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

Том 68

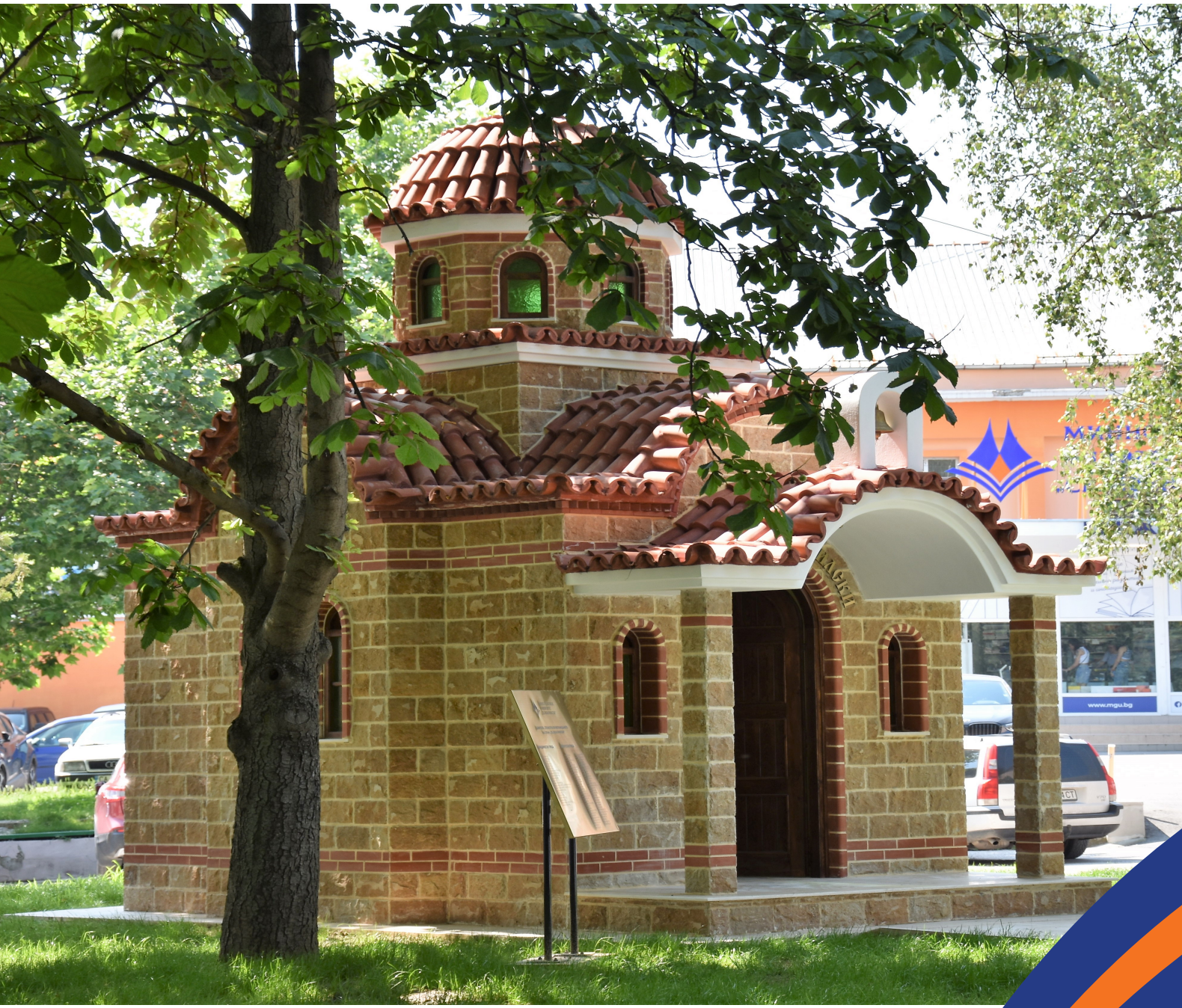
МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“

ANNUAL OF UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY “ST. IVAN RILSKI”

