–LCC studies) are needed to quantify lifecycle impacts and avoid burden-shifting from water to soil or landfill compartments when sorbents are produced, applied, and disposed or reused (Chen et al., 2021).

Biotechnologies for metal recovery and valorisation. Bioprocesses based on sulphate-reducing bacteria and other functional guilds can convert sulphate to sulphide, precipitating dissolved metals as metal sulphides that are more concentrated and suitable for hydrometallurgical recovery (Kaksonen & Puhakka, 2007). Other microbial processes, such as biosorption and bioaccumulation, can further contribute to metal uptake. Falagán et al. (2017) review several pilot-scale systems demonstrating high removal efficiencies for Cu, Zn, and other metals from mine water, with metal-rich sludge subsequently processed to recover saleable products. These biotechnologies are particularly aligned with circular economy goals as they convert a dispersed pollution problem into a concentrated secondary resource, operate at relatively low temperatures and often moderate energy inputs, and can be integrated with passive or semi-passive systems using locally available organic substrates.

Integrated valorisation and near-zero liquid discharge (ZLD) scheme. The most advanced circular configurations combine several of the above technologies into integrated flowsheets that aim to maximise internal water recycling, recover metals and mineral products, minimise or eliminate liquid discharges (near-ZLD or ZLD), or reduce life-cycle impacts per unit of treated water. Typical elements include pre-neutralisation (passive or active), selective metal recovery (biological or chemical), membrane concentration, and crystallisation/evaporation for salt recovery. LCA studies of ZLD systems show that, while energy requirements are high, integrating resource recovery and using low-carbon energy sources can lead to net environmental benefits compared with linear discharge-oriented treatment (Xu et al., 2024).

LCA of Mine Water Treatment Technologies

Methodological framework

LCA is standardised by ISO 14040/14044 and comprises four main stages: Goal and scope definition; Life cycle inventory (LCI); Life cycle impact assessment (LCIA); Interpretation of results (ISO 14040, 2006; Guinée et al., 2011). For mine water treatment systems, the functional unit is often defined as “treatment of 1 m³ of mine water to meet regulatory discharge limits” or “recovery of 1 kg of metal at a given effluent quality”. The system boundary (“cradle-to-grave” or “cradle-to-gate”) typically includes:

1) Production and transport of reagents (lime, coagulants, adsorbents, ion exchange resins);
2) Consumption of electricity and fuels;
3) Construction, operation and maintenance of infrastructure (reactors, ponds, membranes, pipelines);
4) Treatment and/or disposal of sludge, brine, and other waste streams;
5) Potential credits for recovered products (metals, salts, treated water, energy).

Basically considered impact categories include global warming potential (GWP), eutrophication, acidification, resource use (fossil fuels, metals and minerals), and human and ecotoxicity (Hauschild et al., 2013). The choice of impact categories and assessment methods should reflect the decision context and key environmental concerns.

Table 1. *Management goals of mine wastewater*
(S – Specific, M – Measurable, A – Achievable, R – Relevant, TB – Time-Bound)

Goal 1. Reduction of sulphates and electrical conductivity	
S	Reduce sulphate concentration in mine water discharge by 40% and electrical conductivity (EC) by 30%, hybrid treatment
M	Monthly measurements for the prior 12 months, Interim checks with corrective actions if needed
A	Low-cost secondary materials can neutralise acidity, immobilise contaminants, and reduce EC and metal concentrations, sulphidogenic bioreactors can achieve sulphate reductions (43–87% and higher sulphate-reduction rates, realistic conditions) (Virpiranta et al., 2022; Aguilar-Garrido et al., 2023).
R	Aligns with ESG stewardship, reduces tailings-related liabilities, opportunities for metal recovery and sludge valorisation.
TB	Within 3 years
Goal 2. Process water recycling	
S	Increase the share of recycled process water in the PP
M	At least 60% of total water demand to be covered by internally recycled streams
A	Industrial-scale plants in copper and iron ore mining have achieved >70% internal water recycling by combining tailings thickening/filtration with UF + NF/RO, thereby reducing freshwater abstraction and discharge (Xu et al., 2024)
R	Reduces freshwater intake and operating costs, improves water security
TB	Within 5 years
Goal 3. Metal recovery	
S	Implement a sulphate reducing bioreactor for Cu and Zn recovery as metal sulphides from the main AMD stream
M	Recover at least 30% of dissolved Cu and Zn (kg/year)
A	Pilot and semi-industrial sulphate reducing systems have achieved >90% removal of dissolved metals (Fe, Cu, Zn, Ni) with generation of concentrated metal sulphide sludges suitable for downstream metal extraction (Falagán et al., 2017)
R	Decreases the load on polishing steps and creates secondary metal concentrates
TB	Industrial implementation within 3 years after successful pilot operation
Goal 4. Reduction of life cycle carbon footprint of treatment	
S	Reduce the GWP per 1 m³ of treated mine water compared with a baseline lime only neutralisation scheme
M	≥ 25% reduction in kg CO_2 eq/m³ (LCA based)
A	LCA studies show that partially substituting lime with alkaline industrial residues (fly ash, slags, red mud), and combining passive units with energy optimised active steps, can significantly lower life cycle GHG emissions while maintaining treatment performance (Lottermoser, 2017; Xu et al., 2024)
R	Supports corporate decarbonisation and regulatory compliance
TB	Within 7 years
Goal 5. Sustainable sludge management and valorisation	
S	Reduce the amount of sludge sent to landfill and increase the share of sludge valorised as construction or backfilling material
M	At least 50% (dry mass) of sludge to be reused
A	Mine/metal bearing sludge, when stabilised/solidified with cementitious and pozzolanic binders, can be safely used as backfill or low-grade construction products with controlled metal leaching and reduced overall environmental impacts (Lottermoser, 2017)
R	Lowers disposal needs and long-term environmental risks
TB	Within 5 years
Goal 6. Transparency and stakeholder engagement	
S	Implement a system for regular LCA based and circularity-oriented reporting on mine water management
M	Annual public report with KPIs: % recycled water, kg recovered metals, t CO_2 eq avoided vs. baseline, % sludge valorised
A	An increasing number of mining companies publish GRI based sustainability reports complemented with LCA/LCC indicators; collaborations with universities, data collection and analysis, improve trust among regulators and communities (Norgate & Haque, 2010; EC, 2020)
R	Strengthens the social licence to operate and meets investor/ESG expectations
TB	First public report within 2 years, then annually

Comparison of conventional and non-conventional technologies using LCA

Literature indicates several consistent patterns. Lime neutralisation with calcium hydroxide often dominates GWP and resource use due to the energy-intensive production of lime and the management of large volumes of sludge (Norgate & Haque, 2010). Membrane systems (NF/RO) have relatively high energy demand, but their lower chemical consumption and ability to enable high water recovery and metal concentration can result in comparable or even lower life-cycle impacts in scenarios that include resource recovery and internal water reuse (Xu et al., 2024).

Passive treatment systems generally show the lowest energy use and GWP per m³ of treated AMD, but are constrained by hydraulic capacity, seasonal variability and land requirements. Biotechnologies for metal recovery can deliver net environmental benefits through “avoided burden” effects, where secondary metals produced from mine water displace primary production and its associated impacts (Kaksonen & Puhakka, 2007; Norgate & Haque, 2010; Falagán et al., 2017).

The selection of the “best” technology is highly context-dependent and influenced by different factors (environmental, technological, economical, etc.) - mine water composition and flow rate; local energy mix (coal-based vs. low-carbon systems); market demand and logistics for recovered products; regulatory requirements, risk tolerance and social acceptance. LCA thus serves not to prescribe a single universal solution, but to reveal trade-offs and identify context-specific optima.

LCA has a crucial role in designing circular mine water treatment systems. LCA provides a quantitative basis for:

- Selecting reagents and materials with lower embodied impacts (e.g. partial substitution of lime with alkaline industrial residues);
- Assessing the benefits of using secondary raw materials (slag, fly ash, red mud, bio-based sorbents) as reactive media or adsorbents;
- Comparing “treatment-only” scenarios with “treatment + resource recovery” scenarios, including metal and salt recovery and high-level water reuse;
- Identifying “hotspots” (e.g. lime production, electricity use in membrane stages, sludge disposal) that should be prioritised for optimisation or substitution.

SMART goals for mine water management within the scope of circular economy

Integrating LCA into the early design phases of mine-water treatment schemes enables selection of technologies that both meet water-quality standards and minimise life-cycle impacts while maximising recovered value (Alam et al., 2023; Mancini et al., 2024). In a circular-economy context, LCA-guided design supports the shift from linear, end-of-pipe solutions to integrated mine-water management where treatment, resource recovery, and long-term environmental performance are optimised jointly rather than in isolation. The implementation of circular-economy concepts and LCA in mining operations requires formalising strategic and operational objectives; the SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound) framework is useful for translating broad visions into actionable plans. Table 1 presents example SMART goals for a typical mining operation.

Circular economy perspective

From a circular economy standpoint, the performance of mine water treatment technologies should be assessed not only in terms of contaminant removal and compliance, but also regarding resource recovery potential, life-cycle impacts, and long-term liabilities (Aguilar-Garrido et al., 2023). Conventional technologies, such as lime neutralisation, coagulation-flocculation, filtration, and membrane processes, remain an essential foundation for reliable compliance with water quality standards in mining. However, in their traditional linear form, they contribute only modestly to circular economy objectives, as they entail high consumption of primary reagents and energy and generate large volumes of low-value sludge that require long-term management. In contrast, non-conventional and innovative approaches - including passive treatment systems, permeable reactive barriers, the use of secondary raw materials as reactive media, biotechnologies for metal recovery, and integrated valorisation or near-ZLD schemes - show potential to transform mine water from a waste stream into a secondary resource for metals, mineral products, and reusable water, particularly when combined into appropriately designed hybrid treatment chains (Mancini et al., 2024).

LCA is a key tool for objectively comparing such options, identifying environmental hotspots and revealing trade-offs between local water quality improvements and upstream or downstream burdens associated with reagent production, energy use, and sludge management. LCA-based design enables the selection of mine water treatment configurations that both ensure regulatory compliance and minimise life-cycle impacts, while supporting resource recovery. Within this framework, the formulation of SMART goals is crucial for practical implementation of circular strategies in mining, translating sustainability aspirations into specific, measurable, and time-bound targets for water recycling, metal recovery, carbon footprint reduction, sludge valorisation, and transparent reporting. Future work should focus on scaling up and de-risking biotechnologies for metal recovery from mine water, improving the long-term stability and safety of reused sludge and reactive media, integrating LCA with life cycle costing and risk assessment to support investment decisions, and aligning regulatory and market frameworks, so that they actively incentivise circular mine water management and the use of secondary raw materials in the mining sector (Araya et al., 2021; Aguilar-Garrido et al., 2023;).

In practice, the most promising solutions from a circular economy perspective are hybrid treatment trains, which: combine passive and biotechnological stages for pre-treatment and metal recovery; integrate membrane or ion-exchange steps for polishing and high-level water recycling; employ industrial by-products as reagents or sorbents where environmentally and technically appropriate; and are designed and optimised using LCA to minimise overall life-cycle impacts (GWP, resource use, toxicity) while maximising recovered value (metals, salts, reusable water) (Mancini et al., 2024; Matebese et al., 2024). Thus, the circularity of mine water management depends less on the choice of a single “best” technology and more on the intelligent integration of complementary processes into site-specific, LCA-optimised systems.

Conclusions

Conventional treatments are essential for meeting mine water quality standards but, in their traditional linear form, they use large amounts of primary reagents and energy and produce bulky low-value sludge that burdens long-term management. By contrast, innovative treatment can shift mine water from waste to resource (metals, minerals, reusable water) when combined into well-designed treatment trains. Life Cycle Assessment provides an objective basis to compare these pathways, pinpoint environmental hotspots, and expose trade-offs between on-site water benefits and upstream/downstream impacts (reagent manufacture, energy, sludge handling). LCA-driven design allows the selection of configurations that meet regulations while minimising lifecycle impacts and enabling resource recovery. SMART goals are then needed to translate circular-economy aims into concrete goals for water reuse, metal recovery, carbon reduction, sludge valorisation, and transparent reporting. Future research should concentrate on scaling and de-risking biotechnological routes for metal recovery from mine water, enhancing the long-term stability and safety of reused sludge and reactive media, and coupling LCA with life-cycle costing and risk assessment to inform investment decisions. Concurrently, regulatory and market instruments must be reformed to create explicit incentives for circular mine-water management and secondary-material utilisation, integrating environmental protection, resource efficiency, and economic value creation.

References

Aguilar-Garrido, A., Paniagua-López, M., Sierra-Aragón, M. et al. (2023). Remediation potential of mining, agro-industrial, and urban wastes against acid mine drainage, *Sci Rep 13*, 12120.

Akcil, A., Koldas, S. (2025). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies, *Journal of Cleaner Production*, *14* (12–13), 1139-1145.

Alam, M. K., Islam, M. A. S., Saeed, T., Rahman, S. M., & Majed, N. (2023). Life Cycle Analysis of Lab-Scale Constructed Wetlands for the Treatment of Industrial Wastewater and Landfill Leachate from Municipal Solid Waste: A Comparative Assessment. *Water*, *15*(5), 909.

Araya, N., Ramírez, Y., Cisternas, L. A., Kraslawski, A. (2021) Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management, *Appl. Energy*, *303*, 117626.

Chen, J., Deng, S., Jia, W., Li, X., & Chang, J. (2021). Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes. *Bioresource technology*, *331*, 125061.

Daraz, U., Li, Y., Ahmad, I., Iqbal, R., Ditta, A. (2023). Remediation technologies for acid mine drainage: Recent trends and future perspectives. *Chemosphere*, *311*(2), 137089.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition.

European Commission. (2020). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability (COM(2020) 474).

Falagán, C., Grail, B. M., Johnson, D. B. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings, *Min Eng*, *106*, 71-78.

Gallego-Ramírez, C., Chica, E., & Rubio-Clemente, A. (2023). Life cycle assessment of raw and Fe-modified biochars: contributing to circular economy. *Materials*, *16*(17), 6059.

Gómez, J., Giraldo, H., Piaggio, G., et al. (2024). Recovery of copper sulphate from acidic mine waters by membrane crystallisation. *Journal of Membrane Science*, *700*, 122707.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology, 45*(1), 90–96.

Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J. et al. (2013). Identifying best existing practice for characterisation modelling in life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess, 18*, 683–697.

ISO 14040. (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organisation for Standardisation.

Johnson, D. B., Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review, *Science of The Total Environment*, *338* (1–2), 3-14.

Kaksonen, A. H., Puhakka, J. (2007). Sulphate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals, *Eng. Life Sci.*, *7* (2007), 541-564.

Lebron, Y. A. R., Moreira, V. R., de Souza Santos, L. V., Santos Amaral, M. C. (2023). Membrane distillation and ion exchange combined process for mining wastewater treatment, water reuse, and byproducts recovery, *Chemical Engineering Journal*, *466*.

Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, Reuse, and Rehabilitation of Mine Wastes, *Elements*, *7*(6), 405–410.

Mancini, S., Casale, M., Tazzini, A., & Dino, G. A. (2024). Use and Recovery of Extractive Waste and Tailings for Sustainable Raw Materials Supply. *Mining*, *4*(1), 149-167.

Mao, Y., Zhao, Y., & Cotterill, S. (2023). Examining Current and Future Applications of Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, *15*(8), 1455.

Matebese, F., Mosai, A. K., Tutu, H., Tshentu, Z. R. (2024). Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review, *Heliyon*, *10* (3).

Nordstrom, D. (2011). Mine Water: Acidic to Circmneutral. *Elements*.

Norgate, T., Haque, N. (2010) Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations, *Journal of Cleaner Production*, *18* (3).

Nthunya, L.N., Ali, A., Richards, H. et al. (2025). Innovative dual-purpose remediation of acid mine drainage and resource recovery through membrane distillation crystallisation. *npj Clean Water 8*, 61.

Roa, A., López, J., Cortina, J. L. (2024). Recovery of Rare Earth Elements from Acidic Mine Waters: A circular treatment scheme utilising selective precipitation and ion exchange, *Sep Purif Technol*, *338*.

Sakr, M., El Agamawi, H., Klammler, H., Mohamed M. Mohamed, M. M. (2023). A review on the use of permeable reactive barriers as an effective technique for groundwater remediation, *Groundwater Sustain. Dev., 21*, 100914.

Salih, W. T., Xiao, Z., & Dong, X. (2024). Research Enhancing Acidic Mine Wastewater Purification: Innovations in Red Mud–Loess. *Materials*, *17*(9), 2050.

Virpiranta, H., Sotaniemi, V.-H., Leiviskä, T., Taskila, S., Rämö, J., Johnson, D. B., Juha Tanskanen, J. (2022). Continuous removal of sulphate and metals from acidic mining-impacted

waters at low temperature using a sulphate-reducing bacterial consortium, *Chem Eng Journal*, *427*, 132050.

Xu, F., Zhao, S., Li, B., Li, H., Ling, Z., Zhang, G., & Liu, M. (2024). Current Status of Zero Liquid Discharge Technology for Desulphurization Wastewater. *Water*, *16*(6), 900.

Xu, W., Yang, H., Mao, Q., Luo, L., & Deng, Y. (2022). Removal of heavy metals from acid mine drainage by red mud–based geopolymer pervious concrete: batch and long-term column studies. *Polymers*, *14*(24), 5355.

Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic Publishers.

FLOATING BAFFLE FOR ENHANCED SEDIMENTATION OF SUSPENDED SOLIDS IN WATER BODIES AND OPPORTUNITIES FOR CIRCULAR USE OF RECLAIMED WATER

Reni Pantcheva[1], Raicho Donchev[2]

[1]Sofia University “St. Kliment Ohridski", 1504 Sofia; E-mail: reni@feb.uni-sofia.bg
[2]Ecoteh Global LTD, 1324 Sofia; E-mail: raicho_donchev@abv.bg

ABSTRACT. Water resource management and wastewater recovery are becoming increasingly important for industry, agriculture, and domestic use, particularly in view of water scarcity and evolving environmental regulations. The present study investigates the application of a floating baffle that enhances natural sedimentation of suspended particulate matter in water bodies, thus promoting water clarification without the need for energy, coagulants or flocculants. The theoretical framework, research on preceding scientific literature, a laboratory experiment, and the practical implementation of the proposed model indicate that such a baffle effectively prevents the direct linear propagation of suspended solids within a reservoir, thereby creating stable hydraulic conditions and sufficient time dilation for particles to settle under the direct influence of gravity. The energy independence, economic feasibility, and resource efficiency of this technological solution facilitate its easy and affordable implementation and provide grounds for a successful circular use of reclaimed wastewater. This in turn, reduces the environmental footprint of human activities and alleviates the pressure on limited freshwater resources.

Key words: reclaimed water, suspended particulate matter, gravitational sedimentation, floating baffle, circular economy.

ПЛАВАЩА ПРЕГРАДА ЗА ПОДОБРЕНО УТАЯВАНЕ НА СУСПЕНДИРАНИ ТВЪРДИ ЧАСТИЦИ ВЪВ ВОДОЕМИ И ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА КРЪГОВО ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ НА ОБОРОТНИ ВОДИ

Рени Панчева[1], Райчо Дончев[2]
[1]Софийски университет „Св. Климент Охридски“, 1504 София
[2]„Екотех Глобал“ ЕООД, 1324 София

РЕЗЮМЕ. Управлението на водните ресурси и кръговото използване на оборотна вода придобиват все по-голямо значение за промишлеността, селското стопанство и бита особено в условия на воден дефицит и засилени екологични изисквания. В настоящата разработка е изследвано приложението на плаваща преграда, която подпомага естественото утаяване на фини твърди частици във водоеми и избистрянето на водата в тях без необходимост от влагане на енергия, коагуланти и флокуланти. Представените теоретични постановки, предходни научни изследвания, лабораторният опит и прилагането на този полезен модел в практиката сочат, че подобна преграда ефективно възпрепятства праволинейното разпространение на суспензията във водоемите, като по този начин осигурява стабилна водна среда и достатъчно време, в което суспендираните частици да се утаят под действие на гравитационните сили. Енергийната независимост, както и икономическата и ресурсната ефективност на предложеното решение благоприятстват неговото лесно и широкодостъпно приложение и създават предпоставка за успешното кръгово оползотворяване на възстановени отпадни води. Това на свой ред намалява екологичния отпечатък от човешката дейност и натиска върху ограничените водни ресурси.

Ключови думи: оборотна вода, суспендирани частици, гравитационно утаяване, плаваща преграда, кръгова икономика.

Въведение

Промишлените процеси, селското стопанство и битовото водоснабдяване разчитат на надеждното осигуряване на избистрена и годна за последваща употреба вода от естествени или изкуствени водоеми. Засилващият се воден дефицит в резултат от климатичните промени и произтичащите от тях дълги периоди на засушаване обаче поставят на преден план самата наличност на водния ресурс наред с неговите характеристики. Въпросът, пред който са изправени науката, икономиката и хората, вече не е единствено какво ще е качеството на водата, а дали вода изобщо ще има. В светлината на тези предизвикателства и затегнатите екологични изисквания, устойчивостта и кръговостта залягат все по-здраво в управлението на водните ресурси.

От гледна точка на устойчивото развитие кръговото използване на оборотна вода в промишлените процеси се превръща в ключова стъпка за намаляване натиска върху естествените водоизточници, повишаване на ресурсната производителност и ограничаване на изпуснатите в природата отпадни води.

Пречистването на промишлени води започва с първично избистряне, за да се намали количеството суспендирани твърди частици в съдържанието. Процесът залага на естествения утаителен потенциал на водоемите, често в съчетание с добавяне на коагуланти и флокуланти. Този потенциал варира в зависимост от обема на водоизточника наред с други фактори, но на практика промените в утаителната ефективност се влияят най-пряко от пътя и начина на движение на водния поток.

В този контекст настоящата разработка изследва действието на съоръжение, което има свойството да трансформира хидродинамиката на водоема, като удължи пътя на суспензията и насърчи условията за естествено утаяване под действие на гравитационните сили. Ефективността на съоръжението е доказана както в лабораторни, така и в реални условия.

Разгледаният модел предлага енергийно независима, икономически ефективна и екологично щадяща алтернатива на химическите методи за избистряне на оборотна вода, като създава предпоставки за нейното ефективно кръгово използване в съответствие с принципите на екологичната устойчивост.

Литературен обзор

Важен аспект от третирането на отпадни води е премахването на твърдите материали от тях. Един от най-широко използваните конвенционални методи за това е утаяването. Това е физически процес на третиране на

водата, при който твърдите частици падат на дъното на водния басейн под действие на гравитацията (К., 2024). Избистрянето вследствие на утаяване се е използвало на практика още от праисторически времена при изграждането на водни съоръжения, особено при пречистването на вода за питейни нужди (Shammas et al., 2005). Естественото утаяване често бива подпомогнато с коагулация и флокулация, за да се слепят и агрегират до по-големи размери най-фините частици в суспензията (Banaś and Hilger, 2024). В резултат на коагулацията, флокулацията и утаяването се получава избистряне на третираната вода.

Съвременните инженерно-технически решения за избистряне на замърсена вода обаче разкриват, че утаяването на фини суспендирани частици в язовири и утаителни басейни остава съществено предизвикателство. Основният фактор, определящ ефективността на гравитационното утаяване, е времето на престой на водата в даден басейн в състояние на относителен покой. Въздействие върху ефективността на естественото избистряне оказват и редица фактори като краткият път на протичане, повърхностните течения, вятърът, както и колебанията в дебита през различните части на денонощието или годината (Juarev et al., 2022).

За да се създадат относително стабилни хидродинамични условия, гравитационното утаяване на частиците следва да доминира над хоризонталния им пренос във водния поток. Теорията на Стокс описва терминалната скорост на утаяване като функция от размера, плътността на частицата и физичните свойства на флуида. Прилагането на закона предполага, че частиците са гладки и сферични, движат се в ламинарен режим в хомогенна течност и че числото на Рейнолдс за частицата е малко ($Re_p < 1$) (Moran, 2018). Така за терминалната скорост се получава, че:

$$\omega = \frac{2(\rho_p - \rho_f)gr^2}{9\mu} \quad (1)$$

където ω е терминалната скорост на утаяване, ρ е плътността съответно на частицата (p) и течността (f), g е гравитационното ускорение, r е радиусът на частицата, μ е динамичният вискозитет на течността.

Тъй като за много малки частици скоростта на утаяване клони към нула (Merkus, 2009), при определени хидродинамични условия времето на престой се оказва недостатъчно. Така, въпреки че големите размери на язовири, езера и хвостохранилища благоприятстват естествения утаителен потенциал, фините суспендирани частици често се задържат във водната маса. Това обикновено налага нуждата от използване на коагуланти и флокуланти или разработването на решения, които подпомагат естествените процеси без допълнителна енергийна или химическа намеса.

Едни от най-често използваните пасивни съоръжения за механично избистряне в естествени водоеми са различните видове утаители. В зависимост от структурните си особености и посоката на протичане на водата те могат да бъдат хоризонтални, вертикални, радиални, тръбни и ламелни (Екология и инфраструктура, 2015). Вместо да влияят директно върху терминалната скорост на утаяване на частиците, тези съоръжения целят намаляване на скоростта на движение на водата, ограничаване на турбулентността, удължаване на хидравличния път и увеличаване на времето на престой на суспензията.

По-доброто управление на суспендираните твърди частици във водоемите е свързано не само с пречистването на отпадни води и повишаване на ефективността на различните производствени процеси, но и с по-широката рамка за устойчивото развитие и кръгова икономика. В следствие на ръста на населението, селскостопанската дейност, индустриализацията и урбанизацията използването на прясна вода се е увеличило шесткратно от 1900 г. насам. Най-голям дял се потребява от селското стопанство (около 70%), следвано от промишлеността (около 20%), а водата за битови нужди е едва около 10% от общото потребление (Ritchie and Roser, 2024). Така водният отпечатък продължава да се увеличава успоредно с проблеми като недостиг на вода, водни кризи и замърсяване на водоизточниците. Поради тази причина концепции като кръговата икономика, прилагащи устойчиви практики в управлението на ресурси и отпадъци, са от особено значение за жизненоважни ресурси, какъвто е водата. В контекста на устойчивото развитие е необходимо да бъдат предприети действия по отношение на водния сектор, които още при източника да са насочени към намаляване на употребата на водни ресурси и образуването на отпадни води, прилагане на ефективни технологии за отстраняване на замърсителите, повторно използване на оборотна вода в производствените процеси, рециклиране на вода и нейното възстановяване за питейни нужди, както и извличане на материали и енергия от отпадните води (Smol et al., 2020).

Планът за действие за кръгова икономика (Европейска комисия, 2020) залага нов Регламент за повторното използване на водата (Регламент (ЕС) 2020/741, 2020). Той се прилага при всяко повторно използване на пречистени градски води за напояване в селското стопанство. В документа са определени минималните изисквания за качеството на водата, мониторинга и управлението на риска, така че да се гарантира безопасността на процеса. Приоритет на регламента е постигането на целите за устойчиво управление на водите и канализацията и устойчиво потребление и производство.

Макар фокусът на нормативна рамка в случая да попада върху напояването, тя би могла да служи като ориентир при прилагане на подобни практики и в промишлени системи. Така рамката може да се използва за насърчаване на кръговите решения в други сектори, за да намали натиска върху ресурсите от прясна вода, да понижи оперативните разходи на предприятията и да повиши устойчивостта на веригите за доставка.

Естествените и пасивните технологии за утаяване имат особено важна роля в контекста на устойчивото използване на оборотна вода в промишлени процеси, тъй като те не изискват химически агенти или външна енергия. Това ги прави важен инструмент за повишаване на ресурсната ефективност и намаляване на въглеродния отпечатък на водния сектор.

Съоръжение за утаяване на фини частици от суспензии

В научната литература редица автори изследват ефективността на алтернативни конструктивни решения за

подобряване на гравитационното утаяване, включително поставянето на прегради, които възпрепятстват праволинейното движение на водния поток и удължават времето на престой на суспензията (Shahrokhi et al., 2012; Razmi et al., 2013; Liu et al., 2016; Hassanien et al., 2018; Bruno et al., 2025). В такъв експеримент Al-Mafraji и Al-Mussawy (2021) използват фиксирани горни и долни прегради, за да въздействат върху хидродинамиката във водния басейн чрез насочване и възпрепятстване на директното движение на мътната вода. Това подпомага гравитационното утаяване, като удължава пътя на потока и намалява турбуленцията в зоната за утаяване.

Настоящата разработка изследва приложението на пасивна водна преграда за увеличаване на ефективното време на престой и елиминиране на преките хидравлични връзки в естествен или изкуствен водоем. Важно е да се отбележи, че разглежданото съоръжение е насочено единствено към третирането на механични замърсители, т. е. неразтворими частици, които причиняват помътняване на водата. Химичното, биологичното или радиоактивното замърсяване са обект на други процеси по пречистване.

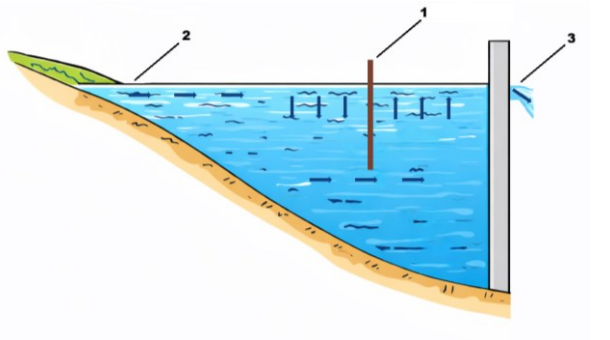
Действие на съоръжението

Съоръжението за утаяване на фини частици от суспензии може да се прилага за избистряне на води в различни водоеми като езера, язовири, водни резервоари, хвостохранилища и др.

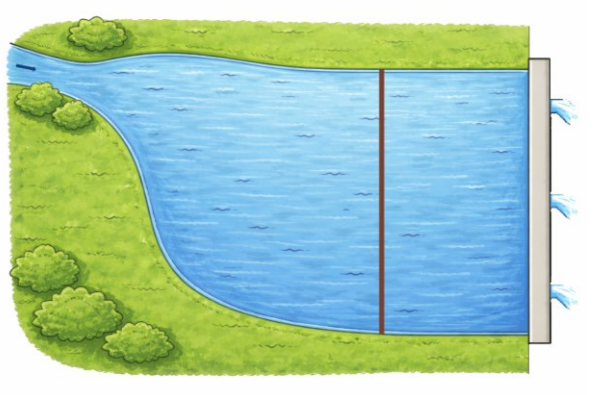
Работата на съоръжението е пряко свързана с присъщите на този тип водоеми характеристики, а именно тяхната голяма дълбочина, дължина и ширина, както и времето, изминаващо от постъпването на суспензията (мътната вода) до нейното оттичане през преливника. Естественото забавяне, което дава възможност на фините частици да се утаят под действие на гравитацията, обаче не е достатъчно, за да осигури пълно утаяване и избистряне. Както вече бе споменато, на практика престоят на суспензията във водното тяло в състояние на относителен покой е решаващо за степента на нейното утаяване, но успоредно с гравитационните сили, повърхностният слой е обект на постоянно размътване от вятъра и повърхностните течения.

Разглежданото съоръжение представлява плаваща преграда, монтирана напречно на посоката на движение на входящата суспензия в даден водоем (фиг. 1 и фиг. 2). Преградата трябва да се подава над повърхността, а нейният долен край трябва да е потопен на определена дълбочина без се да допира до дъното (1). По този начин водоемът бива разделен на две части, които се явяват скачени съдове, свързани под преградата. Самата преграда играе ролята на бариера между постъпващата неизбистрена вода (2) и мястото на оттичане през преливника или водната кула (3). Удължаването на пътя на неизбистрената суспензия дава достатъчно време на фините твърди частици да паднат на дъното.

Поради факта, че водното налягане от двете страни на преградата е еднакво, не е необходимо тя да е солидна, а може да бъде направена от брезент, пластмаса или друг вид лек и гъвкав материал. Тя също така може да бъде плаваща или висяща от въже, поддържано от плаващи платформи или поплавъци.



Фиг. 1. Вертикален разрез на язовир с монтирана напречно преграда.



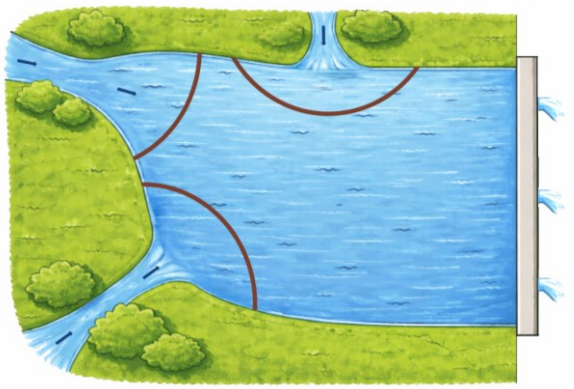
Фиг. 2. Изглед отгоре на язовир с монтирана напречно преграда

Механизмът на действие на съоръжението включва няколко етапа. В началото мътната вода навлиза в първата част на водоема. След това постъпилата суспензия среща преградата и потъва надолу, като избутва водата от долните слоеве под преградата към втората част на водоема. Накрая преминалата към втората част на водоема вода изтласква нагоре вече избистрената вода през преливника на язовирната стена или водната кула.

При тези последователни движения (надолу, настрани, нагоре) мътната вода изминава по-дълъг път, а тежките частици имат достатъчно време да се утаят на дъното и така остават в първата част на водоема. Дълбочината на потапяне на преградата е основен механизъм за регулиране на времето на движение на водата през различните етапи. Тази дълбочина се определя индивидуално за всеки водоем в зависимост от неговата дълбочина, ширина и дължина, както и от вида на фините твърди частици и специфичната им терминална скорост на утаяване, според която времето за гравитационно утаяване може да варира в широки граници.

Допълнително предимство на съоръжението е, че избистрената вода, която изтича, е по-хладна през лятото и по-топла през зимата, тъй като идва от по-голяма дълбочина. Фактът, че преградата е плаваща също така позволява тя да се движи с покачването или спадането на нивото на водоема.

В зависимост от специфичните условия във водоема (например брой места, от които постъпва входящата суспензия) могат да бъдат монтирани повече от една преграда на различни позиции и потопени на различни дълбочини (фиг. 3).

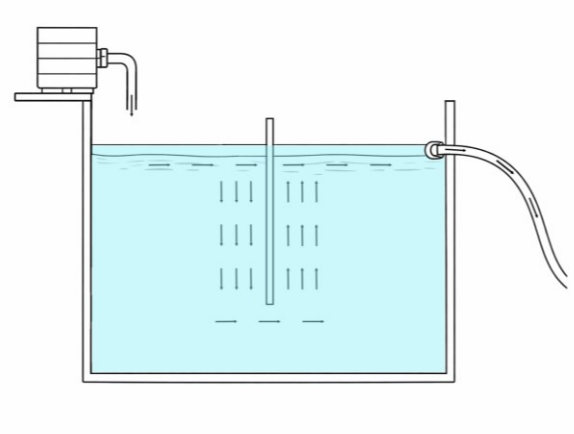


Фиг. 3. Изглед отгоре на язовир с монтирани няколко прегради.

Идеята за съоръжението е подадена в Патентното ведомство на Република България и е регистрирана като „Полезен модел“ под наименование „Съоръжение за утаяване на фини частици от суспензии“, с Рег. № 2998 U1 от 31.05.2017 г. (Дончев и съавт., 2017).

Експериментална проверка на полезния модел

С цел проверка на ефективността на полезния модел е създаден прототип, представляващ резервоар с обем 100 л и подвижна преграда, изработени от плексиглас (фиг. 4). За целите на експеримента резервоарът е напълнен с чиста вода и към него е монтирано захранващо устройство, съответстващо на захранваща река в язовир, от което се подава водата. В резервоара е направен отвор за изтичане, съответстващ на отвора през водна кула, от който се отвежда избистрената вода. За да се проследи движението на входящата вода през резервоара, е използван оцветяващ агент, съответстващ на постъпилата суспензия. Проведени са два опита с оцветяване на водата.



Фиг. 4. Илюстрация на експерименталното съоръжение.

1. Опит без поставена преграда. В захранващото устройство е налята оцветената вода и е засечено времето, за което тя достига до отвора за изтичане. Наблюдаваното движение на оцветената вода е основно по повърхността на водната маса. Времето за достигане на оцветената вода до отвора за изтичане е 1 мин. В следващите 5 мин оцветената вода започва постепенно да се смесва с останалата вода в резервоара.

2. Опит с поставена преграда. За втория опит е поставена преграда по средата на резервоара, потопена до около 2/3 от неговата дълбочина. Отново е засечено времето, за което оцветената вода достига до отвора за изтичане. Поради наличието на преграда оцветената течност се среща с нея и започва да се движи надолу, като след 5 мин изпълва първата част на резервоара. След това оцветената течност започва да се движи хоризонтално под преградата, прониквайки слабо във втората част на резервоара. Дори при по-интензивно движение на слоевете в първата част на резервоара, не се наблюдава динамика във втората му част. На осмата минута оцветената течност започва да се издига във втората част на резервоара (след преградата). Движението е ламинарно и бавно (около 2 см в минута). От петнадесетата до двадесетата минута оцветяването във втората част на резервоара продължава много бавно. На двадесет и осмата минута оцветената вода почти е достигнала до повърхността на втората част на резервоара, а на тридесетата минута вече започва да изтича през отвора.

Приложение на полезния модел в практиката

През месец декември 2020 г. гореописаното съоръжение е изградено в хвостохранилище „Челопечене“, което служи като езеро за утаяване на оборотната вода към обогатителна фабрика „Барит Майнинг“. На третия ден от поставянето на преградата вече се наблюдава ясно разграничение в оцветяването и бистротата на водната маса преди плаващата бариера и след нея, както личи от фиг. 5.

Фиг. 5. Снимка на монтираното на хвостохранилище „Челопечене“ съоръжение.

Монтираната плаваща преграда е направена от армиран найлон и се поддържа от въже. На всеки метър дължина от въжето са привързани по три двулитрови празни пластмасови бутилки, които играят ролята на поплавъци.

Таблица 1 представя данни за техническите характеристики на типа водоем (хвостохранилище) и оборотната вода, която се подава към него (Барит Майнинг, 2026).

За изпомпване на избистрена вода към фабриката работят непрекъснато два понтона с помпи с дебит по 300м^3/час. За три дни в месеца едната помпа (300м^3/час) за избистрена оборотна вода се спира и се включва друга помпа с дебит 300м^3/час, която подава свежа вода, за да компенсира водата от езерото, която се е изпарила.

Таблица 1. *Технически характеристики на хвостохранилище „Челопечене“*

Характеристика	Стойност
Площ на утаителното езеро	100 дка
Дълбочина на утаителното езеро	3,5 м
Дължина на плаващата преграда	120 м
Дълбочина на потапяне на плаващата преграда	1,2 м
Количество мътна вода, постъпваща в хвостохранилището	600 м^3/час
Съдържание на твърда фаза в мътната вода	11%
Размер на 70% от фините твърди частици	< 20 микрона
Количество избистрена вода, постъпваща във фабриката	600 м^3/час

Преди поставяне на преградата обогатителната фабрика работи с 60% свежа вода и 40% оборотна вода. След монтиране на съоръжението фабриката започва да работи с 95% оборотна вода и едва 5% свежа вода на месец, а свежата и оборотната вода не се различават по отношение на бистротата. Въпреки че преградата е поставена само експериментално, тя изпълнява функцията си и към днешна дата.

Обсъждане

Резултатите от опитите в контролирани условия и монтирането на плаваща преграда на действителен водоем в комбинация със заключенията от предходни проучвания подкрепят твърдението, че този тип съоръжения ефективно удължават пътя на постъпващата суспензия и благоприятстват условията за естествено утаяване, като ограничават турбулентността и увеличават времето на престой.

Лабораторният експеримент разкрива, че поставянето на преграда забавя потока на суспензията в изградения воден резервоар приблизително 30 пъти. Това наблюдение позволява оценката и моделирането на времето на престой при различни геометрични параметри на водоемите.

Практическото приложение на полезния модел в хвостохранилище „Челопечене“ също потвърждава ефективността на решението, като успява да постигне почти пълно избистряне на постъпилата оборотна вода и намалява необходимостта от използването на свежа вода в обогатителната фабрика с приблизително 92% спрямо първоначалното ниво.

Допълнително преимущество на бариерата е, че предизвиканото от нея разместване на водните слоеве води до по-малки температурни колебания през денонощието и сезоните. Този благоприятен ефект може да допринесе за ограничаване на топлинното замърсяване, свързано с човешка дейност. Една от причините за възникване на такова замърсяване са промишлените охладителни системи, които използват студена вода за охлаждане, след което връщат загрятата вода обратно към водоизточника.

От една страна, поддържането на относително стабилен температурен режим е от полза за заобикалящата среда и приемния обект (в случая фабриката), тъй като намалява температурния шок и създава по-благоприятен микроклимат. Това е особено полезно на места с екстремни зимни и летни температури и по-чувствителни производствени процеси, където се изисква контрол над температурата на постъпващата вода. От друга страна, по-хладната водна повърхност през лятото например ограничава риска от бурен цъфтеж на водни организми, което влияе благоприятно върху кислородния баланс в дадено водно тяло.

Плаващият характер на преградата на свой ред позволява автоматично адаптиране към промени в нивото на водоема, намалява риска от структурни повреди и води до по-ниски разходи за поддръжка и реконструкция.