Volume 68

София 2025

Sofia 2025



ГОДИШНИК

НА

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

„СВ. ИВАН РИЛСКИ“ – СОФИЯ

ТОМ 68

ANNUAL

OF

UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY

“ST. IVAN RILSKI” – SOFIA

VOLUME 68



2025

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

Доц. д-р Мариана Трифонова – главен редактор
Проф. д-р Маринела Панайотова
Проф. д-р Николай Стоянов
Доц. д-р Борис Вълчев
Доц. д-р Евгения Александрова
Доц. д-р Ясен Горбунов
Доц. д-р Елза Иванова-Димова
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. Nikolay Stoyanov
Assoc. Prof. Dr. Boris Valchev
Assoc. Prof. Dr. Evgeniya Aleksandrova
Assoc. Prof. Dr. Yassen Gorbounov
Assoc. Prof. Dr. Elza Ivanova-Dimova
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, 2025
Publishing House “St.Ivan Rilski”, Sofia, 2025

СЪДЪРЖАНИЕ

CONTENTS

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

***ЮБИЛЕЙ*:** проф. дгн Тодор Михайлов Маринов навърши 90 години **11**
ANNIVERSARY: Prof. DSc Todor Mihaylov Marinov Celebrates his 90th Anniversary

Анчев, М., Каракашева, З., Бонев, В. Интегрирани геофизични изследвания на антична и средновековна крепост на нос Чиракман, гр. Каварна **13**
Anchev, M., Karakasheva, Z., Bonev, V. Integrated Geophysical Research on the Ancient and Medieval Fortress Located on Cape Chirakman, the Town of Kavarna

Божинова-Попова, И. Влияние на началния градиент и структурната якост на глинестите пластове върху тяхното слягане **17**
Bozhinova-Popova, I. Influence of the Initial Gradient and Structural Strength of Clay Layers on Their Settlement

Бодуров, В. Анализ и оценка на стабилността на хвостохранилище „Тораница“ **20**
Bodurov, V. Stability Assessment of the *Toranica* Tailings Dam

Вълчев, Б. Геотоп „Делик кая“ („Продупчената скала“) при с. Стоманци, Кърджалийска област **25**
Valchev, B. The *Delik Kaya* (Pierced Rock) Geotope near the Village of Stomantsi, Kardzhali District

Малинкова, Е. Хидрохимична характеристика на подземните води от басейна на р. Бебреш **31**
Malinkova, E. Hydrochemical Characterisation of Groundwater in the Bebresh River Basin

Миленкович, Б. Геофизичен мониторинг за устойчиво развитие на минната дейност: примери с използване на електротомография **35**
Milenkovich, B. Geophysical Monitoring for Sustainable Mining: Case Studies Using Electrical Resistivity Tomography

Стефанова, М., Николова, В., Димитров, И. Влияние на литолого-тектонския фактор върху ерозионно дренажната мрежа във водосбора на река Бююкдере (Източни Родопи) **40**
Stefanova, M., Nikolova, V., Dimitrov I. The Influence of the Lithological-Tectonic Factor on the Erosion-Drainage Network in the Catchment of the Byuyukdere River (the Eastern Rhodopes)

Стоянов, Н. Опростен метод за определяне на подземния водоприток към строителни изкопи в слабо проучени терени **45**
Stoyanov, N. Simplified Method for the Evaluation of Groundwater Inflow into Construction Excavations at Insufficiently Investigated Sites

Стойков, Ст., Михайлов, Л., Павлова, Е. Геоложко положение и минерален състав на най-ниските експлоатационни хоризонти на баритното находище „Кашана“ (предварителни данни) **51**
Stoykov, St., Mihaylov, L., Pavlova, E. Geological Position and Mineral Composition of the Lowest Mined Levels of the *Kashana* Barite Deposit (Preliminary Data)

Тодоров, Т. Римски антиземетръсни техники, използвани при строителството на съоръжението в могилата Мал тепе до село Маноле **55**
Todorov, T. Roman Anti-Earthquake Techniques Used in the Construction of the Structure in the Mal Tepe Mound near the Village of Manole

Томова, М., Кисьов, Ат. Геофизична оценка на дренажа и задържането на вода в съоръжение за съхранение на минни отпадъци: сравнително проучване по метода на електротомография **61**
Tomova, M., Kisyov, At. Geophysical Evaluation of Water Drainage and Containment in a Mine Waste Storage Facility: a Comparative ERT Study