За постигане на висока ефективност при прилагането на това технологично решение е необходимо при проектирането на бариерата да се вземат предвид специфичните характеристики на водоема и постъпващата суспензия. Следва да се отчете, че законът на Стокс е в сила само при малки частици в ламинарен поток ($Re_p < 1$). При частици с размер под 1 микрон гравитационното утаяване е силно ограничено, поради което често се прилагат коагулация и флокулация.

При изработването и поддържането на плаващата преграда трябва да се обърне внимание и на използваните материалите от екологична гледна точка. Във вида, в който е изградено работещото съоръжение, съществува риск от изпускане на микропластмаси в хвостохранилището заради механичното износване под влиянието на триенето, слънцето и водата. Тъй като в утаителите за минни отпадъци условията обикновено са по-агресивни от тези в други водоеми поради наличието на абразивни частици и променлива киселинност, това води до още един потенциален източник на замърсяване на водата там. С цел предотвратяване отделянето на микропластмаси следва да се разработят щадящи конструктивни решения за намаляване на механичното триене, както и да се потърсят алтернативни материали за направа на самата преграда и поплавъците (например неръждаема стомана, алуминий, стоманобетон, керамика или др.).

Описаната технология е приложима както за водоеми с промишлено предназначение, така и за водоеми, предвидени за напояване и питейни нужди. Системата работи пасивно и не изисква влагане на допълнителна енергия и материали, което е основополагащ принцип в устойчивото инженерство. С нейна помощ се повишава ресурсната производителност и става по-лесно повторното захранване на отпадни води в производствения цикъл. По този начин се постига намаляване на ресурсния и енергийния отпечатък в съответствие с поставените цели за устойчиво развитие.

Заключение

Използването на пасивни плаващи прегради за утаяване на суспендирани твърди частици представлява енергийно ефективно и икономически устойчиво решение за избистряне на постъпващата вода в различни видове водоеми. Предложената технология постига значително намаление на мътността на третираната вода, като удължава пътя на суспензията и времето за утаяване. Това свежда до минимум или напълно изключва необходимостта от първично избистряне с химически агенти, улеснявайки последващото рециклиране на водата. Методът е приложим за промишлени, селскостопански и битови нужди, като допринася за устойчивото управление на водните

ресурси и подкрепя прилагането на принципите на кръговата икономика.

Литература

Барит Майнинг. (2026). *Технически характеристики на хвостохранилище „Челопечене“*. [Вътрешна база данни].

Дончев, Р., Дончева, И., Владимиров, В., & Владимиров, С. (2017). Свидетелство за регистрация на полезен модел № BG 2998 U1. Патентно ведомство на Република България, 31.05.2017 г.

Европейска комисия. (2020). *Съобщение на Комисията до Европейския парламент, Съвета, Европейския икономически и социален комитет и Комитета на регионите: Нов план за действие относно кръговата икономика*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098#footnote5.

Европейски парламент, Съвет на Европейския съюз. (2020). *Регламент (ЕС) 2020/741 на Европейския парламент и на Съвета от 25 май 2020 година относно минималните изисквания за повторното използване на водата*. Официален вестник на Европейския съюз. http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj.

Утаители за отпадъчни води. (2015). *Екология и инфраструктура*. 1. TLL Media. https://www.ecology-and-infrastructure.bg/bg/utaiteli-za-otpadachni-vodi/2/213/.

Al-Mafraji, E. A., & Al-Mussawy, H. A. (2021). Using lower and upper baffle arrangements to enhance sedimentation tank performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1067*(1), 012009. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1067/1/012009.

Banaś, M., & Hilger, B. (2024). Proposal for New Method for Calculating Sedimentation Process Efficiency in Water Treatment Plants. *Materials*, *17*(13), 3285. https://doi.org/10.3390/ma17133285.

Bruno, P., Bruno, F., Di Bella, G., Napoli, E., & De Marchis, M. (2024). CFD study on the effect of the baffles geometry in sedimentation efficiency in wastewater treatments through Large Eddy Simulations. *Journal of Environmental Management*, *373*, 123536. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123536.

Hassanien, M., Elmolla, E., & Mahmoud, U. F. (2018). Modeling the effect of inlet baffle longitudinal and vertical positions on the settling tank performance with computational fluid dynamics. *Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM)*, *40*(2). Retrieved from https://www.azharcermjournal.com/CERMF1804/P18-04-11.pdf.

Juraev, S., Akramov, A., Abdurazzokov, A., & Pathidinova, U. (2022). Increasing the efficiency of sedimentation tanks for drinking water treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1076*(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012049.

K., Y.P. (2024). Sedimentation in Water and Used Water Purification. In: Lahnsteiner, J. (eds) *Handbook of Water and Used Water Purification*. (pp. 29–54). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78000-9_2.

Liu, Y., Zhang, P., & Wei, W. (2016). Simulation of effect of a baffle on the flow patterns and hydraulic efficiency in a sedimentation tank. *Desalination and Water Treatment*, *57*(54), 25950–25959. https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1157521.

Merkus, H.G. (2009). Sedimentation Techniques. In: *Particle Size Measurements*. Particle Technology Series, vol 17. (pp. 319–348). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9016-5_13.

Moran, S. (2018). Fluid mechanics. *An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design*. Elsevier EBooks. (pp. 53–58). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811309-7.00005-9.

Razmi, A. M., Bakhtyar, R., Firoozabadi, B., & Barry, D. A. (2013). Experiments and numerical modeling of baffle configuration effects on the performance of sedimentation tanks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *40*(2), 140–150. https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0176.

Ritchie, H., & Roser, M. (2024, February). *Water use and stress*. Retrieved from Our World in Data. https://ourworldindata.org/water-use-stress.

Shahrokhi, M., Rostami, F., Azlin, M., Sabbagh-Yazdi, S.-R., Syafalni, S., & Abdullah, R. (2012). The effect of baffle angle on primary sedimentation tank efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *39*(3), 293–303. https://doi.org/10.1139/l2012-002.

Shammas, N.K., Kumar, I.J., Chang, SY., Hung, YT. (2005). Sedimentation. In: Wang, L.K., Hung, YT., Shammas, N.K. (eds) *Physicochemical Treatment Processes*. Handbook of Environmental Engineering, vol 3. (pp. 379–429). Humana Press. https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:379.

Smol, M., Adam, C., & Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *22*(3), 682–697. https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z

LEGAL, SOCIAL, AND BIOETHICAL ASPECTS OF THE USE OF GENE EDITING IN HUMAN REPRODUCTION

Niya Petrova, Polina Velichkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: nianikolova1987@gmail.com

ABSTRACT. Gene editing, and in particular CRISPR-Cas-based technologies, represent one of the most significant achievements of modern genome editing biotechnology. Their potential to prevent severe hereditary diseases in the context of human reproduction is significant; at the same time, however, it raises complex legal, ethical, and social issues. This article analyses the main challenges associated with the application of germline gene editing, focusing on the lack of a unified international regulatory framework, the risks to human dignity, and the possibility of deepening social inequality. It examines existing legal regimes, key principles of bioethics, and public attitudes towards reproductive genomic technologies. It emphasises the need for globally coordinated governance, based on the principles of precaution, transparency, and public participation, aimed at achieving a balance between scientific progress and the protection of fundamental human values.

Key words: bioethics, gene editing, reproduction, legal aspects, CRISPR.

ПРАВНИ, СОЦИАЛНИ И БИОЕТИЧНИ АСПЕКТИ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ГЕННО РЕДАКТИРАНЕ В ЧОВЕШКАТА РЕПРОДУКЦИЯ

Ния Петрова, Полина Величкова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Генното редактиране, и по-специално базираните на CRISPR-Cas системи технологии, представляват едно от най-значимите постижения на съвременната биотехнология за редактиране на геноми. Потенциалът им за предотвратяване на тежки наследствени заболявания в контекста на човешката репродукция е значителен, но същевременно поражда сложни правни, етични и социални въпроси. В настоящата статия се анализират основните предизвикателства, свързани с прилагането на генното редактиране в зародишна линия, като поставя акцент върху липсата на единна международна регулаторна рамка, рисковете за човешкото достойнство и възможността за задълбочаване на социалното неравенство. Разглеждат се съществуващите правни режими, ключовите принципи на биоетиката и обществените нагласи към репродуктивните геномни технологии. Подчертава се необходимостта от глобално координирано управление, основано на принципите на предпазливост, прозрачност и обществено участие, с цел постигане на баланс между научния прогрес и защитата на основните човешки ценности.

Ключови думи: биоетика, генно редактиране, репродукция, правни аспекти, CRISPR.

Въведение

CRISPR-Cas системи (*клъстерирани редовно разположени кратки палиндромни повторения*) представляват къси ДНК последователности, съставени от поредица от повторения (с дължина от 23 до 47 двойки бази), разделени от уникални последователности, наречени спейсъри. Полиморфизмът може да се наблюдава в различни щамове на един вид и може да се използва за генотипизиране (Grissa et al., 2009)

През 2020 г. Еманюел Шарпентие и Дженифър Дудна са удостоени с Нобелова награда по химия за „разработването на метод за редактиране на генома“ за успеха си да пресъздадат генетичните ножици на бактериите в *in vitro* условия. Освен това те са ги редактирали по такъв начин, че да могат да режат на предварително определено от нас място всяка ДНК молекула. Първите основани на CRISPR-Cas9 терапии са одобрени от Американската агенция по храните и лекарствата през декември 2023 (за лечение на сърповидно-клетъчна анемия) и януари 2024 г. (за терапия на бета таласемия). За целта от пациента се изолират хемопоетични стволови/прогениторни клетки, чието редактиране се осъществява *ex vivo* в лабораторни условия, след което те се връщат обратно в организма му (Александрова, 2024).

Методът се проучва усилено за потенциално приложение в лечението на множество наследствени и придобити заболявания: имунодефицитни нарушения, ракови, сърдечно-съдови, кожни и очни заболявания, невродегенеративни състояния и др. CRISPR-Cas може да се „мултиплексира“ за редактиране на множество гени едновременно и се използва за високо ефективен скрининг на целия геном (Александрова, 2024).

Но трябва да се обърне внимание и на друг факт, който може да е свързан с злоупотреба с генното редактиране-възможността за опасност от комерсиализация на човешкия живот и създаването на „дизайнерски бебета“ с подобрения по желание на бъдещите родители.

Генното редактиране на зародишната линия (*germline editing*) включва извършване на трайни, наследствени промени в ДНК в сперматозоиди, яйцеклетки или ембриони, което позволява предаването им на бъдещите поколения. Въпреки че притежава потенциал за елиминиране на наследствени заболявания, то е изправено пред сериозни рискове за безопасността (напр. мутации извън целевата група, мозаицизъм) и е съпроводено със сериозни етични, правни и социални проблеми.

Соматичните генни терапии включват модифициране на ДНК-то на пациента за лечение или излекуване на заболяване, причинено от генетична мутация. Учените вземат кръвни стволови клетки от пациент и с помощта на CRISPR техники коригират генетичната мутация, която ги кара да произвеждат дефектни кръвни клетки, след което „коригираните“ клетки се връщат обратно в пациента, където произвеждат хемоглобин. Лечението променя кръвните клетки на пациента, но не и сперматозоидите или яйцеклетките му. Редактирането на човешкия геном на зародишната линия, от друга страна, променя генома на

човешкия ембрион в най-ранните му етапи. Това може да засегне всяка клетка, което означава, че има въздействие не само върху човека, който може да се роди, но и евентуално върху неговите потомци. Следователно има съществени ограничения за неговото използване (Bergman, 2019).

Повратна точка в казуса за генно редактиране е случаят с китайския биофизик и генетик Хъ Дзиенкуй (*He Jiankui*), който през ноември 2018 г. обявява, че е редактирал и имплантирал човешки ембриони в две жени, като едната майка е родила близначките Лулу и Нана, но не е ясно какво е станало с бебето на другата. Целта била да се опита да деактивира гена за CCR5, кодиращ рецептор, който ХИВ използва, за да навлезе в клетките (Normile, 2019; Biscontini, 2023). Модификацията (резистентност към ХИВ) може да бъде предадена на потомците на деца, родени с нея. Критерий при избора на жените в експеримента бил бащата да е заразен с ХИВ, а майката да не е. Родените близначки все още носели функционални копия на CCR5 заедно с деактивиран CCR5 и все още са уязвими към ХИВ.

В реч на Международната среща на върха за редактиране на човешкия геном в Хонконг, Китай, той казал, че иска да спести възможността бебетата да се заразят с ХИВ на по-късен етап от живота си. Дзиенкуй твърди, че работата му е полезна за бъдещето на човечеството като подобни практики биха могли да помогнат за намаляване на разпространението на ХИВ/СПИН в цяла Африка, където хората с това заболяване са изправени пред значителна социална стигма и по-високи нива на смъртност. Критиците обаче твърдят, че ученият е действал незаконно, пренебрегвайки правителствените забрани и действайки без значителен регулаторен надзор.

Работата му е широко осъдена като неетична, опасна и неморална, тъй като е изложил бебетата на рискове, свързани с редактирането на гени, за малка полза. Той е признат за виновен в извършване на „незаконни медицински практики“ и осъден на 3 години затвор. Съдът постановил, че тримата обвиняеми (Хъ Дзиенкуй и двама негови сътрудници) умишлено са нарушили националните разпоредби за биомедицински изследвания и медицинска етика и са приложили необмислено технология за генно редактиране в човешката репродуктивна медицина.

След този казус, Китай приема нови разпоредби, които засилват ограниченията върху генетичните експерименти. Учените, извършващи такива изследвания, трябва надлежно да информират пациентите за всички алтернативи на лекарството или лечението, което изследват, и трябва да предоставят на участниците средства за контакт с комисия по етичен преглед. Тези разпоредби се прилагат не само за болници и здравни заведения, но и за висши учебни заведения и научноизследователски институти. Важно е да се отбележи, че те не се прилагат за частни организации, което позволява на частно финансираните институции по-голяма свобода при провеждане на спорни изследвания (Biscontini, 2023).

От гореизложено се поражда и въпросът *Какви всъщност са правните, социални и биоетични предизвикателства пред използването на генно редактиране в човешката репродукция и как могат да бъдат адресирани на глобално ниво?*

Правни аспекти

Декларацията за човешкия геном и правата на човека от 1997 г. подчертава, че геномът е „наследство на човечеството“, а докладът на Международния комитет по биоетика на ЮНЕСКО го актуализира през 2015 г. като призовава за мораториум върху редактирането на наследствения човешки геном поради рискове за безопасността, етичните и евгенични рискове-ограничаване на модификациите до превантивни, диагностични или терапевтични (UNESCO, 2015). Конвенцията за правата на човека и биомедицината (конвенция на Овиедо) забранява намеси, целящи промяна в генома на бъдещи поколения (Council of Europe, 1997). Световната здравна организация препоръчва глобална регулация и строг международен надзор върху редактирането на зародишна линия (WHO, 2021).

Европейската правна рамка, и по-специално чл. 13 от Конвенцията от Овиедо, към която България е страна, установява ясна граница между допустими терапевтични интервенции и недопустими промени в зародишната линия, което прави клиничното генно редактиране в човешката репродукция несъвместимо с действащото право на ЕС.

В таблица 1 е направено сравнение между правната рамка на ЕС и българското законодателство относно генното редактиране в човешката репродукция.

Ясно се вижда, че българската правна система е в значителна степен хармонизирана с рестриктивния подход на ЕС относно генното редактиране в човешката репродукция, като основните ограничения произтичат от международни договори и конституционни принципи, а не от специализирано законодателство.

Освен това може да се заключи, че не е необходима нова забрана, а по-ясна интерпретация, институционален капацитет и обществен диалог.

Между европейската правна рамка и българското законодателство се илюстрира висока степен на нормативна конвергенция по отношение на генното редактиране в човешката репродукция. Макар в българското право да липсва изрична норма, която директно да регулира геномното редактиране, ратификацията на Конвенцията от Овиедо и конституционната защита на човешкото достойнство и телесна неприкосновеност на практика изключват клиничното приложение на генното редактиране в зародишна линия. Същевременно се открива регулаторен дефицит по отношение на управлението на научните изследвания и общественото участие.

Документи като становищата на Европейската група по етика (EGE, 2021) и Рамката за отговорни научни изследвания и иновации (RRI, 2017) не намират пълно институционално отражение в българската практика. Това създава пространство за развитие *de lege ferenda* (описва какво правото трябва да бъде), насочено към изграждане на по-ясни национални механизми за етичен контрол, публичен диалог и координация с европейските политики.

Таблица 1. *Съответствие между правната рамка на ЕС и българското законодателство относно генното редактиране в човешката репродукция*

Ниво / Документ (ЕС)	Основен принцип / разпоредба	Съответствие в българското законодателство	Коментар
Конвенция за правата на човека и биомедицината (Овиедо), чл. 13	Забрана на интервенции, целящи промяна на генома на потомството	България е ратифицирала Конвенцията (ДВ, бр. 21/2003)	Пряко обвързваща норма; клиничното герминално генно редактиране е недопустимо
Харта на основните права на ЕС, чл. 3	Защита на човешката цялост и достойнство	Конституция на РБ – чл. 28, 29	Конституционна защита на човешкото достойнство подкрепя рестриктивен подход
Европейската група по етика (EGE, 2021)	Допустими са само изследвания без имплантация на редактирани ембриони	Закон за здравето – принцип на безопасност и медицинска обоснованост	Етичните становища на ЕС намират индиректно отражение в националното право
Резолюция на Европейския парламент, 2020	Призив за международен мораториум върху клиничното редактиране в зародишна линия	Липса на изрична норма, но пълна практическа забрана	Българското право е „де факто“ по-рестриктивно
Съвет на Европа – DH-BIO (документи)	Защита на бъдещите поколения и социална справедливост	Конституция на РБ – чл. 6 (равенство)	Генетично „подобрение“ би противоречало на принципа на равенство
Съвет по биоетика на Нъфийлд, 2018	Социални рискове и достъп до технологии	Закон за асистираната репродукция	Българското право не допуска експериментални репродуктивни практики
Рамка за отговорни научни изследвания и иновации (RRI)	Обществено участие и прозрачност	Национални етични комисии към МЗ и БАН	Липсва структуриран обществен дебат – идентифициран регулаторен дефицит
СЗО за управление на редактирането на генома (WHO, 2021)	Глобална координация и национални регистри	Няма специален национален регистър	Аргумент *de lege ferenda* за България

Правни дилеми

От горепосочените правни аспекти произтичат следните правни дилеми:

- Възникване на „репродуктивен туризъм“, тъй като хората ще търсят държави с по-либерални режими. В повечето държави редактирането на зародишната линия е забранено или строго ограничено като в някои случаи е разрешено само соматично генно редактиране (при лечение на заболявания), тъй като не се предава на поколението.
- Какви са правата на бъдещото дете и имат ли бъдещите поколения правна защита? Това трябва да бъде подробно обсъдено и описано в нормативни документи за генното редактиране в човешката репродукция, тъй като съществува неяснота по въпроса.
- Кой носи отговорност при неблагоприятни последици и/или нежелани мутации? Също важен въпрос, за да знаят чия отговорност да търсят потърпевшите от възникнали проблеми при генното редактиране- най-вече засегнатото дете и последващите му поколения.
- Може ли да се патентоват генно редактирани ембриони? И ако да, по какъв ред ще се осъществява, тъй като „творението“ би следвало да принадлежи на създателя си…

Социални аспекти

Социално неравенство

Използването на генно редактиране в човешката репродукция поставя сериозни въпроси относно социалната справедливост и равния достъп до новите технологии. Съвременни методи като системата CRISPR-Cas9 дават възможност не само за предотвратяване на тежки наследствени заболявания, но и потенциално за подобряване на определени характеристики. Това поражда риск от създаване на т.нар. „генетичен елит“ – група от хора, чиито родители са могли да си позволят генетична намеса с цел оптимизиране на здравето или други качества на своите деца.

Ако достъпът до подобни процедури бъде ограничен до финансово привилегировани слоеве, съществува реална опасност от задълбочаване на социалното разслоение. Биологичните различия могат да се превърнат в нов механизъм за възпроизвеждане на социалното неравенство, при който икономическите предимства се подсилват от генетични такива. Това би довело до нова форма на обществено разслоение, основана не само на доходи и образование, но и на биологично „подобрени“ характеристики.

Дискриминация

Генното редактиране в репродуктивен контекст може да повлияе и върху общественото отношение към хората с увреждания. Ако определени генетични състояния бъдат рутинно елиминирани чрез селекция или редактиране на ембриони, това може да доведе до намаляване на толерантността към хората, които вече живеят с такива състояния. Вместо да се насърчава социалното включване и равнопоставеността, обществото може неволно да изпрати послание, че животът с увреждане е „нежелан“ или „предотвратим“.

Съществува и риск от възраждане на идеи, свързани с евгеника – историческо течение, което цели „подобряване“ на човешката популация чрез контрол върху възпроизводството. Макар съвременните научни практики да се различават съществено от принудителните и дискриминационни политики от миналото, самата идея за

селекция на „желани“ черти може да събуди етични опасения и исторически травми.

Културни и религиозни възгледи

Въпросът за намесата в човешкия геном има силно изразено културно и религиозно измерение. За много религиозни общности генетичното редактиране се възприема като „намеса в Божия план“ и прекрачване на границите на допустимото човешко действие. Например Римокатолическа църква традиционно изразява резерви към технологии, които променят човешката природа на фундаментално ниво, особено когато са свързани с манипулация на ембриони.

В същото време в други културни контексти се наблюдава по-прагматичен подход, при който предотвратяването на страдание и заболявания се разглежда като морално оправдано. Общественият консенсус по темата варира значително между различните държави и култури, което затруднява създаването на универсални регулации и международни стандарти.

Обществено доверие в науката

Доверието в научните институции е ключов фактор за приемането на генните технологии. Скандали като случая с Хъ Дзиенкуй подкопават общественото доверие и пораждат опасения за липса на контрол и етични стандарти. Този случай показва колко лесно научният прогрес може да изпревари нормативната рамка и обществения дебат.

Поради това е необходима по-голяма прозрачност в научните изследвания, ясно дефинирани регулаторни механизми и активен обществен диалог. Само чрез открито обсъждане, включващо учени, политици, религиозни лидери и граждани, може да се изгради устойчиво доверие и балансиран подход към използването на генно редактиране в човешката репродукция.

Роля на медиите и публичния дискурс

Медиите играят ключова роля във формирането на общественото мнение относно генното редактиране в човешката репродукция. Начинът, по който се представят научните открития, често определя дали технологията ще бъде възприета като обещаващ медицински пробив или като опасна намеса в природата.

Журналистическото отразяване може да акцентира върху различни аспекти – например върху потенциала на технологии като CRISPR-Cas9 да лекуват наследствени заболявания, или върху рисковете от „дизайнерски бебета“. Използването на сензационни заглавия и опростени послания понякога води до поляризация – обществото се разделя между безкритичен ентусиазъм и силен страх.

Медиите са основен посредник между научната общност и широката публика. Когато информацията е представена коректно, с обяснение на рисковете, ограниченията и етичните дилеми, това допринася за повишаване на научната грамотност. Обратно – непълното или подвеждащо отразяване може да създаде нереалистични очаквания или неоправдани страхове.

Случаят с Хъ Дзиенкуй през 2018 г., показа колко бързо медиите могат да разпространят новината глобално и да предизвикат масивна обществена реакция. Този пример подчерта значението на критичния анализ и проверката на научната информация.

Публичният дискурс – включително социалните мрежи, телевизионни дебати и експертни форуми – влияе върху създаването на политики и регулации. Общественото мнение може да окаже натиск върху правителствата да въведат ограничения, мораториуми или по-строги етични стандарти. От друга страна, позитивният обществен климат може да ускори финансирането и развитието на научни изследвания.

Темата за генната намеса в човешката репродукция засяга дълбоки морални и културни ценности. Медиите често дават трибуна както на учени, така и на религиозни лидери, пациенти и активисти. Това разширява дискусията отвъд чисто научните аргументи и я превръща в обществено-етичен дебат.

От съществено значение е отговорното журналистическо отразяване и активното участие на експерти в публичните дебати, за да се гарантира, че обществените решения по темата са основани на знание, а не на страх или сензация.

Биоетични аспекти

Биоетичният анализ на генното редактиране в човешката репродукция обикновено се основава на четирите класически принципа, формулирани от Том Бошам и Джеймс Чайлдрес в рамките на принципния модел в биоетиката (Beauchamp and Childress,1989). Принципите автономия, благодеяние, ненараняване и справедливост осигуряват етична рамка за оценка на потенциалните ползи и рискове от намесата в човешкия геном.

Автономия

Принципът на автономията предполага уважение към способността на индивида да взема информирани решения относно собствения си живот и тяло. При генното редактиране на ембриони възниква сериозен етичен проблем: ембрионът не може да даде съгласие за извършваната намеса, а последствията от нея могат да бъдат пожизнени и наследствени.

Това поставя въпроса за баланса между родителското право да вземат решения в интерес на бъдещото си дете и правото на самия бъдещ индивид на „отворено бъдеще“ – т.е. на живот, ненатоварен от предварително избрани или наложени характеристики. Намесата в генома може да се разглежда както като акт на отговорност и грижа, така и като ограничаване на автономията на бъдещия човек.

Благодеяние

Принципът на благодеянието изисква действията да бъдат насочени към постигане на полза и предотвратяване на страдание. В този контекст генното редактиране предлага значителен потенциал за елиминиране на тежки наследствени заболявания като муковисцидоза и таласемия. Премахването на мутации, водещи до сериозни здравословни проблеми, може да подобри качеството и продължителността на живота на бъдещите поколения.

От тази гледна точка технологията може да се разглежда като морално оправдан инструмент за намаляване на страданието. Въпреки това възниква въпросът къде е границата между терапевтична намеса и „подобряване“ на човешки характеристики извън медицинската необходимост.

Ненараняване

Принципът на ненараняването изисква да се избягва причиняването на вреда. Макар технологиите за генно редактиране да се развиват бързо, съществува риск от непредвидени мутации и т.нар. „*off-target*“ ефекти – нежелани промени в други участъци на генома. Подобни изменения могат да доведат до нови заболявания или усложнения, които не са били предвидени.

Особено тревожен е фактът, че при редактиране на зародишни клетки промените се предават на следващите поколения. Това означава, че евентуалните грешки могат да имат дългосрочни последици за човешкия геном като цяло, което повдига въпроси за отговорността към бъдещите поколения.

Справедливост

Принципът на справедливостта изисква равнопоставеност в достъпа до медицински ресурси и справедливо разпределение на ползите и рисковете. Ако генното редактиране стане достъпно само за определени социални групи, това може да задълбочи съществуващите неравенства.

Освен това трябва да се обсъди кой поема рисковете от експериментални процедури и кой се възползва от техните резултати. Справедливият подход предполага прозрачна регулация, обществен контрол и механизми, които да гарантират, че технологията служи на общото благо, а не само на ограничен кръг от хора.

Биоетичната допустимост на генното редактиране не може да се оценява едностранно – нито един от принципите не е абсолютен. Необходим е балансиран подход, основан на научна отговорност, строга регулация и широк обществен дебат. Само при наличие на прозрачност, международно сътрудничество и ясни морални граници тази технология би могла да бъде използвана в полза на човечеството, без да се компрометират основни човешки ценности.

Заключение

Биоетичният анализ на генното редактиране в човешката репродукция показва, че технологията стои на пресечната точка между огромен медицински потенциал и сериозни морални рискове. Принципът на автономията поставя въпроса за границите на родителското решение спрямо правата на бъдещия индивид. Благодеянието подчертава възможността за предотвратяване на тежки наследствени заболявания и намаляване на страданието. Ненараняването изисква особена предпазливост предвид непредвидимите дългосрочни последици за отделния човек и за човешкия геном като цяло. Справедливостта насочва вниманието към равния достъп и към социалните последици от прилагането на технологията.

Международната и европейската правна рамка възприемат предпазлив и рестриктивен подход към генното редактиране в човешката репродукция, особено по отношение на намесите в зародишната линия. Документи като декларация за човешкия геном и правата на човека и конвенция за правата на човека и биомедицината поставят акцент върху защитата на човешкото достойнство и бъдещите поколения, като на практика изключват наследствени генетични модификации.

Българското законодателство е в голяма степен хармонизирано с този подход, макар да липсва изрична национална регулация. Основните предизвикателства остават свързани с правата на бъдещите поколения, отговорността при вреди и необходимостта от по-ясни механизми за етичен контрол и обществен диалог.

Използването на генно редактиране в човешката репродукция не следва да бъде напълно забранено или безусловно разрешено, но трябва да бъде подложено на стриктно международно регулиране, основано на биоетичните принципи, социална справедливост и дългосрочна отговорност към бъдещите поколения. Освен това трябва да се постави ясна граница между „терапия“ и „подобрение“, както и да се гарантира човешкото достойнство и равенство.

Литература

Beauchamp, T.L. & Childress, J.F. (Eds.). (1989). *Principles of biomedical ethics*. New York: Oxford University Press.

Bergman, M.T. (2019, JAN 9). *Perspectives on gene editing*. The Harvard Gazette. https://news.harvard.edu/gazette/story/2019/01/perspectives-on-gene-editing/#:~:text=While%20somatic%20gene%20editing%20affects,passed%20on%20to%20future%20generations.

Biscontini, T. (2023) *The He Jiankui affair*. EBSCO. https://www.ebsco.com/research-starters/religion-and-philosophy/he-jiankui-affair

Council of Europe (Съвет на Европа) – DH-BIO documents, [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://www.coe.int/en/web/human-rights-and-biomedicine/cdbio

Council of Europe (Съвет на Европа) – Oviedo. (1997). European Treaty Series - No. 164. *Convention for the Protection of Human Rights and Dignity of the Human Being with regard to the Application of Biology and Medicine: Convention on Human Rights and Biomedicine*. https://rm.coe.int/168007cf98

European Group on Ethics in Science and New Technologies – EGE (Европейска група по етика). (2021). Opinion № 32. https://euroseeds.eu/app/uploads/2021/03/ege_ethics_of_genome_editing-opinion_publication.pdf

Grissa, I., Vergnaud, G., & Pourcel, C. (2009). Clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPRs) for the genotyping of bacterial pathogens. *Methods in Molecular Biology, 551*, 105–116. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-999-4_9.

Normile, D. (2019, DEC 30) *Chinese scientist who produced genetically altered babies sentenced to 3 years in jail*. ScienceInsider. https://www.science.org/content/article/chinese-scientist-who-produced-genetically-altered-babies-sentenced-3-years-jail. doi: 10.1126/science.aba7347

Nuffield Council on Bioethics (Съвет по биоетика на Нъфийлд). (2018). *Genome Editing and Human, Reproduction: social and ethical issues*. London. ISBN: 978-1-904384-34-2

Responsible Research and Innovation – RRI (Рамка за отговорни научни изследвания и иновации). [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_SwafS-23-2017

UNESCO. (2015). Report of the International Bioethics Committee (IBC) on Updating Its Reflection on the Human Genome and Human Rights. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000233258

World Health Organization (WHO). (2021). Human Genome Editing: Recommendations. https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/6c4ed811-47e2-4a19-893b-d5a43f52ffeb/content

Александрова, Р. (2024). Генно редактиране в медицината. Мединфо, 8, 16-18.

Държавен вестник (2003), бр. 21. https://www.ciela.net/svobodna-zona-darjaven-vestnik/document/2135464204/issue/1058/zakon-za-ratifitsirane-na-konventsiyata-za-zashtita-na-pravata-na-choveka-i-na-choveshkoto-dostoynstvo-vav-vrazka-s-prilaganeto-na-postizheniyata-na-biologiyata-i-meditsinata-konventsiya-za-pravata-na-choveka-i-biomeditsinata

Етична комисия към БАН. [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://www.imbm.bas.bg/index.php/bg_BG/ethics-committee-documents

Закон за здравето в България. [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://www.lex.bg/laws/ldoc/2135489147

Закон за асистираната репродукция. (2007). НАРЕДБА № 28 от 20.06.2007 г. за дейностите по асистирана репродукция. naredba28-ot-20-06-2007g-asistirane-reproduktsia.pdf

Конституция на Република България. [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://www.parliament.bg/bg/const

Национални етични комисии към МЗ. [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://www.mh.government.bg/bg/ministerstvo/komisii

Резолюция на Европейския парламент. (2020). [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/ALL/?uri=CELEX:32020R2092

Харта на основните права на ЕС. [Прегледан: 23.02.2026]. Достъпен от: https://www.europarl.europa.eu/about-parliament/bg/democracy-and-human-rights/fundamental-rights-in-the-eu?&at_campaign=2024-AboutParliament&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_advertiser=Webcomm&at_topic=Fundamental&at_location=BG&gad_source=1&gad_campaignid=23095467755&gbraid=0AAAABBTrHUkJ-MfTfRNXTOg3cZopyny8S&gclid=CjwKCAiAwNDMBhBfEiwAd7ti1DPILrrO4bh-L6FJfXBR7CaUegPNIQt_8qWCtXCsjUGNIqpTqPJ1lBoCnVMQAvD_BwE

PRESENTATION IN A FOREIGN LANGUAGE OF BASIC RULES FOR WORKING IN A SPECIALISED LABORATORY WHILE TRAINING ELECTRICAL SPECIALISTS

Milena Purvanova, Teodora Hristova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: Purvanova@mgu.bg

ABSTRACT. Globalisation requires knowledge of a foreign language at a high level. Communication with different cultures not only increases soft skills and the level of knowledge, but also the cognitive abilities of the individual. In this sense, education in a foreign language has blurred boundaries, but still a certain level of language proficiency requires covering certain standards. In strictly specific work, such as mining, medicine, or production, it is mandatory that rules and standards be observed. For this purpose, basic areas of work in electrical, chemical, physical, and other laboratories are considered. To protect university students and their lecturers from risks, it is necessary to set and follow certain rules. Examples of different ways of expressing them are proposed, including the imperative mood, the passive voice, modal verbs, and others.

Ключови думи: mobility, specialised laboratory, electrical equipment, instructions, foreign language teaching.

ПРЕДСТАВЯНЕ НА ЧУЖД ЕЗИК НА ОСНОВНИ ПРАВИЛА ЗА РАБОТА В СПЕЦИАЛИЗИРАНА ЛАБОРАТОРИЯ ПРИ ПОДГОТОВКА НА ЕЛЕКТРОСПЕЦИАЛИСТИ

Милена Първанова, Теодора Христова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Глобализацията изисква знание на чужд език на високо ниво. Общуването с различни култури не само повишава меките умения и нивото на знания, но и когнитивните способности на индивида. В такъв смисъл образованието по чужд език е с размити граници, но все пак определено ниво на владеене на език изисква покриване на дадени стандарти. При строго специфична работа като минно дело, медицина, производство се изисква да се спазват правила и стандарти. За целта са разгледани базови области при работа в електротехническа, химическа, физическа и други лаборатории. За предпазване на студентите и техните преподаватели от рискове е необходимо да се задават и да се спазват определени правила. Предложени са примери за различни начини за изразяването им. Това може да стане чрез повелително наклонение, с пасив, модален глагол и други.

Ключови думи: мобилност, специализирана лаборатория, електротехника, инструкции, чуждоезиково обучение.

Introduction

The multicultural development of humanity is evidenced by the way of life in recent years, which has led to the need for teaching and learning in various languages. The diversification of young people in cultural and linguistic significance is at different levels. A 2002 study established that universities were significantly lagging behind in catching up with global trends (Gogolin, 2002).

To raise the level of communication and modernisation of education, programmes like "Erasmus+" are introduced, giving young students and their teachers the opportunity to travel (Užpalienė & Vaičiūnienė, 2012). The participation of university students is subject to language level requirements of at least B1 and a minimum of one year of study at the sending university. Another possibility is the participation in educational associations of multilingual and multicultural training centres, e.g. Alliance of the Multilingual and Multicultural Training Centres (M&M) (Kjellgren et al., 2022).

Due to its simple structure and easy grammar, English is one of the official languages of the world. It is also the preferred language for participation in international programs (Užpalienė & Vaičiūnienė, 2012; Kjellgren et al., 2022). In a study of attitudes towards travel and language learning, respondents complained that Spanish, Italian, Polish and Bulgarian were unpopular languages, with scarce preferences of only 4% for each of the above (Užpalienė & Vaičiūnienė, 2012). Languages like English, German, and Russian were declared popular.

This is the reason for initiating English language training in the relevant profiling course units. It is proven to serve not only at the university level, but also for communication, joint projects, defences of students' theses at the master and doctoral levels, negotiations, and many others throughout the individuals' lives. English is extensively used by managers, lawyers, project managers, designers, university students, their lecturers, representatives in the production area or of companies, and others. They all can participate as third parties in communication. Depending on the roles of those involved in communication, the topics and the manner of participation are distinguished, too.

Benefits of studying a foreign language at university

Learning a foreign language provides various advantages to its speaking users. In the field of education, these are as follows:

- Access to specialised information and a large amount of knowledge;
- Education in specialised, reputable educational institutions of high rating;
- The right to career development and advantages when applying for a job and subsequent employment or professional negotiations;
- The opportunity for free communication and orientation when traveling around the world;
- Understanding when visiting cultural events, museums natural landmarks, etc;
- Free communication when participating in international scientific, cultural, financial, sports, and other communities;

- Improvement of cognitive abilities, memory, comprehension, and development of intellectual abilities.

Depending on the level of knowledge, an individual's role in society, and the purpose of communication, the context of the conversation can be assumed. Blurred boundaries and an increase in soft skills are reported.

When working in a specialised laboratory, however, there are specifics in the usee of a foreign language. Certain rules need to be applied and understood. This is necessary in order to comply not only with safety precautions, but also with the prescribed procedures for production using a certain technology, as well as to achieve the goals set.

The main reasons are to protect human life and to provide students and lecturers with the right to free communication. Among the others are the compliance with the technological process, the protection of product quality, of the company name, etc.

The aim of the article is to provide basic rules for introducing scientists, students, and third parties to working with specialised equipment in laboratories and protecting them from hazardous substances. This would raise their interest, motivation for and effectiveness in studying in a multicultural environment. In addition, it would lead to an increase in the rating of the respective higher school.

Cases of using a foreign language in education

The cases of using a foreign language in education are varied, but generally depend on the roles. On the one hand are the students who use knowledge and laboratory facilities. On the other hand are the university lecturers who attend various events, conferences, databases for data exchange, literature research and new publications, etc. Most recommendations by the European Union put an emphasis on the use of open resources with free access by the Alliance (Kjellgren et al., 2022).

Typically, the activities are as follows:

- Using libraries, specialised literature and online resources;
- Studying in a university abroad. This is possible when enrolling for or taking part in international programmes, such as “Erasmus+”, or participating in associations, projects, etc.;
- Visits of foreign lecturers to the university;
- Mutual work with foreign partners;
- Attending conferences, seminars, training ssessions, workshops, and others;
- Promoting the results of scientific work at conferences, at foreign-language universities, or in scientific publications;
- Publishing scientific results and articles in various publications in a foreign language;
- Conducting research or fieldwork abroad by scientists;
- Creating, maintaining, and/or participating in interest groups;
- Developing new products in this country or abroad;
- Protecting the rights of universities and companies through the results of measurements and field expertise;
- Visiting industrial sites, developed practices, etc.;
- Visiting various sites for the purposes of experimentation, collaboration, and achieving new scientific results.

Special cases

Contrary to the study by Hladik and Jadama (2016), there are cases where boundaries in teaching a foreign language cannot be blurred. It is all very good to mix habits and cultural features, but learning and applying regulations requires rigour and precision.

This is the case of work in electrical, chemical or safety laboratories, requiring compliance with standards. Rules are also introduced in the manufacturing area, in hospitals, in establishments, and many other sites. Depending on the risk of injuries or damage, these procedures vary. They are especially strict in the mining industry, medicine, the chemical industry, etc. All of them are created on the grounds of basic standards and regulations, or the so-called regulatory framework.

The safety standards for Bulgaria are about observing the rules at work and reducing the damage caused by spills of hazardous liquids and gases, by fire, or by electric shock (BDS 14299:1989; BDS EN 12259-1:1999+A1:2001/A3:2006; BDS EN 50160:2023). Some of the main ones that apply to students in engineering specialties are:

→ Protection of a person when working near a high-voltage network (Petrov et al., 2023);
→ Assessment of the impact and damage of electric current when passing through the human body (Petrov et al., 2022);
→ Fire prevention and increasing the level of safety in the operation of buildings and machines (Vladkova, 2020; Makedonska et al., 2025);
→ Proper operation of various equipment, such as photovoltaics, motors, energy production installations, and others (Mitkov et al, 2022; Varbov et al., 2023);
→ Influence of electromagnetic compatibility in the control of lighting fixtures and determining the possibilities for increasing the safety of workers according to the standards of the country (Ivanov et al.,2020);
→ Assessment of the risk of fire when operating a gas transmission network or when injecting gas into the heat pipeline network (Vlaykova et al. 2024);
→ Introduction of safe methods for operating oil and gas transmission networks for the transmission and production of energy (Mitkov et al, 2022);
→ Determininging the safe composition of mixtures when transporting gas, hydrogen, oil, etc. (Vlaykova et al. 2024);
→ Determining the benefits of oil and gas transportation for the economic conditions of regions or for the increase of people's well-being (Radev & Boyadzhiev, 2023).

The examples are numerous and a differentiated approach should be taken when training for proper behaviour and operation of specific equipment. The overview points to the conclusion that the topics concern electricity, fire, oil and gas facilities, energy production, gas transportation, hydrogen operation, and others. Therefore, we recommend that the rules be taught according to the students' specialty.