Туджаров, Д., Каракашева, З. Геофизичен подход за проучване на подземните води в района на Петрич: практическо изследване **65**
Tudzharov, D., Karakasheva, Z. Geophysical Approach for Groundwater Exploration in the Petrich Region: a Case Study

Цанков, Хр., Стефанов, Б., Анчев, М. Методика за определяне топлинните характеристики на ограждащите конструкции на сгради и сградни групи на примера на кв. „Трендафил-1“ и кв. „Младост“ в гр. Габрово **70**
Tzankov, Ch., Stefanov, B., Anchev, M. Methodology for Determining the Thermal Characteristics of the Enclosing Structures of Buildings and Building Groups on the Example of the *Trendafil-1* and *Mladost* Living Estates in the Town of Gabrovo

СЕКЦИЯ ДОБИВ НА ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ
SECTION EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES

Бояджиев, М., Крайчев, Е., Вучев, Ст. Изследване на влиянието на смеси от водород и метан при определяне загуби на налягане в газоразпределителните мрежи **79**
Boyadzhiev, M., Kraychev, E., Vuchev, St. Study of the Influence of Hydrogen and Methane Mixtures in Determining Pressure Loss in Gas Distribution Networks

Георгиев, Л., Бояджиев, М. Съвременни технологии и технически средства за разработка и експлоатация на находища на шистов газ **82**
Georgiev, L., Boyadzhiev, M. Modern Technologies and Technical Means for the Development and Exploitation of Shale Gas Fields

Грозданов, Св., Крайчев Е. Анализ и характеристики на механични бъркачки с приложение в биотехнологичните производства **85**
Grozdanov, Sv., Kraychev E. Analysis and Characteristics of Mechanical Stirrers Used in Biotechnological Production

Караджов, М. Анализ на действащата нормативна уредба в областта на разпределението и доставките на природен газ, електроенергия и вода за битови потребители. Предложения за актуализация **90**
Karadjov, M. Analysis of the Current Regulatory Framework in the Field of Distribution and Supply of Natural Gas, Electricity, and Water for Household Consumers. Proposals for Updating

Кюстелев, Ал. Оптимална работа на газов котел в зависимост от качеството на подгряваната вода **94**
Kustelev, Al. Optimal Operation of a Gas Boiler Depending on the Quality of the Heated Water

Пачеджиев, Б. Съвременни технологии и технически средства за ориентация на проучвателно-ядкови сондажи **97**
Patchejieff, B. Contemporary Technologies and Technological Resources for the Orientation of Exploratory-Core Drilling

Прешелкова, А., Дамянова, Д. Влияние на европейската енергийна политика върху газовия сектор **101**
Preshelkova, A., Damyanova, D. Impact of the European Energy Policy on the Gas Sector

Христов, Л. Преглед на предизвикателствата при използването на природни газови системи за водород **107**
Hristov, L. A Review of Challenges with Using the Natural Gas Systems for Hydrogen

Янакиев, В. Проучване на решения за съхранение на водород: технологии, разходи и иновации **112**
Yanakiev, V. Study of Hydrogen Storage Solutions: Technologies, Costs, and Innovation

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

Александрова, Ев. Концепция за оценка на миннодобивната дейност в България с фокус върху критични и стратегически суровини **117**
Aleksandrova, Ev. A Conceptual Approach to Evaluating Mining Operations in Bulgaria with Emphasis on Critical and Strategic Raw Materials

Александрова, Н., Камбуров, А., Иванов, Л. Приложение на спътникови дистанционни методи за картографиране на труднодостъпни области **123**
Aleksandrova, N., Kamburov, A., Ivanov L. Application of Satellite Remote Sensing Methods for the Mapping of Hard-to-Access Areas

Асенов, Р., Карамихов, П., Борисов, Р. Осигуряване на взриво-сеизмична охрана на транспортен тунел с магистрална гумена транспортна лента в рудник „Елаците“, Етрополе **128**
Asenov, R., Karamihov, P., Borisov, R. Ensuring Blast-Seismic Protection for a Transport Tunnel with a Rubber Conveyor Belt in the *Ellatzite* Mining Complex, Etropole

Борисов, Б. Дълготрайност, корозионни рискове и превенция на тунелните облицовки и портали **134**
Borisov, B. Durability, Corrosion Risks and Prevention of Tunnel Linings and Portals