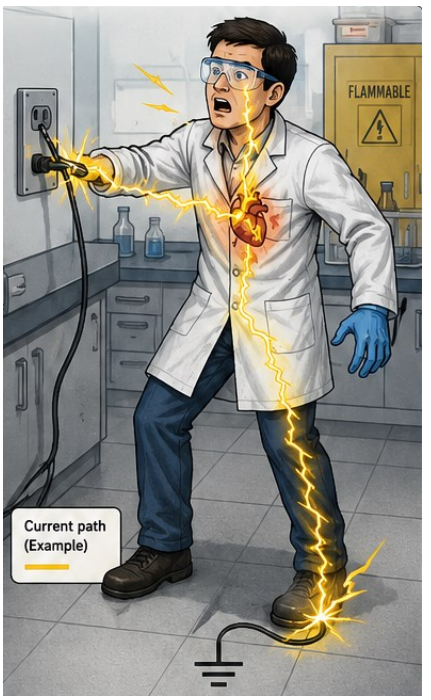


Fig 1. Short circuit on the human body

Training procedures

Regardless of the method of training in engineering courses of study (online, in a virtual laboratory, or introducing the rules on site), a sufficiently good level of English proficiency is required (Hristova et al., 2021; Evstatiev et al., 2022).

Depending on the method of training, feedback on the level of mastery and understanding of the basic instructions is also received.

In case of misunderstanding on the part of students or third parties, a lecturer has the right to apply other teaching methods. The use of open resources is a new method which should not be ignored. Such is the Lilac Project, or OERs LILAC (Online Language Learning and Teaching) wherein learning is divided into micro and macro learning (Nicora et al., 2022). In this aspect, “micro” means acquiring basic knowledge and skills, and “macro” is in-depth learning with complex phrases.

The stages are:

→ Online face-to-face learning;
→ Acquisition of digital and organisational skills;
→ Increasing the pedagogical role by introducing new teaching techniques, such as "ping-pong" training, interviewing, and others;
→ Using asynchronous or synchronous training to establish a strong and reliable connection between educator and learner;
→ The final step is the assessment of the learners; an open circle of mutual assessment can also be organised in the group.

The observance of the stages and the adjustment of the methods depend on the university lecturer and on the level of language proficiency of the students or third parties. The objective is for students to comply with the rules and regulations and acquire routine habits. In this case, intercultural peculiarities should not be taken into account either.

The connection between rules and English language teaching

In English language textbooks and manuals, rules are taught and exercises are offered to reinforce these rules as a statement. They are compatible with the laboratory rules, regardless of the type of laboratory. Here, we share experience from foreign language safety training for students in electrical engineering specialties and those taking a degree in oil and gas drilling and extraction. Through planned exercises, on their own, students can consolidate knowledge not only in a foreign language, but also memorise the rules necessary for visiting laboratories, companies, industrial enterprises or when doing field work.

At the **elementary level** of English language acquisition, safety rules when working with electricity are introduced by studying the modal verbs *must, must not (mustn’t), have to, ought to, should, need, can, can’t* in their combination with the infinitive of the verb (Abbs and Freebairn, 1992; Frendo and Bonamy, 2011, 2012).

The following section offers basic examples of sentences to be translated from Bulgarian into English. Those can be paraphrased according to the students' specialties and their level of English proficiency. The examples include variations that require the use of grammar structures mastered in **higher levels** of foreign language learning, such as:

- the Passive Voice;
- a complex sentence with a subordinate part in its manifestation as Subjunctive Mood in personal and impersonal constructions;
- the modal verb should + the Perfect Infinitive for expressing criticism on past actions.

Here is a list of 11 training sentences and their translation into Bulgarian:

1. *Настоявам да пишете протоколите си редовно*.
   This sentence is translated as follows:
   → I insist that you write your minutes regularly.
   A possible variant could be the change of the verbal form with a phrasal verb when phrasal verbs are introduced at level A2–B1, as in:
   1.a. *Настоявам да попълвате протоколите си редовно.*
   → I insist that you fill in your minutes regularly.
   or
   1.b. *Настоявам да предавате протоколите си редовно.*
   → I insist that you hand in your minutes regularly.
2. *Наредиха ни да тръгнем навреме.*
   English proficiency level A1-A2 implies a possible literal translation which is the closest to the source language:
   → They ordered us to leave on time.
   English proficiency level B1-B2 implies two other possible ways of translating:
   2.a. through passivisation
   → We were ordered to leave on time.
   or
   2.b. by means of the Subjunctive Mood
   → They ordered that we leave on time.
3. *Желателно е да се консултирате предварително относно изискванията.*

→ It is desirable that you consult beforehand regarding the rules.

4. *Естествено е да се интересувате от правилата за работа в електротехническа лаборатория.*
   → It is natural that you be interested in the rules for working in an electrical laboratory.
   → It is natural for you to be interested in the rules for working in an electrical laboratory.
5. *Необходимо е да се направят тестове, за да се провери изправността на апаратурата.*
   → It is necessary that you do tests to check the faultless work of the apparatus.
   → The faultless work of the apparatus should be checked through tests.
   → You should check the faultless work of the apparatus.
6. *Изисквам да спазвате правилата за безопасност в химическа лаборатория.*
   → I insist that you observe the safety rules when working in a chemistry laboratory.
   → You should observe the safety rules when working in a chemistry laboratory.
   → The safety rules must be observed when working in a chemistry laboratory.
7. *Предлагам да не обсъждате подробностите от срещата.*
   → I suggest that you not discuss the details of the meeting.
   → It is not needed to discuss the details of the meeting.
8. *Препоръчаха ни да се запознаем с правилника за провеждане на експерименти с опасни материали*.
   → It was recommended that we get acquainted with the Regulations for Conducting Experiments with Hazardous Materials.
   → We were recommended to get acquainted with the Regulations for Conducting Experiments with Hazardous Materials.
9. *Уговорихме се те да получат правилника разпечатан*.
   → We arranged that they receive the Regulations printed.
   → We arranged that they be handed out the Regulations printed.
   → The printed Regulations were handed out to them.
10. *Тя се съгласи да се преведе правилника, за да им се раздаде той в разпечатан вид*.
    → She agreed that the Regulations be translated so that they should be handed out printed.
11. *Работникът на платформата е трябвало да използва функцията против люлеене, за да има контрол над товара.*
    → The roustabout should have used an anti-sway system to control the load.
    [Meaning: but they did not and the load swung to the left and right and posed a serious threat].

This example is specifically from the field of English language training for drilling engineers (Frendo and Bonamy, 2011, 2012).

Conclusion

The article examines the latest trends in globalisation and diversification of youth communication in Europe. To avoid the observed slowdown of these processes in the field of education, programmes such as "Erasmus+" have been introduced and the Alliance of European Universities for Foreign Language Training has been created. Various experiments show that there are cases in which rigour is necessary in teaching English, in order to comply with established rules. Such cases are work in the production area, or in electrical, chemical, gas, and other technical laboratories. They are typical of the training of engineers at a university, for example at the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski". In these cases, the management of soft skills and intercultural features should not apply.

For this purpose, foreign language teaching techniques have been proposed. Recommendations have been given for diversifying the examples according to the students' specialties. We believe that the latter is a prerequisite for quality preparation and education of students not only at UMG "St. Ivan Rilski", but in other technical universities likewise.

The authors' subsequent scientific interest is the research aimed at improving students' soft skills and their ability to express conditions.

References

Abbs, B. & Freebairn, I. (1992). *Developing Strategies*, *Students' Book.* Sofia, Bulgaria: Prosveta, Longman

BDS 14299:1989. [Accessed: Dec. 19, 2025]. Available at: https://bds-bg.org/en/project/show/bds:proj:18589

BDS EN 12259-1:1999+A1:2001/A3:2006. [Accessed: Dec. 19, 2025]. Available at: https://bds-bg.org/en/project/show/bds:proj:51015

BDS EN 50160:2023. [Accessed: Aug. 15, 2025]. Available at: https://bds-bg.org/en/project/show/bds:proj:112738

Evstatiev, B., Hristova, T. & Gabrovska-Evstatieva, K. (2022). Investigation of Engineering Students' Attitude towards Virtual Labs during the COVID-19 Distance Education. *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, 373–384. doi: 10.18178/ijeetc.11.5.373-384

Frendo, E. & Bonamy, D. (2011). *English for the Oil Industry 1*. Pearson

Frendo, E. & Bonamy, D. (2012). *English for Oil and Gas 2*. Pearson ELT

Gogolin, I. (2002). Linguistic and Cultural Diversity in Europe: A Challenge for Educational Research and Practice. *Eur. Educ. Res. J.*, *1*(1), 123–138, Jan. 2002, doi: 10.2304/eerj.2002.1.1.3

Hladik, J. & Jadama, L. M. (2016). Multicultural Competence of Helping Profession Students: Cross-cultural Comparison between Europe and Africa. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 217, 669–678, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.sbspro.2016.02.117

Hristova, T., Gabrovska-Evstatieva, K. & Evstatiev, B. (2021). Prediction of engineering students' virtual lab understanding and implementation rates using SVM classification. *J. E-Learn. Knowl. Soc.*, Jul. 2021, 62-71. doi: 10.20368/1971-8829/1135420

Ivanov, K. M., Varbov, T. K., Petrov, P. K. & Velev, G. T. (2020). Influence of Led Bulbs on Electromagnetic Compatibility Parameters. *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, Ruse, Bulgaria: IEEE, Nov. 2020, 1–6. doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279086

Kjellgren, B., Taylor, D., & Van Der Laan, M. Serrano (2022). Struggling at the core: multilingualism and multiculturalism in a European University Alliance. *Towards a new future in engineering education, new scenarios that European alliances of tech universities open up*, Universitat Politècnica de Catalunya, Sep. 2022, 1260–1273. doi: 10.5821/conference-9788412322262.1297

Makedonska, D., Vladkova, B. & Kostadinova, N. (2025). Testing the Water Distribution of Fire Suppression Nozzles. *2025 10th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE& AE)*, Stara Zagora, Bulgaria: IEEE, Nov. 2025, 1–6. doi: 10.1109/EEAE65901.2025.11273690

Mitkov, V., Georgiev, L. & Lakov, N. (2022). Proizvodstvo na elektricheska i toplinna energiya ot priroden gaz. *FNTS*, Sofiya, *28*, 87–91

Nicora, F., Bologna, O. & McLoughlin, L. (2022). Open Educational Resources for Online Language Teacher Training Conceptual Framework and Practical Implementation. *Int. J. Integrating Technol. Educ.*, 11(3), Sep. 2022, 1–18. doi: 10.5121/ijite.2022.11301

Petrov, P., Velev, G., Ivanov, K. & Varbov, T. (2022). Assessment of the Electrical Parameters of the Human Body in the Analysis of Severe Electrical Injuries. *2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, Veliko Tarnovo, Bulgaria: IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/CIEES55704.2022.9990795

Petrov, P., Velev, G., & Ivanov, K. (2023). Analytical determination of transient current flowing through a human in contact with conductive objects under high voltage power lines. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, *1156*(1), p. 012013, Apr. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1156/1/012013

Radev, Y. & Boyadzhiev, M. (2023). Feasibility Analysis of Hydrogen Production from Seawater. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”,* 66, 113–118

Užpalienė, D. & Vaičiūnienė, V. (2012). ERASMUS Students' Experiences in Linguistic Diversity and Multicultural Communication. *Verbum*, *3*, 101–113, Feb. 2012, doi: 10.15388/Verb.2012.3.4973

Varbov, T., Velev, G. & Ivanov, K. (2023). Study of vertically mounted photovoltaic modules and their influence on the production of electrical energy in free-standing photovoltaic systems using PVGIS-CMSAF. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, *1156*(1), p. 012014, Apr. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1156/1/012014

Vladkova, B. (2020). Best practices to improve construction site safety, in the specific conditions of processing plant building. *MATEC Web Conf.*, *305*, p. 00014, doi: 10.1051/matecconf/202030500014

Vlaykova, O., Boyadzhiev, M. & Georgiev, L. (2024). Influence of hydrogen content in gas mixtures when determining the compressibility factor. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, Sofia, Bulgaria, 97–101.

READINESS OF STUDENTS AND LECTURERS TO USE ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Kostadin Taligadzhiev, Desislava Simeonova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: kostadintaligadziev@gmail.com; desysimeonova@mgu.bg

ABSTRACT. This paper analyses the readiness of students and lecturers to use artificial intelligence (AI) tools in the educational process. The study is based on an anonymous survey of 87 respondents, including 79 students and 8 lecturers from engineering and technical courses of study. It examines awareness, frequency of use, trust in AI-generated information, perceived benefits, main concerns, and the conditions under which respondents would support official institutional integration of AI. The results show frequent practical use of AI and a positive attitude toward its role in preparation, explanation, and understanding of educational content. At the same time, respondents remain cautious about the reliability of the information generated, academic ethics, data protection, and the risk of excessive dependence on automated answers. The main conclusion is that AI should be introduced in the university environment through an official but controlled framework based on training, clear rules, reliable tools, and support from lecturers.

Key words: artificial intelligence, higher education, digital literacy, academic ethics, technology readiness.

ГОТОВНОСТ НА СТУДЕНТИТЕ И ПРЕПОДАВАТЕЛИТЕ ДА ИЗПОЛЗВАТ ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ ЗА ОБРАЗОВАТЕЛНИ ЦЕЛИ

Костадин Талигаджиев, Десислава Симеонова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата статия анализира готовността на студентите и преподавателите да използват инструменти на изкуствения интелект (ИИ) в образователния процес. Изследването е базирано на анонимна анкета сред 87 респонденти - 79 студенти и 8 преподаватели в инженерно-технически специалности. Изследването проследява нивото на запознатост, честотата на употреба, степента на доверие, основните притеснения и условията, при които респондентите биха подкрепили официално институционално внедряване на ИИ. Резултатите показват висока практическа употреба на ИИ, положителна нагласа към неговото използване за подготовка и разбиране на учебно съдържание, но и ясно изразена предпазливост по отношение на достоверността на генерираната информация, академичната етика и риска от прекомерно разчитане на автоматизирани отговори. Основният извод е, че внедряването на ИИ в университетска среда следва да бъде официално, но контролирано чрез обучение, ясни правила, надеждни инструменти и преподавателска подкрепа.

Ключови думи: изкуствен интелект, висше образование, дигитална грамотност, академична етика, готовност за технологии.

Въведение

Навлизането на инструментите на изкуствения интелект в образованието е една от най-съществените технологични трансформации в академичната среда през последните години. По данни на Националния статистически институт (НСИ) от 2025 г. 50% от лицата на възраст 16-24 години в България използват приложения с изкуствен интелект (ИИ) – най-високият дял измежду всички възрастови групи, като 5,2% от анкетираните се консултират с ИИ изрично за учебни цели в рамките на формалната образователна система (НСИ, 2025). Концепцията за развитието на изкуствения интелект в България до 2030 г. поставя акцент върху знанията и уменията за развитие и използване на ИИ, повишаването на осведомеността и изграждането на доверие в обществото (МТИТС, 2020).

Стратегията за развитие на висшето образование в Република България 2021-2030 г. акцентира върху необходимостта от адаптиране на висшите училища към процесите на дигитализация, модернизиране на методите на преподаване и отговор на потребностите на новите поколения обучаеми (Народно събрание, 2021). В научната литература темата се обвързва с понятието „грамотност по изкуствен интелект“, което включва знания, умения и нагласи за критично, отговорно и ефективно използване на системи с изкуствен интелект в образователен и професионален контекст.

Същевременно през 2024 г. Министерството на образованието и науката публикува документ „Насоки за използване на изкуствен интелект в образователната система“, който предоставя първите официални препоръки за отговорно и етично използване на ИИ в българското образование, с което поставя началото на регулаторната рамка в страната (МОН, 2024).

Във висшето образование ИИ се позиционира едновременно като инструмент за повишаване на ефективността и като източник на нови предизвикателства, свързани с академичната етика, критическото мислене и качеството на овладяване на учебния материал. Липсват достатъчно широки емпирични изследвания, които да измерват готовността на самите ползватели - студенти и преподаватели - да приемат и системно да използват ИИ. Тази празнота поставя необходимостта от собствено емпирично проучване.

Цел и задачи на изследването

Целта на настоящото изследване е да се установи и анализира доколко студентите и преподавателите от инженерно-техническите специалности са готови да използват инструментите на ИИ за образователни цели, какви са най-честите употреби, кои ползи се възприемат като най-съществени и кои рискове ограничават доверието към тези технологии.

За постигането й са формулирани следните задачи:

1. Да се измери степента на запознатост и честотата на употреба на ИИ.
2. Да се установи нивото на доверие в ИИ-генерирана информация.

3. Да се идентифицират основните възприемани ползи и притеснения.
4. Да се измери нивото на подкрепа за официално институционално внедряване.
5. Да се очертаят необходимите условия за по-ефективно използване на ИИ в учебния процес.

Основно изложение

Методология и структура на извадката

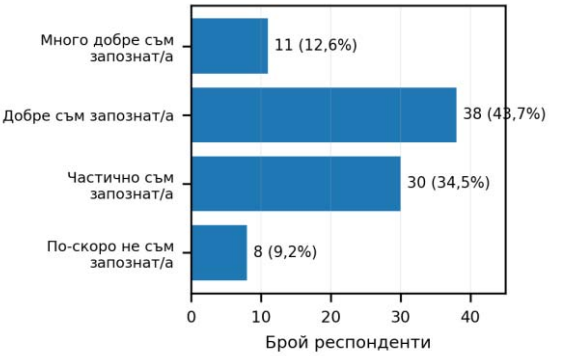
Изследването е проведено чрез електронна анкета, разпространена сред студенти и преподаватели в инженерно-технически специалности на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“ в София в периода март - април 2026 г. Анкетата съдържа 23 затворени въпроса (с единичен и многократен избор) и един отворен въпрос за свободен коментар. Ограничението на изследването е неравномерното разпределение между студентите и преподавателите, което не позволява надежден сравнителен анализ между двете групи. Получени са 87 валидни отговора. Структурата на извадката (фиг. 1) е силно доминирана от студенти, което е логично с оглед на разликата в числеността на двете групи в университетската среда. Преобладаващите специалности на респондентите са „Компютърни технологии в инженерната дейност“ (КТИД), „Маркшайдерство и геодезия“ (МиГ) и „Автоматика, информационна и управляваща техника“ (АИУТ).

Фиг. 1. Структура на извадката (n=87)

Анализ на резултатите

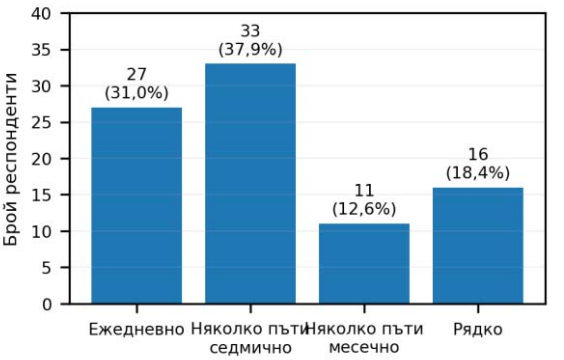
Запознатост и честота на използване на ИИ

Данните показват, че използването на ИИ вече е част от учебната практика на повечето анкетирани. Резултатите (фиг. 2) показват, че 79 от 87 респонденти, или 90,8%, оценяват себе си като поне частично запознати с инструментите на ИИ за обучение. Делът на тези, които заявяват висока компетентност („добре“ или „много добре“ запознати), е 56,3%. Тези стойности са в съответствие с обобщените от НСИ данни относно възрастовата група 16-24 години и подкрепят тезата, че въпреки относителната новост на технологията, поколенческата база за нея вече е изградена.



Фиг. 2. Степен на запознатост с инструменти на ИИ за обучение (n=87)

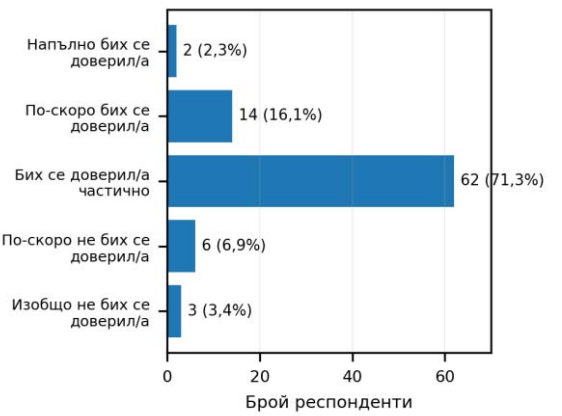
Честотата на използване (фиг. 3) допълва картината: 60 от 87 респонденти, или 69,0%, използват ИИ инструменти ежедневно или няколко пъти седмично. Делът на „рядко“ използващите е едва 18,4%. Този резултат подкрепя първата работна теза – у респондентите вече е изградена практика на постоянна работа с ИИ, която изпреварва официалното институционално внедряване.



Фиг. 3. Честота на използване на ИИ инструменти в обучението (n=87)

Доверие и критично възприемане

Високата честота на използване обаче не означава безкритично доверие. Фигура 4 представя ключов индикатор за зрялостта на отношението към технологията: 71,3% от респондентите биха се доверили на ИИ-генерирана информация само частично, а допълнителни 10,3% биха се отнесли скептично или биха отказали изцяло. Само 2 от 87 респонденти (2,3%) изразяват пълно доверие.



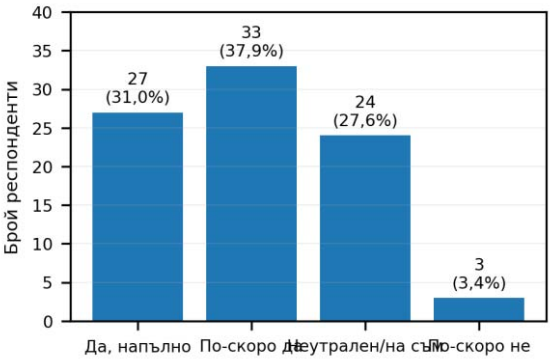
Фиг. 4. Доверие в информация, генерирана от ИИ, без допълнителна проверка (n=87)

С това се подкрепя втората работна теза: респондентите проявяват критичност, която съответства на препоръките на МОН, а именно, че ИИ е поддържащ инструмент, а не заместител на отговорността (МОН, 2024).

Този извод се подсилва и от въпроса за случаи на неточен или подвеждащ отговор, при който 87,4% от респондентите потвърждават, че са се сблъсквали с такива случаи. Това поставя пред университета задача за изграждане на умения за критична оценка на ИИ-генерирани резултати - компетентност, която е в основата на грамотността по изкуствен интелект и отговорното използване на интелигентни системи (Иванова и кол., 2020).

Подкрепа за институционално внедряване

Съчетанието на висока употреба с условно доверие предполага, че респондентите биха приветствали ясни институционални правила. Данните показват ясно (фиг. 5): 60 от 87 респонденти, или 69,0%, биха подкрепили по-широко и официално внедряване на ИИ инструменти в учебния процес („напълно“ или „по-скоро да“). Едва 3,4% се противопоставят. По-важно е, че 92,0% от респондентите смятат, че университетът трябва да предлага обучение или насоки за правилно използване на ИИ, а 65,5% биха използвали редовно или поне биха пробвали университетска платформа с вграден ИИ помощник.



Фиг. 5. Подкрепа за официално внедряване на ИИ инструменти в учебния процес (n=87)

Тези резултати са в синхрон с анализите на конференцията „Дигитална трансформация на образованието“ (Сборник, 2024), според които успешната интеграция на ИИ в обучението изисква институционален подход, а не индивидуални инициативи на отделни преподаватели.

Възприемани ползи и водещи притеснения

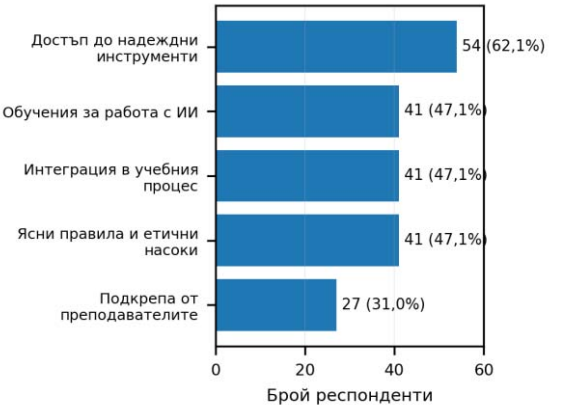
Възприеманите ползи са категорично положителни: 90,8% от респондентите смятат, че ИИ повишава качеството на подготовката за изпити и контролни („значително“ или „донякъде“), а 83,9% - че може да намали времето за подготовка. Това потвърждава тезата, че ИИ се възприема не като самостоятелен заместител на учебния процес, а като инструмент за по-бързо ориентиране, обяснение и структуриране на информация. Същевременно обаче профилът на притесненията (фиг. 6) очертава ясна тревожност, която не може да бъде пренебрегната.

Фиг. 6. Най-сериозни притеснения, свързани с използването на ИИ в образованието (n=87, многократен избор)

Двата водещи проблема са неточната или подвеждаща информация (59,8%) и намаляването на самостоятелното мислене (56,3%). Третото по значимост притеснение - липсата на умения за правилно използване (37,9%) - пряко обосновава следващия аналитичен блок.

Необходими условия за по-ефективно използване

Когато бъдат запитани какво е необходимо, за да се използва ИИ по-ефективно в университета, респондентите посочват многоизмерен пакет от условия (фиг. 7). На първо място е достъпът до надеждни инструменти (62,1%), следван от ясни правила и етични насоки (47,1%), интеграция в учебния процес (47,1%) и обучения за работа с ИИ (47,1%). Подкрепата от страна на преподавателите е посочена от 31,0% от анкетираните.



Фиг. 7. Необходими условия за по-ефективно използване на ИИ в университета (n=87, многократен избор)

Тези резултати ясно показват, че ползвателите не очакват от ИИ да реши автоматично образователните проблеми - те очакват институционална рамка, в която ИИ да бъде интегриран отговорно. С това се потвърждава фундаменталното послание на Насоките на МОН: технологията е умножител на ефективността, но само когато е придружена с яснота, етика и компетентност (МОН, 2024).

Заключение

Анализът на 87 анкетирани студенти и преподаватели позволява да бъдат направени пет основни извода:

1. Студентите и преподавателите в изследваната извадка показват висока начална готовност за използване на ИИ. Употребата вече не е единичен експеримент, а редовна практика за значителна част от респондентите.
2. Доверието към ИИ е ограничено и условно. Респондентите разпознават риска от неточна информация и от отслабване на самостоятелното мислене, което означава, че критическата проверка трябва да бъде задължителен елемент от всяка образователна употреба на ИИ.
3. Резултатите ясно насочват към нужда от институционална политика: обучение, етични правила, надеждни инструменти и интеграция в учебния процес. Липсата на правила би увеличила риска от неравнопоставеност, академична неетичност и неефективна употреба.
4. Притесненията са специфични и идентифицируеми. На първо място са неточността на информацията и рискът от намаляване на самостоятелното мислене. Това са поведенчески, а не технологични рискове, и могат да бъдат преодолени чрез педагогически интервенции.
5. Изследването не позволява генерални заключения за всички висши училища, но очертава тенденция: наблюдава се изразена готовност, която трябва да бъде подкрепена с едновременно надеждни инструменти, ясни правила, интеграция в учебния процес и обучения. Никой от тези елементи не е достатъчен сам по себе си.

Препоръки

На база на формулираните изводи и в съответствие с Насоките на МОН (2024) се предлагат следните препоръки:

1. Изготвяне на университетска политика за допустимо използване на ИИ - публичен документ, дефиниращ кои инструменти, в кои дисциплини и за кои дейности са допустими, как се декларира тяхното използване и какви санкции се прилагат при нарушения. Препоръчва се документът да бъде разработен в съответствие с Насоките на МОН и да бъде ревизиран ежегодно.
2. Разработване или внедряване на университетски ИИ помощник. Платформата следва да бъде съобразена с конкретни дисциплини, да работи с проверени учебни материали и да насърчава самостоятелното учене, а не директното преписване на готови отговори. Подобни инициативи за развитие на изкуствен интелект в академична среда се свързват с дейността на INSAIT.
3. Въвеждане на кратки обучения по грамотност по изкуствен интелект. Обученията трябва да включват формулиране на качествени въпроси, проверка на факти, работа с източници, защита на личните данни, етична употреба и ограничения на генеративните модели.
4. Подготовка на преподавателите за работа с ИИ. Преподавателите трябва да разполагат с примери за задания, при които ИИ е допустим помощник, както и с модели за оценяване, които изискват аргументация, междинни стъпки, устна защита или рефлексия.
5. Интегриране на форми на оценяване, устойчиви на неправомерно използване на ИИ - устни изпити, защити на проекти, лабораторни и практически задания, при които прякото копиране от ИИ е невъзможно или лесно установимо. Това отговаря на най-сериозните притеснения за академична етичност, изразени от 25,3% от респондентите.
6. Разширяване на изследването. Следваща стъпка е събиране на по-голяма реална извадка от всички специалности в МГУ „Св. Иван Рилски“, включително по-балансиран брой преподаватели, за да се направят надеждни сравнения между групите.

Литература

Иванова, К. и колектив. (2020). Изкуственият интелект в и за образованието. Институт по математика и информатика, Българска академия на науките. https://www.math.bas.bg/infres/~ivanova/KMI-papers/2020-ERIS-Ivanova_et_al.pdf

Министерство на образованието и науката. (2024). Насоки за използване на изкуствен интелект в образователната система. София. https://www.mon.bg/news/mon-s-nasoki-za-poveche-informiranost-na-uchitelite-pri-izpolzvane-na-izkustven-intelekt/

Министерство на транспорта, информационните технологии и съобщенията. (2020). Концепция за развитието на изкуствения интелект в България до 2030 г. „Изкуствен интелект за интелигентен растеж и просперираща демократично общество“.

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“. (2024). Учебни планове за специалности КТИД, МиГ и АИУТ. https://www.mgu.bg

Народно събрание. (2021). Стратегия за развитие на висшето образование в Република България за периода 2021-2030 г. София.

Национален статистически институт. (2025). Използване на информационни и комуникационни технологии от домакинствата и лицата 2025. Данни за използване на изкуствен интелект по възрастови групи. София: НСИ.

Сборник доклади. (2024). Изкуственият интелект във висшето образование. Втора национална научно-практическа конференция „Дигитална трансформация на образованието“, с. 89. https://www.conf-dte.bg/docs/2024/p-89.pdf

Софийски университет „Св. Климент Охридски“. (2022). Откриване на Института за компютърни науки, изкуствен интелект и технологии (INSAIT). Официално съобщение. https://www.uni-sofia.bg

CHALLENGES TO THE SUSTAINABILITY OF COMPANIES IN THE MINERAL AND RAW MATERIALS INDUSTRY

Viktoria Todorova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, viki_todorova.92@abv.bg

ABSTRACT. This publication examines the challenges facing the sustainability of enterprises in the mineral and raw materials industry. The purpose of this study is to analyse the key challenges to the enterprises in this sector. The risk factors of the mining industry in the country are examined in detail. Some conclusions are summarised for the possibility of their management in the context of sustainable development.

Key words: mineral and raw materials industry, sustainability, enterprises, risk management, challenges.

ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВАТА ПРЕД УСТОЙЧИВОСТТА НА ПРЕДПРИЯТИЯТА ОТ МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

Виктория Тодорова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Тази публикация разглежда предизвикателствата, пред които е поставена устойчивостта на предприятията от минерално-суровинната индустрия. Целта на настоящето изследването е анализ на ключовите предизвикателства, на които са изложени предприятията от този отрасъл. Разгледани са обстойно рисковите фактори на минната индустрия в държавата. Обобщени са някои изводи за възможност на тяхното управление в контекста на устойчивото развитие.

Ключови думи: минерално-суровинна индустрия, устойчивост, предприятия, управление на риска, предизвикателства.

Въведение

Минерално-суровинната индустрия е една от най-добре развиващите се през последните години, което я поставя сред водещите сектори в страната. Към днешна дата голяма част от българските предприятия в тази индустрия работят успешно и рентабилно, прилагайки добри практики за проучване, добив и преработка. Устойчивото развитие на тази индустрия изисква баланс между ефективността на икономиката, грижата за околната среда и корпоративната социална отговорност на предприятията към обществото. Минерално-суровинната индустрия се характеризира със специфични рискове, което прави финансовата стабилност фундаментална за оцеляването и развитието на бизнеса.

Литературен преглед

Сред основополагащите определения за понятието ,,устойчивост“ е това на Брундтланд. В своя доклад, той дефинира най-общо понятието като такова ,,което отговаря на нуждите на настоящето без да излага на риск способността на бъдещите поколения да задоволяват своите собствени нужди“ (Brundtland, G. 1987). В България редица автори анализират в своите трудове понятието устойчиво развитие. Денев и колектив го разглеждат като равенство между настоящи и бъдещи поколения (Денев в др., 2010). Росица Пенчева и Пенчо Пенчев се фокусират върху икономическото и социалното равновесие. А Мария Коцева изследва „Зелената алтернатива“ и пътищата за прилагане на устойчиви политики в публичната администрация.

Минерално-суровинната индустрия в България

Ресурсите и суровините, които се генерират от минерално-суровинната индустрия, се използват широко в промишлеността, енергетиката, строителството, медицината, електрониката и други. Рудни и нерудни минерали, както и горива, са важна и неразделна част от нормалното функциониране на националната и световната икономика. Бързите темпове на развитие на индустрията в нашата страна дава силен тласък на социално-икономическото ни развитие. Налице е подобрение в благосъстоянието на общините, на чиято територия се добиват минерални ресурси, а именно: Кърджали, Челопеч, Смолян, Панагюрище, Етрополе, Мадан и др. Непрекъснатото търсене и потребление на огромни количества невъзобновяеми и възобновяеми ресурси, обаче създава предпоставки за нарушаване на екологичния баланс. Това повдига въпроса за прилагане на концепция за устойчиво развитие на минерално-суровинния сектор.

Концепция за устойчиво развитие в минерално-суровинната индустрия

Концепцията за устойчиво развитие в българската минерално-суровинна индустрия се базира на баланса между икономическата ефективност, екологическата отговорност и социалния просперитет (https://bmgk.bg/устойчиво развитие/).

Ключовите показатели за устойчиво развитие могат да се обобщят в три групи:

1. Икономически.
2. Социални.
3. Екологични.

Заетост и брутен вътрешен продукт

По официални данни на Българската минно-геоложка камара (БМГК), минерално-суровинната индустрия осигурява около 5% от БВП на страната (https://bmgk.bg/).

Индустрията осигурява заетост на 120 000, косвено свързани и около 25 000 пряко свързани. (Димов и др., 2020). Тези данни ни дават право да твърдим, че минерално-суровинната индустрия е гръбнакът на нашата икономика, защото без добив на суровини, въглища и др. не можем да съществуваме. Освен това, индустрията осигурява предпоставки за инвестиции в страната, високи заплати за своите служители, което подпомага развитието на тези региони, както и предотвратява обезлюдяване на малките населени места. Като цяло, успешното развитие на този сектор в страната създава условия и предпоставки за оставане на млади квалифицирани кадри в България.

Корпоративна социална отговорност

През последните години се наблюдава целенасочено внимание към корпоративната социална отговорност (КСО) от все повече минни компании в България. Това естествено води до осъзнателност и отговорност за развитие на техните служители. Социалната отговорност включва както икономически, така и екологични отговорности. В по-широк смисъл корпоративната социална отговорност води до създаване на по-висок стандарт на живот за хора в и извън компанията, като същевременно поддържа и рентабилността на компанията. По своята същност концепцията за устойчиво развитие разглежда едновременно стратегията за успешен бизнес и целеустремен положителен ефект върху цялото общество. Целта е достигане на толеранс между хората в компанията, както и участие в инициативи в тази насока. Сред най-важните усилия е това да опазим околната среда. Според Петрова и колектив, успешна практика е да се рециклират ненужни консумативи (тонери, хартия, стъкло, пластмасови опаковки и др.), да се въведат мерки за енергийна ефективност и тяхното третиране. Друга ключова роля на КСО е служителите да търсят от работодателите не само добро заплащане, но също и подходящи социални предимства за тях и техните семейства. По този начин, с бавни стъпки и независимо от различните си форми и проявления, корпоративната социална отговорност постепенно завладява компаниите по целия свят. Тенденцията за социалната отговорност продължава да развива триадата служител-природата-общество. Това е положителен аспект на минната индустрия и важна част от бъдещия просперитет успех на този бизнес.

Екология

Един от ключовите показатели за устойчивостта на минерално-суровинната индустрия са екологичните фактори. Акцентът е върху ограничаване на отрицателното въздействие върху околната среда, намаляване на щетите на компаниите, развиващи минна дейност и прилагане на адекватни екологични мерки, водещи до намаляване на негативното антропогенно въздействие.

Рекултивация

Рекултивацията е ключов елемент от корпоративната социална отговорност на минните компании. Тя е съвкупност от инженерно-екологични, агротехнически, лесовъдски, озеленителни и други дейности, насочени към възстановяване на нарушени терени, почвена покривка и други (Петрова, В., 2018). Екологичната оценка и разходите за рекултивация са сред слабостите на минната индустрия не само в България, но и в глобален аспект. От икономическа гледна точка те са необходими, но са свързани с големи финансови и времеви разходи, но пък съществени, тъй-като имат за цел намаляване антропогенното въздействие върху природата.

Управление на риска в контекста на устойчивото развитие на предприятията от минерално-суровинната индустрия

Правилната стратегия за устойчиво развитие в минерално-суровинния отрасъл може да гарантира конкурентно предимство на предприятието във всички икономически сектори. Тук под управление на риска разбираме внедряване на устойчиви практики, в това число оптимизация на доставки, енергийни технологии и др., чиято крайна цел е намаляване на разходите и повишаване на ефективността.

Предизвикателствата пред устойчивото развитие на минерално-суровинната индустрия илюстрираме чрез управление на риска в контекста на:

1. Климатичните рискове, които разглеждаме в две измерения:
   - физически – метеорологичните явления (бури, наводнения) могат да повредят инфраструктурата, което да доведе до прекъсване на работните процеси;
   - преходни рискове – тук се има предвид предизвикателствата, свързани с внедряване на нисковъглеродна икономика.
2. Недостиг на ресурс – с акцент върху критичните суровини и природните ресурси, които са жизненоважни за производството.
3. Моделът за управление на предприятията за двойната същественост изисква компаниите да анализират:
   - как околната среда влияе върху фирмата;
   - как дейността на фирмата влияе върху околната среда и обществото.
4. Устойчивост при веригата за доставки споделена отговорност като част от управлението на риска.
5. ,,Гъвкавост“ срещу "смекчаване" (една система е истински устойчива само ако успее да излезе от кризата по-силна и по-добре организирана от преди)

Изводи и препоръки

Преодоляването на горе-цитираните рискове, изисква от предприятията задълбочено анализиране и оценка както на финансовите рискове, породени от климатичните промени, така и на въздействието на собствената си дейност върху обществото и околната среда. Това включва мониторинг на веригата за доставки и гарантиране правата на работещите и екологичните стандарти, за да се избегнат правните санкции.

В крайна сметка, устойчивото развитие не се изчерпва само със смекчаване на вредите. То цели изграждането на организационна гъвкавост и интелигентност, които позволяват на системата да се възстановява бързо от икономически и природни сътресения. Чрез непрекъснат процес на идентифициране, анализ и мониторинг на рисковете, компаниите превръщат екологичния преход в стратегическо предимство, осигурявайки си доверието на инвеститорите и „социален лиценз“ за дългосрочна работа.

Заключение

В заключение следва да отбележим, че преодоляването на предизвикателствата пред устойчивото развитие на предприятията от минерално-суровинния отрасъл, най-общо се свеждат до: повишаване на енергийната и ресурсната ефективност и внедряване на иновации и модерни технологии за повишаване на конкурентоспособността; кръгова икономика и зелени технологии с акцент върху минимизиране на екологичното въздействие чрез екологосъобразни практики и рекултивация на нарушените терени; осигуряване на максимални социално-икономически ползи; безопасност на труда и развитие на човешкия капитал; укрепване репутацията на бранша; създаване на стабилна правна рамка и ефективни взаимоотношения със заинтересованите страни; дългосрочно планиране и проучване на подземните богатства за гарантиране на суровинната независимост и създаване на дългосрочни, динамични и ефективни взаимоотношения със заинтересованите страни.

Бъдещето на минерално-суровинния сектор зависи от способността му да трансформира икономическата печалба в дългосрочен социален капитал. Корелацията между тях балансира оперативната ефективност и отговорността към бъдещите поколения.

Литература:

Денев, Б., Григорова, И., Велев, В., Нисков, И. (2010). Модел на дълготрайните активи за устойчиво развитие в минната индустрия. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, том 53, св. IV, София, с. 39–52.

Димов, Е., Бакърджиева, Р., Стратиев, Н. (2020). Минната промишленост и рециклирането на суровини като важен елемент от българската икономика. *Journal of Mining and Geological Sciences, том 63*. София.

Митев, В. (2004). Видове риск и методи за оценка на риска при инвестиционни проекти в минната индустрия. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, том 47, св. IV, София, с. 49–53.

Митев, В. (2014). *Управление на иновациите и инвестициите*. Изд. „Авангард Прима“, София, с.159.

Пенчев, П., Пенчева, Р. (2017). Устойчивото развитие – теоретични и практически измерения. Годишник на Стопанска академия „Д. А. Ценов“, том CXX, Свищов.

Петрова, В. (2018). Изследване и оценка на корпоративната социална отговорност в минната индустрия. (Извадка от дисертационен труд), МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Петрова, В., Костова, Д., Велев, В. (2012). Корпоративната социална отговорност – фактор за устойчиво развитие. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, том 55, св. IV Хуманитарни и стопански науки, София, с. 49–53.