Гичева, Г., Чаначев, Ал. Извличане на бисмут от полиметални руди: методи, предизвикателства и бъдещи насоки **138**
Gicheva, G., Chanachev, Al. Extraction of Bismuth from Polymetallic Ores: Methods, Challenges, and Perspectives

Колев, Н., Савов, Пл., Вацкичева, М., Коларова, М., Ламбов, Л., Василев, Ж. Изследване на атмосферния аерозол и височината на атмосферния граничен слой в София и Крумовград през юли 2017 г. **144**
Kolev, N., Savov, Pl., Vatzkitcheva, M., Kolarova, M., Lambov, L., Vasilev, Zh. Measurement of Atmospheric Aerosol and Atmospheric Boundary Layer Height in Sofia and Krumovgrad in July 2017

Крилчев, Ал. Организация и управление на процесите при разработване на находище „Милин камък“ **150**
Krilchev, Al. Organisation and Management of Processes in Developing the *Milin Kamak* Deposit

Македонска, Д., Владкова, Бл., Костадинова, Н., Динчев, З., Вълев, Б. Проектиране и изграждане на стенд за изследване на противопожарни дюзи **155**
Makedonska, D., Vladkova, Bl., Kostadinova, N., Dinchev, Z., Valev, B. Design and Construction of a Stand for Sprinkler Nozzle Testing

Несторов, Н. Намаляване количеството на използваните токсични реагенти при анализи на злато и сребро **162**
Nestorov, N. Toxic Reagents Reducing in Gold and Silver Analyses

Николова, К., Генова, П., Иванов, Р., Величкова, П. Преглед на нормативната база, отнасяща се за опазване на водните тела от води, повлияни от минната индустрия **166**
Nikolova, K., Genova, P., Ivanov, R., Velichkova, P. Review of the Regulatory Framework Relevant to the Protection of Water Bodies from Effluents Influenced by the Mining Industry

Петров, М., Янкова, Т., Несторов, Н., Григорова, И. Повишаване ефективността на пресяване, чрез оптимизиране захранването на руда в процеса на трошене **173**
Petrov, M., Yankova, T., Nestorov, N., Grigorova, I. Enhancing Screening Efficiency by Optimising Ore Feed in the Crushing Cycle

Савов, Пл., Цанков, Хр., Вацкичева, М., Бегновска, М., Колев, Н., Топалов, Ст. Изследване влиянието на термичното поле, генерирано от подложната повърхност, върху дисперсията на фини прахови частици в атмосферата на открити рудници и кариери **178**
Savov, Pl., Tsankov, Hr., Vatzkitcheva, M., Begnovska, M., Kolev, N., Topalov, St. Study of the Influence of the Thermal Field Generated by the Underlying Surface on the Dispersion of Particulate Matter in the Atmosphere of Open-Pit Mines and Quarries

Събева-Домусчиева, Д., Маданski, Д., Джамяров, Ст. Технологични решения за повишаване извличането на злато при преработка на медно-златна руда в „Дънди Прешъс Металс Челопеч“ **184**
Sabeva-Domuschieva, D., Madanski, D., Dzhamyarov, St. Technological Solutions for Increasing Gold Recovery in Copper-Gold Ore Processing in *Dundee Precious Metals Chelopech*

Трифонова-Генова, В., Тонкова, Г. Напрежения около тунел преминаващ през напластен скален масив **190**
Trifonova-Genova, V., Tonkova, G. Stresses around a Tunnel Passing through a Layered Rock Mass

Цаков, М. Потискане на запрашеността по рудничните пътища **194**
Tsakov, M. Pollution Suppression along Mine Roads

Цанков, Т. Рискове от газови емисии при пожари на електрически превозни средства в подземни гаражи **198**
Tsankov, T. Risks from Gas Emissions in Electric Vehicle Fires in Underground Garages

Цанков, Т. Възможности за оптимизация при гасене на пожари в електрически превозни средства с акцент върху подземните гаражи: сравнителен анализ и предложение за термографска интеграция **202**
Tsankov, T. Strategies for Optimising Fire Suppression in Electric Vehicles within Underground Parking Structures: a Comparative Study and a Thermographic Integration Proposal