Brundtland,G., (1987). Our Common Future - Call for Action. – *Environmental Conservation, Vol. 14, No. 4* (Winter 1987), pp. 291-294.

https://bmgk.bg

https://bmgk.bg/устойчиво развитие/

SOCIALLY RESPONSIBLE INVESTMENTS AS A FACTOR FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF COMPANIES IN THE MINERAL AND RAW MATERIALS INDUSTRY

Demian Ujakov, Boryana Trifonova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: d.ujakov@mgu.bg; boryana.trifonova@mgu.bg

ABSTRACT. This article analyses the role of aggregate investments of enterprises in the mineral and raw materials industry in human capital and corporate social responsibility as factors for the sustainable socio-economic development of the sector. It examines the main directions and dynamics of an enterprise’s investments in training, occupational safety and the health of employees, as well as in social and environmental projects for the regions in which they operate. Special emphasis is placed on the relationship between the level of these investments and key performance indicators of the sector. Based on the analysis, the conclusion is drawn that a strategic approach to human capital development and responsible business management are the most important investments that ensure long-term competitiveness and social stability of the mining industry in Bulgaria.

Key words: sustainable development, social indicators, human resources, corporate social responsibility.

СОЦИАЛНО-ОТГОВОРНИТЕ ИНВЕСТИЦИИ КАТО ФАКТОР ЗА УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯТА ОТ МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

Демян Ужаков, Боряна Трифонова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящата статия се анализира ролята на съвкупните инвестиции на предприятията от минерално-суровинната индустрия в човешки капитал и корпоративна социална отговорност като фактори за устойчивото социално-икономическо развитие на сектора. Разглеждат се основните направления и динамиката на вложенията на предприятията в обучението, безопасността на труда и здравето на служителите, както и в социални и екологични проекти за регионите, в които оперират. Специален акцент е поставен върху връзката между нивото на тези инвестиции и ключовите показатели за ефективност на сектора. Въз основа на анализа е направен изводът, че стратегическият подход към развитието на човешкия капитал и отговорното управление на бизнеса са най-важните инвестиции, които осигуряват дългосрочна конкурентоспособност и социална стабилност на добивната промишленост в България.

Ключови думи: устойчиво развитие, социални показатели, човешки ресурси, корпоративна социална отговорност.

Въведение

В реалностите на устойчивото развитие, дейността на съвременните компании е непрекъснато свързана с инвестиции в корпоративната социална отговорност (КСО), както и с постоянен мониторинг на нивото на човешкия капитал и на социалните инвестиции в работната сила. Устойчивото развитие на предприятията от минерално-суровинната индустрия се основава на икономическа ефективност, социална отговорност и екологична безопасност. Инвестициите в човешкия капитал (обучение, охрана на труда, намаляване на текучеството) и корпоративната социална отговорност пряко влияят върху процеса на икономическо развитие на предприятията, върху дългосрочната стабилност на компаниите, намаляването на оперативните рискове и укрепването на репутацията, а съответно и върху отрасъла като цяло.

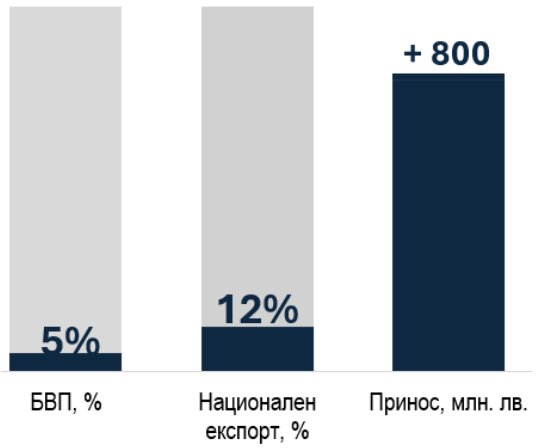
Българската минерално - суровинна индустрия осигурява за Европа 14-15 % от европейското производство на мед, 8 % на олово и 4 % на цинк, по данни от началото на 2024г. (ИПИ, 2024) Страната е на трето място в Европа по добив на мед и на четвърто място по добив на цинк. Това предопределя ролята на страната като една от най-активните „минни“ държави и нейното значение за справяне на целта на ЕС за намаляване на зависимостта на съюза от външни страни по отношение на осигуреността със суровини, определени като стратегически и критични. Според А. Хайтова и В. Петрова, критичните суровини имат системен ефект върху икономическата сигурност поради тяхната незаменимост в стратегически сектори. Електромобилите например изискват приблизително шест пъти повече минерални ресурси в сравнение с автомобилите с двигатели с вътрешно горене, което означава, че декарбонизацията на транспорта пренася материалната интензивност към добивния сектор. За производството на 1 MW вятърна енергия са необходими значително по-големи количества мед, редкоземни елементи и други метали в сравнение с конвенционалните енергийни технологии, което увеличава стратегическата тежест на суровинната обезпеченост. (Хайтова А., В. Петрова, 2026) Именно затова добивът на така наречените „критични суровини“ е част от стратегията за сигурност и индустриално развитие на ЕС.

Предизвикателства пред устойчивото развитие на минерално-суровинната индустрия

Минерално-суровинната индустрия е един от най-важните отрасли на националната икономика на България, който има съществен принос за развитието на страната. Тя е също така структуроопределящ и ключов доставчик на суровини за енергетиката, металургията и другите преработващи промишлености. България се нарежда сред активно развиващите се минни държави в Европа, като в ЕС отстъпва по ключови показатели само на Полша. Отрасълът обединява над 315 активни предприятия и осигурява заетост на повече от 18 000 души пряко и на около 120 000 души в сродните сектори (БМГК, 2025).

Анализирайки приноса на минерално-суровинната индустрия в икономиката на България за 2024 г. (фиг. 1), се вижда, че делът в БВП е около 5%, което е съществен показател. Делът на минерално-суровинния сектор в

националния износ е 12%, а годишните постъпления в държавния бюджет достигат 800 млн. лева.



Фиг. 1. Основен принос на минерално-суровинната индустрия в икономиката на страната за 2024 г. (НСИ, 2025)

Минерално-суровинният отрасъл в България остава най-важния сектор на националната икономика, който осигурява заетост на местното население и суровинната обезпеченост на страната. Въпреки икономическия растеж в този отрасъл, той се сблъсква с различни предизвикателства и заплахи. Въз основа на данни от национален статистически институт се направи SWOT анализ, за да се определят ключовите точки на промени на минерално-суровинния отрасъл, представени в табл. 1. (НСИ, 2025) SWOT анализът позволява да се направи анализ на вътрешната (силни и слаби страни на компанията) и външната (възможности и заплахи) среда. (Абрамов В., С. Абрамов, 2026)

Табл. 1. *SWOT-анализ на минерално-суровинната индустрия на България*

Силни страни	Слаби страни
- Богата ресурсна база - Съществен икономически принос - Високо ниво на производителност на труда - Инвестиции - Експортна ориентираност	- Висока зависимост от въглища - Намаляване на добивните обеми - Структурен дефицит в търговията с минерални суровини - Цените се определят на международните борси
Възможности	**Заплахи**
- Добив на редкоземни метали - Привличане на външни инвестиции - Един от най-важните доставчици на суровини в ЕС	- Изчерпаеми източници на добив - Несигурност на енергийната политика - Висок риск за безопасността на трудовите процеси - Зависимост от външни пазари

Проведеният SWOT анализ показва, че в България има достатъчни запаси от различни минерални суровини – както метали, така и минерални изкопаеми. Минерално-суровинната индустрия на страната остава един от ключовите работодатели, като в нея работят около 120 000 души от трудоспособното население. Тази индустрия непрекъснато се поддържа с инвестиции – както вътрешни, така и външни, необходими за повишаване на нивото на производителност на труда на работниците и модернизиране на добива. В този отрасъл се наблюдават и слаби страни, като зависимостта от въглищата, след като в страната се обмисля възможността за отказ от въглищната енергетика. Това от своя страна би оказало значително отрицателно влияние върху отрасъла на минералите и суровините. Важно е да се подчертае увеличението с 16% през 2024 г. на обема на вносните минерални ресурси, което говори за необходимостта от развитие и модернизация на местния добив на стратегически важните суровини.

Анализирайки бъдещите възможности на минерално-суровинната индустрия на България, следва да се открои добивът на редкоземни метали като най-перспективния вектор за развитие на отрасъла. Също така има споразумение за сътрудничество между Българския енергиен холдинг (БЕХ), БАН и „Мини Марица-изток“ ЕАД за извличане на критични суровини и редкоземни метали от въглищата на Маришкия басейн. (МЕ, 2026)

Въпреки това съществуват и възможни отрицателни аспекти в развитието на минерално-суровинната индустрия. Особено важен се счита изчерпаемостта на добиваните ресурси. В рамките на 15 години основните находища могат да бъдат изчерпани при запазване на настоящите темпове на добив. (Делчева А., 2025) Този факт изисква специално внимание от гледна точка на пестеливо потребление и търсене на алтернативни източници на суровини.

Несигурността на енергийната политика застрашава около 120 хил. заети в този отрасъл. А глобалната конкуренция за критични суровини, особено от страна на Китай, който контролира 60% от добива и 90% от преработката на редкоземни минерали, създава рискове за веригите на доставки.

Анализ на проведено изследване

Методологическа основа на проведеното изследване са принципите на системния, нормативния, иновационния и оптимизационния научни подходи, позволяващи да се разгледа обекта на изследване във взаимовръзка на всички негови елементи.

Обект на изследване са четири водещи предприятия от минерално-суровинната индустрия: „ДПМ Металс" АД, „Асарел-Медет" АД, „Златна Панега Цимент АД" и „Холдинг КЦМ 2000" АД. Въз основа на данни от публикуваните им отчети за 2024г. в табл. 2 са показани техните икономически показатели за дейността, като се вземат предвид разликите в мащабите на дейност в един и същ сектор, но с различна специализация.(АМ, 2024; ДПМ М.,2024; ЗПЦ, 2024; Х. КЦМ, 2024)

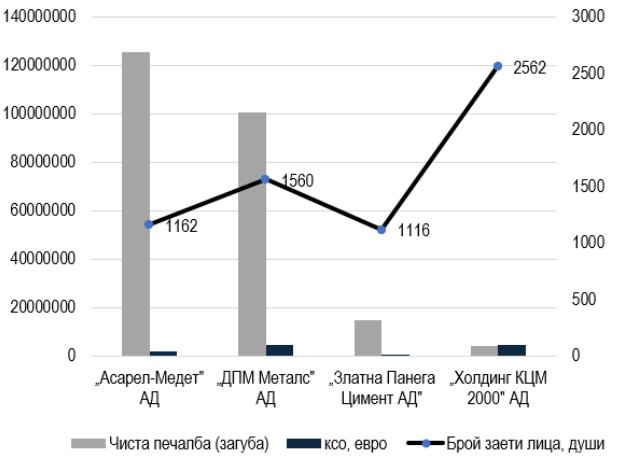
Таблица 2. *Обща характеристика на предприятия от минерално-суровинната индустрия на България за 2024г.*

Показател	„Асарел-Медет" АД	„ДПМ Металс" АД	„Златна Панега Цимент“ АД	„Холдинг КЦМ 2000" АД
Приход, евро	391 428 702	211 716 253	431 499 670	13 223 541
Чиста печалба (загуба), евро	125 317 128	100 469 877	14 599 939	4 233 496
Брой зае-ти лица, души	1162	1 560	1116	2562
КСО, евро	2 057 218	4 434 560	104 573	4 708 073
Рентабил ност, %	32,0	47,5	3,4	1,0
Произв. на труда, евро/чов.	336 858	135 716	386 648	161 289

Анализирайки представените по-горе данни, може да се забележи различно ниво на рентабилност при компаниите в един и същи отрасъл. Най-високото ниво на рентабилност за 2024 г. – 47,5% – се наблюдава при „ДПМ Металс" АД, с производителност на труда 135,7 хил. евро на работник. На второ място е „Асарел-Медет" АД с рентабилност от 32,0% и производителност на труда 336,9 хил. евро. Въпреки най-високият показател за приходи, по-ниска е рентабилността (3,4%) при предприятие „Златна Панега Цимент АД", но то демонстрира най-висока производителност на труда на един работник – 386,6 хил. евро. „Холдинг КЦМ 2000" АД показва значителни приходи, но нетната му печалба е малка, а рентабилността е едва 1,0%, което говори за висок дял на оперативните разходи спрямо приходите. Както се вижда от представените данни, добивът на благородни метали генерира значителна нетна печалба („ДПМ Металс" АД, и „Асарел-Медет" АД), докато производството на промишлени строителни материали е на границата на рентабилност („Златна Панега Цимент“ АД), а производството на цветни метали дава минимална рентабилност („Холдинг КЦМ 2000" АД).

Микроикономическият анализ на ключови предприятия от минерално-суровинната индустрия на България разкрива безусловната им значимост както за самата индустрия, така и за националната икономика като цяло. Този сектор на икономиката на страната обаче е тясно свързан с концепцията за устойчиво развитие и предприятията от сектора са длъжни да се придържат към тази концепция. В този контекст е важно да се разгледат социално отговорните инвестиции като катализатор за устойчиво развитие на предприятията от минерално-суровинната индустрия.

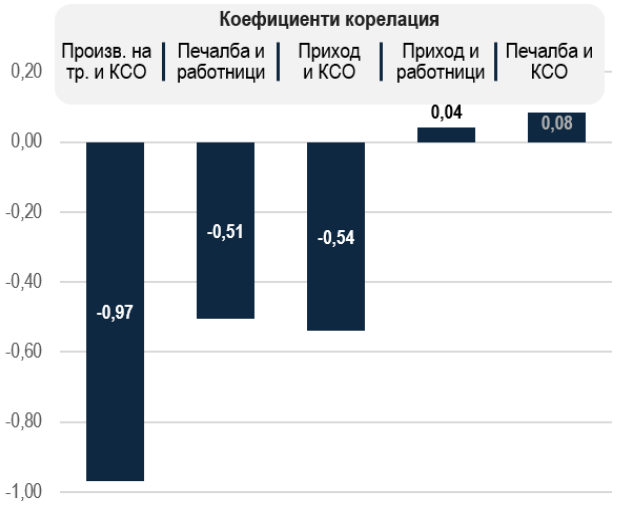
За да бъдат направени изводи относно влиянието на социално-отговорните инвестиции върху устойчивото развитие на отрасъла е необходимо да се направи корелационен анализ. Корелация е математически термин, с който в общ смисъл се означава мярка за стохастична зависимост между случайни величини и означава статистическа взаимна връзка между две или повече случайни величини (Шмойлова Р., 2003). Чрез него ще се види връзката между инвестициите в корпоративната социална отговорност (КСО) и ефективността от дейността на предприятията и как тези инвестиции се съотнасят с финансовата ефективност, производителността и устойчивостта на водещи предприятия от минерално-суровинната индустрия на България. Въпреки ограничената извадка, получените резултати позволяват да се установи характерът на взаимозависимостите в условията на спецификата на различните видове суровини (фиг. 2).



Фиг. 2. Анализ на нетната печалба, КСО и числеността на персонала на предприятията от минерално-суровинната индустрия за 2024 г.

Анализирайки данните на горната графика, може да се забележи, че „Асарел-Медет" АД и „ДПМ Металс" АД имат висока нетна печалба (съответно 125 и 100 млн. евро) при умерени или високи нива на КСО. „Златна Панега Цимент" АД демонстрира аномално ниско КСО (104,6 хил. евро) при максимална производителност на труда и минимална численост (1116 души). Това я очертава като компания с екстремно ниски социални разходи на работник. „Холдинг КЦМ 2000" АД е най-многобройна (2562 души), но нетната печалба е най-ниска от всички (4,2 млн. евро), което сочи към ниска ефективност при използването на трудовите ресурси. На фиг. 3 са представени изчислените коефициенти на корелация, които ще ни позволят да установим посоката и силата на връзката между производителността на труда, рентабилността, доходите и социалните разходи на анализираните предприятия.

Въз основа на анализа на корелационните зависимости се вижда, че между производителността на труда и КСО съществува силна обратна връзка, което показва, че компаниите с висока продукция на един работник имат относително ниски социално-трудови разходи. Причината може да е както в структурните особености, така и в политиката на възнаграждения. Умерената обратна връзка на нетната печалба с числеността потвърждава, че увеличаването на персонала без адекватен ръст на дохода намалява печалбата. Слабата обратна връзка на дохода с КСО показва, че по-високите социални разходи не са съпроводени с висок доход.



Фиг. 3. Коефициенти на корелация на изследваните предприятия от минерално-суровинната индустрия за 2024 г.

Коефициентът на корелация между дохода и числеността е практически равен на нула – това говори за липса на линейна зависимост между размера на приходите и броя на работниците. Почти нулевата връзка между нетната печалба и КСО означава, че фондът за социални разходи не обяснява различията в рентабилността на компаниите.

Изводи

Проведеното изследване потвърждава, че социално отговорните инвестиции са значим фактор за устойчивото развитие на минерално-суровинната индустрия на България. Отрасълът заема ключово място в националната икономика, осигурявайки около 5% от БВП, 12% от износа и заетост за над 120 хил. души в свързаните сектори.

Микроикономическият анализ на четирите водещи предприятия („ДПМ Металс" АД, „Асарел-Медет" АД, „Златна Панега Цимент" АД и „Холдинг КЦМ 2000" АД) разкри значителен разрив в рентабилността (от 1% до 47,5%) и производителността на труда. Корелационният анализ показа, че между производителността на труда и разходите за КСО съществува силна обратна връзка. Компаниите с висока производителност на труда на един работник имат относително ниски социално-трудови разходи. В същото време връзката между нетната печалба и нивото на КСО е близка до нула, което сочи липса на пряка зависимост между обема на социалните инвестиции и крайната рентабилност на предприятията.

Заключение

Дългосрочната конкурентоспособност и устойчивото развитие на предприятията от минерално-суровинната индустрия зависят от стратегическите им инвестиции в човешки капитал и социално-отговорни дейности. Това се доказва от положителната корелационна зависимост между инвестициите в социално-отговорни дейности и печалбата. Тази зависимост посочва връзката между тези инвестиции и благоприятния имидж на отделните компании. Именно изграденият имидж дава възможността за повишаване на печалбата чрез дългосрочното влияние върху нагласите и отношението към дейността на предприятията от сектора на минералите и суровините.

Литература

Абрамов В., Абрамов, С. (2026). *Стратегическо управление: учебник и практическо обучение за университети*, Москва: Юрайт, 355 с.

Асарел-Медет АД, (2024), Годишен индивидуален доклад за дейноста, Годишен индивидуален отчет.

БМГК (2025) Минерално-суровинна индустрия в България. Годишен бюлетин 2025, https://bmgk.bg/

Делчева, А. (2025), *Мед, злато, литий: Има ли неоткрит потенциал България*, https://www.economic.bg/

ДПМ Металс АД, (2024), SUSTAINABILITY REPORT

Златна Панега Цимент АД, (2024), Интегриран годишен доклад

ИПИ, (2024), Дейност на минерално-суровинната индустрия в България, Mining-sector-impact_IME_-July_2024-V4.pdf

Национален статистически институт (НСИ), (2025-2026) https://www.nsi.bg/

Хайтова, А., В. Петрова, (2026) Критичните и стратегическите суровини като системен фактор за икономическата сигурност и устойчивото развитие, *сп. Геология и минерални ресурси, бр.2-3*, 2026, с.3-11

Холдинг КЦМ 2000 АД, (2024), Годишен консолидиран доклад

Шмойлова, Р., (2003), *Обща теория на статистиката*: Учебник, 3-то издание, преработено. — Москва: Финанси и Статистика, 560 стр., ISBN 5-279-01951-8

ROADMAP FOR ESG INTEGRATION IN THE RAW MATERIALS INDUSTRY

Galabina Cifudina

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: g.cifudina@mgu.bg

ABSTRACT. Over the past decade, environmental, social and governance (ESG) factors have established themselves as a key component of corporate sustainability assessment and long-term risk management. In sectors with a high environmental and social impact, such as raw materials, ESG practices often remain limited to non-financial reporting, without real integration into strategic and management processes. This leads to a discrepancy between the publicly disclosed ESG results and their real importance for management decision-making.

This study proposes a structured roadmap for the integration of ESG key performance indicators (KPIs) into the strategic management of raw materials enterprises. The methodological approach is based on a systematic review of scientific literature, analysis of the European regulatory framework (CSRD, ESRS, TCFD) and conceptual modelling of the relationship between ESG KPIs and core management functions. The developed model includes five successive phases – diagnostics, design of the management framework, strategic and operational integration, operationalization and control, accountability and continuous improvement.

The scientific contribution of the study consists in the conceptual distinction between ESG as a reporting system and ESG as a governance framework, as well as in proposing an applicable model for making sustainability a manageable and strategically relevant process. The raw materials industry has been used as an analytical context due to its high capital intensity, long-term project life cycle, and significant environmental and social impacts. The proposed roadmap has the potential to be applied to other capital-intensive and risky sectors.