Центовский, Е., Михалев, С. Технологични решения за управление качеството на рудата в условията на подземен рудник **207**
Tsentovskiy, E., Mihalev, S. Technical Solutions for Ore Quality Control in Underground Mining

Янкова, Т., Петров, М., Несторов, Н., Григорова, И. Минерален състав на оксидни руди от меднопорфирно находище и технологични възможности за извличане на мед **211**
Yankova, T., Petrov, M., Nestorov, N., Grigorova, I. Mineral Composition of Oxide Ores from a Porphyry Copper Deposit and Technological Opportunities for Copper Extraction

Янкова, Т., Петров, М., Несторов, Н., Григорова, И. Технологични възможности за обогатяване на оксидна руда от меднопорфирно находище **216**
Yankova, T., Petrov, M., Nestorov, N., Grigorova, I. Technological Possibilities for the Beneficiation of Oxide Ores from a Porphyry Copper Deposit

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

Бончева, Р. Компютърна обработка на данни, получени от системите за управление на полуавтогенна мелница **223**
Boncheva, R. Computer Processing of Data Obtained from Semi-Autogenous Mill Control Systems

Вучева, Р., Трифонова–Генова, В. Напрежения и премествания около кръгов минен тунел прокаран в скален масив с ориентирана напуканост **227**
Vucheva, R., Trifonova–Genova, V. Stresses and Displacements around a Circular Mine Tunnel Driven in a Rock Massif with Oriented Cracking

Зъбчев, А. Симетрично разположени в пространството електрически съпротивления **231**
Zabchev, A. Symmetrically Spaced Electrical Resistances

Иванова, М. Върху определяне на напреженията и преместванията около вертикална шахта в напукан скален масив **236**
Ivanova, M. On Determining Stresses and Displacements around a Vertical Shaft in a Cracked Rock Massif

Илиев, Е., Симеонов, М. Изследване и анализ надеждността на основни възли при кариерни автосамосвали Белаз 75131 и Белаз 75137, 130 тона в открит рудник „Елаците мед“ **240**
Iliev, E., Simeonov, M. Research and Analysis of the Reliability of Main Components of *Belaz 75131* and *Belaz 75137 130t* Dump Trucks in the *Ellatzite-Med* Open-Pit Mine

Илиев, Ж., Лаков, Н. Елекроенергийна ефективност на топкови мелници в зависимост от периферната скорост на въртене на барабана **245**
Iliev, Zh., Lakov N. Electrical Efficiency of Ball Mills Depending on the Peripheral Speed of Rotation of the Drum

Минин, Ив., Савов, С., Станчев, Ст. Изследване на причините за дефектиране на основната носеща греда на вибрационно сито **249**
Minin, I., Savov, S., Stanchev, St. Investigation of the Causes of Failure of the Main Support Beam of a Vibrating Screen

Муратов, Х., Ишназаров, О., Хужамов, Е. Синтез на прогнозиращо директно управление на въртящия момент на тежко натоварени асинхронни електрозадвижвания **253**
Muratov, Kh., Ishnazarov, O., Khujamov, E. Synthesis of Predictive Direct Torque Control for High-Load Induction Electric Drives

Переновски, Н. Изследване на якостно-деформационното състояние на нова конструкция лопатки за осови вентилатори работещи с голяма периферна скорост **260**
Perenovski, N. Investigation of the Strength and Deformation State of a New Design of Blades for Axial Fans Operating at High Peripheral Speed

Переновски, Н. Стенд за демонстрация на паралелна работа на вентилатори **263**
Perenovski, N. A Stand for Demonstrating the Parallel Operation of Fans

Синилков, П. Явлението удар при захват на астероиди **266**
Sinilkov, P. The Impact Phenomenon during Asteroid Gripping

Синилков, П. Захвати и манипулация в условията на безтегловност **270**
Sinilkov, P. Grips and Manipulation in Weightlessness

Трендафилов, Р. Ползи от внедряване на интелигентни мрежи в електропреносната мрежа в България **274**
Trendafilov, R. Benefits of Implementing Smart Grids in the Electricity Transmission Network in Bulgaria

Хайнов, Л. Относно използването на вертикални винтови мелници за фино смилане на руди **280**
Haynov, L. On the Use of Vertical Screw Mills for the Fine Grinding of Ore

СЕКЦИЯ УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ
SECTION SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINERAL AND RAW MATERIAL INDUSTRY

Антонов, Й. Сигурност и безопасност на работното място **287**
Antonov, Y. Security and Safety in the Workplace

Зарева, Е., Маринова, К., Кабадийски, В., Стоянов, Ст., Блажев, К. Иновации в съвременния облик на музеите при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София, България **293**
Zareva, E., Marinova, K., Kabadiyski, V., Stoyanov, St., Blazhev, K. Innovations in the Modern Appearance of Museums at the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" – Sofia, Bulgaria

Кондев, Г., Ганчев, Д. Основни предимства и пречки при внедряване на предсказващата поддръжка в промишлените компании **298**
Kondev, G., Ganchev, D. Main Advantages and Obstacles in the Implementation of Predictive Maintenance in Industrial Companies

Митев, В., Христов, Й., Черчеланов, А., Арсова, Е. Конкурентоспособност на българската минна индустрия **305**
Mitev, V., Hristov, Y., Cherchelanov, A., Arsova, E. Competitiveness of the Bulgarian Mining Industry

Първанова, М., Христова, Т. Подготовка на чужд език на заинтересовани страни и студенти за обучение в специализирана лаборатория при осъществяване на мобилност **313**
Purvanova, M., Hristova, T. Preparation in a Foreign Language of Stakeholders and Students for Training in a Specialised Laboratory during Mobility

Софрониева, А. Наличност на критични и стратегически метали в България в контекста на международните приоритети **317**
Sofronieva, A. Availability of Critical and Strategic Metals in Bulgaria in the Context of International Priorities

Трифонова, Б., Димов, Е. Иновативни методи в управлението на предприятията в дигиталната ера **324**
Trifonova, B., Dimov, E. Innovative Methods in Enterprise Management in the Digital Era

Христов, Й., Петрова, В., Радев, Ю. Технологии за добив и преработка на редкоземни елементи **330**
Hristov, Y., Petrova, V., Radev, Y. Technologies for Mining and Processing of Rare Earth Elements

Цолова, В. По проблема за маркетинговите аспекти на учебния процес по „Физическо възпитание и спорт“ при студентите **336**
Tzolova, V. On the Problem of Marketing Aspects of the Learning Process in "Physical Education and Sports" for Students

Цолова, В. Кибернетичното знание в дейността на преподавателя по физическо възпитание и спорт **341**
Tzolova, V. Cybernetic Knowledge in the Activity of the Physical Education and Sports Teacher

СЕКЦИЯ

ГЕОЛОГИЯ И ПРОУЧВАНЕ НА МИНЕРАЛНИ И ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ

SECTION

GEOLOGY AND EXPLORATION OF MINERAL AND ENERGY RESOURCES

ПРОФ. ДГН ТОДОР МИХАЙЛОВ МАРИНОВ – 90 ГОДИШЕН ЮБИЛЕЙ

През юли тази година проф. дгн Тодор Михайлов Маринов навърши 90 години. Със своето харизматично присъствие и аналитичен ум, той продължава да вдъхновява академичната общност и допринася за развитието на българската геология, особено в областта на петрологията.

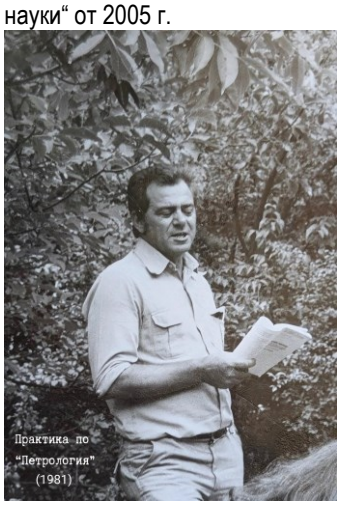


Проф дгн Тодор Михайлов Маринов е роден на 20 юли 1935 г. в село Гюргич, област Монтана. Завършва основното си образование в родното си село през 1949 г., а средно – в село Ружинци през 1953 г. През 1956 г. завършва Минния техникум „Христо Ботев“ в Перник, специалност „Геология и проучване на полезни изкопаеми“. Висшето си образование по специалност „Геология“ получава през 1965 г. в Софийския университет „Св. Климент Охридски“.