Key words: ESG, strategic management, raw materials industry, ESG key performance indicators (ESG KPIs), corporate sustainability.

ПЪТНА КАРТА ЗА ESG ИНТЕГРАЦИЯ В МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

Гълъбина Цифудина

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. През последното десетилетие екологичните, социалните и управленските (ESG) фактори се утвърждават като ключов елемент в оценката на корпоративната устойчивост и управлението на дългосрочния риск. В сектори с високо екологично и социално въздействие, какъвто е минерално-суровинният, ESG практиките често остават ограничени до нефинансовото отчитане, без реална интеграция в стратегическите и управленските процеси. Това води до разминаване между публично оповестените ESG резултати и реалното им значение за вземането на управленски решения.

Настоящото изследване предлага структурирана пътна карта за интеграция на ESG ключовите показатели за изпълнение в стратегическото управление на предприятията от минерално-суровинната индустрия. Методологичният подход се основава на систематичен преглед на научната литература, анализ на европейската регулаторна рамка (CSRD, ESRS, TCFD) и концептуално моделиране на връзката между ESG KPI и основните управленски функции. Разработеният модел включва пет последователни фази – диагностика, дизайн на управленската рамка, стратегическа и оперативна интеграция, операционализация и контрол, отчетност и непрекъснато усъвършенстване.

Научният принос на изследването се състои в концептуалното разграничение между ESG като отчетна система и ESG като управленска рамка, както и в предлагането на приложим модел за превръщане на устойчивостта в управляем и стратегически релевантен процес. Минерално-суровинната индустрия е използвана като аналитичен контекст поради своята висока капиталова интензивност, дългосрочен жизнен цикъл на проектите и значителни екологични и социални въздействия. Предложената пътна карта има потенциал за приложение и в други капиталоемки и рискови сектори.

Ключови думи: ESG, стратегическо управление, минерално-суровинна индустрия, ESG ключови показатели за изпълнение (ESG KPI), корпоративна устойчивост.

Въведение

През последното десетилетие екологичните, социалните и управленските (ESG) фактори се утвърждават като съществен елемент в оценката на корпоративната устойчивост и дългосрочния риск. (Galabova et al., 2025; Dimov et al., 2020) Натрупаните емпирични изследвания показват, че влиянието на ESG върху корпоративното представяне зависи не толкова от нивото на оповестяване, колкото от степента на интеграция в управленските процеси (Friede et al., 2015; Eccles et al., 2014).

Въпреки това, в практиката ESG често остава ограничено до рамките на нефинансовото отчитане, без системно интегриране в стратегическото планиране, управлението на риска и разпределението на ресурсите. Това води до разминаване между декларирани резултати и реално управленско приложение (Kotsantonis et al., 2016).

Научната литература разглежда ESG интеграцията предимно в контекста на нефинансовото отчитане, инвестиционния анализ и корпоративното управление, като фокусът е поставен върху измерването на ESG представянето или неговото влияние върху финансовите резултати. Ограничен брой изследвания разглеждат системната интеграция на ESG KPI в управленските процеси, като съществуващите модели остават фрагментарни и недостатъчно приложими в капиталоемки индустрии. (Galabova, Petrova, 2025)

Съществува празнина по отношение на процесно-ориентираните модели, които свързват ESG ключовите показатели за изпълнение (KPI) със стратегическото планиране, управлението на риска, инвестиционните решения и оперативните дейности, особено в контекста на капиталоемки индустрии с дългосрочен жизнен цикъл на проектите. Повечето съществуващи подходи разглеждат ESG като външен инструмент за оценка или комуникация, а не като вътрешна управленска система.

В този контекст настоящото изследване цели да запълни идентифицираната празнина чрез разработване на поетапен, процесно-ориентиран модел за интеграция на ESG KPI, който свързва показателите с основните управленски функции и отразява еволюцията на тяхната роля от аналитичен инструмент към фактор за стратегическо вземане на решения. Предложеният модел разширява съществуващите концепции за ESG интеграция,

като предлага систематична рамка, приложима в минерално-суровинната индустрия и други сходни сектори.

Теоретична рамка

Научната литературата отчита противоречиви резултати относно връзката между ESG и корпоративното представяне. Тези различия се обясняват с начина на интеграция на ESG в организационните процеси, а не с наличието на самите показатели.

Съществен проблем представляват разминаванията между ESG рейтингите, обусловени от различия в методологиите и обхвата на оценяване. Това явление, дефинирано като „aggregate confusion“, ограничава тяхната съпоставимост и управленска полезност (Berg et al., 2022). Паралелно с това увеличаването на обема на ESG оповестяванията не гарантира по-висока прозрачност и може да доведе до формално прилагане и greenwashing (Christensen et al., 2022; Eccles & Klimenko, 2019).

В този контекст се налага разграничението между ESG като система за отчетност и ESG като управленска рамка за вземане на решения. Миннодобивната индустрия представлява особено подходящ контекст за анализ поради високата капиталова интензивност, дългия жизнен цикъл на проектите и значителните екологични и социални въздействия.

Методологичен подход

Изследването използва комбиниран методологичен подход, включващ:

- систематичен преглед на научната литература;
- анализ на регулаторната рамка в ЕС (CSRD, ESRS, TCFD);
- концептуално моделиране на връзката между ESG KPI и управленските процеси.

Подходът е аналитичен и нормативно ориентиран, като целта е разработване на приложима управленска рамка, адаптирана към спецификата на миннодобивния сектор. Фокусът е върху интеграцията на ESG KPI в стратегическото и рисковото управление, а не върху тяхното изолирано използване като отчетни индикатори.

Емпирична валидация на модела

За целите на първоначалната оценка на приложимостта на предложения модел е проведено първоначално емпирично изследване, базирано на експертна оценка и анализ на практики в предприятия от минерално-суровинната индустрия. Основната цел е да се оцени доколко разработената пътна карта отразява реалните управленски процеси и предизвикателства, свързани с ESG интеграцията.

Методологично, изследването следва качествен подход, който включва експертна оценка на отделните фази на модела, съпоставяне с утвърдени индустриални стандарти (GRI, ICMM, TCFD) и концептуално картографиране на връзките между ESG показателите и основните управленски функции. В анализа са включени специалисти с практически опит в ESG управлението в миннодобивния сектор.

Резултатите показват, че предложените етапи на интеграция са в съответствие с наблюдаваните тенденции в развитието на ESG управлението, като се откроява преход от фрагментарни инициативи към по-системно включване на ESG показатели в стратегическите и оперативните процеси, което съответства на изводите в литературата (Eccles et al., 2014; Kotsantonis et al., 2016).

В допълнение, анализът показва, че управленската стойност на ESG показателите се проявява най-силно при тяхното интегриране в процесите на вземане на решения, докато основните предизвикателства са свързани с операционализацията, управлението на данните и координацията между функционалните звена. Подобни ограничения са широко дискутирани в изследванията върху ESG практиките (Berg et al., 2022).

Получените резултати следва да се интерпретират като първоначални, тъй като изследването не цели статистическа обобщаемост, а концептуална валидация на модела. Въпреки това те предоставят първоначална емпирична подкрепа за неговата приложимост в индустриален контекст.

Допълнителен анализ на публично достъпни ESG отчети и доклади за устойчивост на компании от сектора, като DPM Metals и Елаците-Мед АД, показва, че ESG показателите все по-често се интегрират в системите за стратегическо управление, включително чрез използването им в балансирани системи от показатели (Balanced Scorecard) и механизми за управленско стимулиране. В същото време тези практики остават неравномерно развити, като най-съществени затруднения се наблюдават именно при операционализацията, управлението на данните и междуфункционалната координация.

Пътна карта за интеграция на ESG KPI

Интеграцията на ESG KPI изисква поетапен подход, отразяващ развитието на организационната зрялост.

Фаза I: Диагностика и стратегическо позициониране

Първоначалният етап е насочен към систематична оценка на текущото състояние на ESG управлението в предприятието. Основните дейности включват анализ на двойната материалност, идентифициране на съществените екологични и социални въздействия, както и оценка на съответствието с приложимите регулаторни изисквания.

В рамките на тази фаза се извършва картографиране на ESG рисковете по целия жизнен цикъл на минните проекти, съчетано с оценка на зрелостта на съществуващите управленски процеси. Това позволява формулирането на ясно дефинирана изходна позиция за последващо стратегическо планиране.

Фокусът върху двойната материалност отразява както stakeholder-ориентирания подход към корпоративното управление (Freeman, 1984), така и нормативните изисквания на европейската регулаторна рамка (European Commission, 2022; EFRAG, 2023).

Фаза II: Дизайн на управленската рамка и целеполагане

Във втората фаза се формализира ESG управленската архитектура чрез ясно дефиниране на роли и отговорности

на бордово и изпълнително ниво, разработване на вътрешни политики и процедури, както и подбор на релевантни ESG KPI.

Процесът на целеполагане следва да бъде измерим, времево обвързан и съобразен както със стратегическите приоритети, така и с профила на риска на организацията. По този начин се създава връзка между нормативните изисквания и дългосрочните инвестиционни и оперативни планове.

Емпиричните изследвания показват, че ясно дефинираните управленски структури и целево ориентираните показатели представляват необходима предпоставка за ефективно прилагане на устойчивостта в организационната практика (Eccles et al., 2014).

Фаза III: Интеграция в стратегическото и оперативното управление

Третият етап се характеризира с интегриране на ESG KPI в ключовите управленски процеси, включително стратегическото планиране, управлението на риска и разпределението на капитала.

ESG показателите се интегрират в бюджетните процедури, инвестиционните оценки и системите за мониторинг, което позволява тяхното системно отчитане при вземането на управленски решения.

В контекста на миннодобивната индустрия това е от съществено значение, тъй като създава възможност ESG факторите да влияят пряко върху решенията за развитие на нови проекти, избор на технологии и управление на ресурсите.

Фаза IV: Операционализация и контрол

В тази фаза ESG управлението се интегрира в ежедневните оперативни дейности чрез разработване на механизми за събиране, обработка и валидиране на данни, както и внедряване на дигитални инструменти за текущ мониторинг.

Съществен аспект е изграждането на системи за вътрешен контрол, насочени към гарантиране на качеството, пълнотата и надеждността на ESG информацията. Паралелно с това се осигурява координация между функционалните звена, така че ESG показателите да бъдат системно използвани в управленските процеси.

Този етап е концептуално съпоставим с принципите на интегрираното управление на риска и представянето (COSO, 2017).

Фаза V: Отчетност, уверение и непрекъснато усъвършенстване

Заключителният етап е насочен към повишаване на прозрачността и устойчивото развитие на ESG управлението. Резултатите се разкриват чрез стандартизирани отчети, подлежат на външно независимо уверение и се използват за бенчмаркинг спрямо водещи практики.

На тази основа се извършва периодичен преглед и актуализация на целите и индикаторите, което позволява адаптиране към динамично променящата се регулаторна и пазарна среда.

Външното уверение и бенчмаркингът допринасят за повишаване на доверието и за утвърждаване на ESG като инструмент за създаване на дългосрочна стойност (OECD, 2018; PRI et al., 2021).

Таблица 1 представя пътната карта за интеграция на ESG KPI в управленските функции на минните предприятия, като показва как значението на ESG показателите нараства от диагностичен инструмент към активен фактор в стратегическото, рисковото и оперативното управление.

Таблица 1. *Роля на ESG KPI в управленските функции по фази*

Управленска функция	Фаза I: Диагностика	Фаза II: Дизайн	Фаза III: Интеграция	Фаза IV: Операционализация	Фаза V: Отчетност и оптимизация
Стратегическо управление	Анализ на двойна материалност и въздействия	Дефиниране на ESG стратегически цели	Интеграция в стратегическото планиране	Проследяване чрез KPI и табла с показатели	Стратегическа ревизия и адаптация
Управление на риска	Идентифициране и картографиране на ESG рискове	Разработване на ESG риск рамка	Интеграция в ERM и сценарии (TCFD)	Непрекъснат мониторинг и контрол	Актуализация на риск профила
Инвестиции и капитал	Оценка на ESG въздействия и зависимости	Дефиниране на ESG KPI за инвестиции	Включване в инвестиционни и капиталови решения	Проследяване на ESG представяне на проекти	Преразглеждане на портфейла
Оперативни процеси	Диагностика на оперативни въздействия	Проектиране на ESG-интегрирани процеси	Интеграция на ежедневните операции	Контрол, оптимизация и ефективност	Непрекъснато подобрение

Управленска функция	Фаза I: Диагностика	Фаза II: Дизайн	Фаза III: Интеграция	Фаза IV: Операционализация	Фаза V: Отчетност и оптимизация
Данни и контролни системи	Оценка на налични ESG данни	Дизайн на ESG архитектура на данните	Интеграция на информационни системи	Валидация, вътрешен контрол и одит	Осигуряване на надеждност и проследимост
Управление и отчетност	Ограничено и фрагментарно оповестяване	Дефиниране на роли, политики и отговорности	Частична интеграция в отчетността	Системно ESG отчитане	Външно уверение, бенчмаркинг и прозрачност

Времеви фази на ESG интеграцията (12–36 месеца)

Интеграцията на ESG KPI следва поетапна времева логика, която отразява прехода от диагностично към стратегическо ниво на управление. Предложените етапи съответстват на концептуалните фази на модела и осигуряват практическа рамка за тяхното внедряване.

Етап I (0–6 месеца): Диагностика и дизайн
(съответства на Фаза I–II)

Началният етап е насочен към изграждане на аналитична и организационна основа за ESG интеграцията. Основните дейности включват:

- провеждане на gap-анализ спрямо приложимите стандарти (ESRS, GRI, ICMM);
- анализ на двойната материалност и приоритизиране на ESG теми;
- картографиране на ключовите ESG рискове по жизнения цикъл на проектите;
- дефиниране на първоначален набор от ESG KPI и базови стойности;
- изграждане на концептуална архитектура на ESG данните и управленските процеси;
- формализиране на управленските роли, отговорности и политики.

Резултатът от този етап е структурирана управленска рамка и ясно дефинирана изходна позиция.

Етап II (6–18 месеца): Интеграция и операционализация
(съответства на Фаза III–IV)

В този етап ESG KPI се интегрират в основните управленски и оперативни процеси на предприятието. Фокусът е върху тяхното реално прилагане:

- интегриране на ESG KPI в стратегическото планиране, бюджетите и инвестиционните оценки;
- интеграция в системите за управление на риска (вкл. TCFD сценарии);
- разработване и внедряване на системи за събиране, обработка и валидация на ESG данни;
- въвеждане на вътрешни контролни механизми за нефинансова информация (в съответствие с COSO);
- създаване на връзка между ESG резултатите и управленските стимули.

Този етап бележи прехода от концептуално към оперативно ниво на ESG управление.

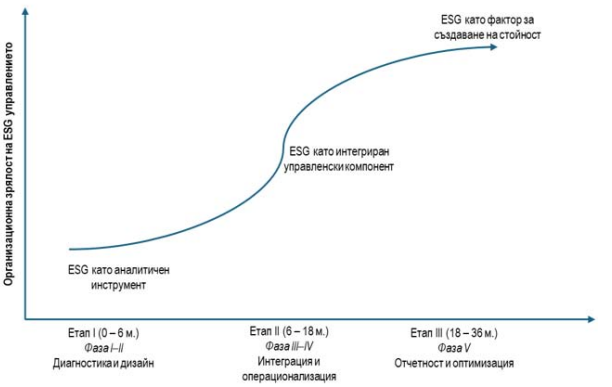
Етап III (18–36 месеца): Консолидация и стратегическа оптимизация
(съответства на Фаза V)

Финалният етап е насочен към стабилизиране и надграждане на ESG управлението чрез:

- изготвяне на интегрирани ESG отчети в съответствие с регулаторните изисквания;
- външно независимо уверение на ESG информацията;
- бенчмаркинг спрямо водещи практики в сектора;
- разширяване на ESG управлението към веригата на доставки (due diligence);
- периодична ревизия и актуализация на ESG KPI и стратегически цели.

На този етап ESG се утвърждава като устойчив елемент на стратегическото управление и създаването на дългосрочна стойност.

Взаимовръзката между концептуалните фази и времевите етапи е представена на Фигура 1.



Фиг. 1. Еволюция на ESG интеграцията

Фигурата представя развитието на ESG KPI от аналитичен инструмент към интегриран управленски компонент и стратегически фактор за създаване на стойност. Кривата отразява нарастващата степен на организационна зрялост и интеграция в управленските процеси.

Дискусия

Предложеният модел показва, че управленската стойност на ESG показателите произтича от тяхното

системно интегриране в управленските процеси, а не от агрегирани оценки, което е в съответствие с изводите на Eccles et al. (2014) относно значението на организационните процеси за реализиране на устойчивостта. Това поставя под въпрос приложимостта на стандартните ESG рейтинги като инструмент за управление, доколкото те остават ограничени предимно до оценъчни и сравнителни функции и често демонстрират значителни разминавания (Berg et al., 2022).

Наред с това, приложението на модела е свързано с редица ограничения, включително зависимост от регулаторната среда, високи изисквания към качеството и наличността на данните, необходимост от организационна трансформация и ограничена приложимост извън капиталоемки индустрии, което е в съответствие с наблюденията за предизвикателствата при ESG интеграцията в практиката (Kotsantonis et al., 2016).

Резултатите от проведеното изследване предоставят първоначална емпирична подкрепа за приложимостта на модела, като показват значението на системната интеграция на ESG показателите за повишаване на тяхната управленска релевантност.

От практическа гледна точка, изследването има значимост в контекста на Европейския съюз, тъй като предложената рамка подпомага прилагането на изискванията на CSRD и ESRS чрез интегриране на ESG показателите в управленските процеси, в съответствие с нарастващия фокус върху връзката между отчетност и управление.

В управленски аспект моделът предлага приложима рамка за интегриране на ESG показателите в стратегическото планиране, управлението на риска и инвестиционните решения, като по този начин създава предпоставки за превръщането на устойчивостта в измерим и управляем фактор за създаване на стойност (Eccles & Klimenko, 2019).

Заключение

Интеграцията на ESG KPI в стратегическото управление представлява ключов фактор за повишаване на устойчивостта и управленската ефективност в миннодобивния сектор. Предложената пътна карта предлага систематичен и приложим подход за преход от фрагментарни практики към интегриран управленски модел.

Основният принос се състои в концептуализирането на ESG като управленска система, при която стойността се реализира чрез системна интеграция в стратегическите и оперативните процеси.

Литература

Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production, 12*(6), 639–662.

Berg, F., Kölbel, J. F., & Rigobon, R. (2022). Aggregate confusion: The divergence of ESG ratings. Review of Finance, 26(6), 1315–1344.

Christensen, H., Serafeim, G., & Sikochi, A. (2022). Why is corporate virtue in the eye of the beholder? The Accounting Review, 97(1), 147–175.

COSO (2017). Enterprise Risk Management – Integrating with Strategy and Performance.

Dimov, E., Bakyrdjieva, R., & Stratiev, N. (2020). The mining industry and the recycling of raw materials as an important element of the Bulgarian economy. Journal of Mining and Geological Sciences, 63, 289-292.

Eccles, R. G., & Klimenko, S. (2019). The investor revolution. Harvard Business Review, 97(3), 106–116.

European Commission (2022). Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD).

Eccles, R. G., Ioannou, I., & Serafeim, G. (2014). The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance. Management Science, 60(11), 2835–2857.

Galabova, B., Petrova, V. (2025). Guidelines for the development of a green business model in companies from the raw materials industry. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics (EPSTEM), 34, 66-79.

Galabova, B., Trifonova, B., & Petrova, V. (2025). Integration of green competencies in entrepreneurial practices for sustainable development of the industry. The Eurasia Proceedings of Educational and Social Sciences (EPESS), 43, 102-114.

Kotsantonis, S., Pinney, C., & Serafeim, G. (2016). ESG integration in investment management: Myths and realities. Journal of Applied Corporate Finance, 28(2), 10–16.

EFRAG (2023). European Sustainability Reporting Standards (ESRS).

Freeman, R. E. (1984). Strategic Management: A Stakeholder Approach. Boston: Pitman.

Elkington, J. (1997). Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Oxford: Capstone.

Friede, Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. Journal of Sustainable Finance & Investment, 5(4), 210–233.

Global Industry Standard on Tailings Management (2020). GISTM.

GRI (2023). GRI 14: Mining Sector Standard.

ICMM (2020). Mining Principles and Performance Expectations.

OECD (2018). Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct.

PRI, UNEP FI & Generation Foundation (2021). A Legal Framework for Impact.

TCFD (2017). Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures.

UN Global Compact (2004). Who Cares Wins: Connecting Financial Markets to a Changing World.

UNIVERSITY OF
MINING AND GEOLOGY
"ST. IVAN RILSKI"

www.mgu.bg