Научната и професионална кариера на проф. Маринов, започва с работа като техник-геолог в Главното управление за геоложки проучвания (1956–1965), а впоследствие работи като геолог в НИППИЕС – Енергопроект (1965–1972). През 1972 г. защитава кандидатска дисертация на тема „Тектоника на северния дял на Барутин-Буйновската подутина“. През същата година започва работа като асистент в катедра „Минералогия и петрография“ на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, където преминава през всички академични степени – доцент (1983), професор (1993). През 1992 г. защитава дисертация за научната степен „доктор на геологическите науки“ на тема „Петроложка характеристика на алкалния магматизъм и метасоматизъм в ядката на Берковския антиклинорий“.

Преподава в МГУ над 30 години, като води лекции по минералогия, петрография, петрология на магмени и метаморфни скали, а от 2002 г. – и магистърски курсове по: „Магматизъм и магматични процеси“ и „Метаморфизъм и метаморфни процеси“. През 1987 г. изнася лекции по петрография във Виетнам – в Ханойския минен университет. Научните интереси на проф. Маринов са съсредоточени в областта на магматизма, метасоматизма, вулканологията, метаморфизма и геотектониката. Автор и съавтор е на над 80 научни публикации, учебник по петрография (1989), практическо ръководство, монография и множество фондови геоложки доклади. Участвал е в различни геоложки изследвания и разработки, включително по ураноносни зони, изследвания на алкалния магматизъм и петроложката характеристика вулканогенни комплекси и интрузивни тела в Западна Стара планина и Средногорието. Представя резултати на множество научни форуми, включително и на международната конференция в Рио де Жанейро през 2002 г. Проф. Маринов има принос и в геоархеологията, като изследва скалите, използвани при изграждането на тракийски и римски надгробни паметници – Казанлъшката и Александровската гробница, произхода на мраморите, използвани за изработка на саркофага „Деветте музи“, съхраняван в Калифорния.

Заемал е редица административни и научни длъжности – заместник-декан по учебната дейност (1987–1989), декан на Геологопроучвателния факултет (1992–1997), ръководител на катедра „Минералогия и петрография“ (1992–2000), заместник-председател на Българското геологическо дружество (1994–1996), председател на Комитета по геология (1997), член на специализирания научен съвет по геологически науки към ВАК и подкомисията по „Земни науки“ от 2005 г.



Освен научна и преподавателска дейност, проф. Маринов е автор и на сборника с разкази „По пътя на съкровищата“ (2008), в който по достъпен и живописен начин споделя спомени от своята дългогодишна геоложка практика из различни кътчета на България. През годините издава още: „Със звезда на челото“ – разкази (2015).

Той е семеен – съпругата му е фармацевт, с която го свързват дълги години съвместен живот, двамата имат една дъщеря, завършила специалност „Хидрогеология“ в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ през 1995 г.

По случай неговия 90-годишен юбилей изказваме най-сърдечни поздравления и дълбока признателност към проф. дгн Тодор Михайлов Маринов за богатия му научен, преподавателски и житейски път. Желаем му крепко здраве, още дълги години изпълнени с обичта на близките, уважението на колегите и радостта от споделените знания и мъдрост!

Геологопроучвателен факултет
при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“

INTEGRATED GEOPHYSICAL RESEARCH ON THE ANCIENT AND MEDIEVAL FORTRESS LOCATED ON CAPE CHIRAKMAN, THE TOWN OF KAVARNA

Miroslav Anchev[1], Zuzana Karakasheva[1], Velislav Bonev [2]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: miroslav.anchev@gmail.com; ivanov@abv.bg; karakasheva11234@abv.bg

[2] Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Centre of Archaeometry with Laboratory of Restoration and Conservation, Faculty of History, 1164 Sofia; E-mail: velislav.bonev@gmail.com

ABSTRACT. In this article we present geophysical investigation carried out with state-of-the-art equipment on the Antiquity and Middle Ages fortress located on Cape Chirakman, the town of Kavarna. A geomagnetic survey with high sensitivity potassium quantum magnetometer and a ground-penetrating radar survey with a 350 MHz wireless antenna were carried out. The retrieved results were integrated in a geographic information system environment and complemented with the archaeological documentation. The conducted research is an important source of information for the planning of future archeological research and site conservation on an archaeological site of high tourist, expositional, and scientific importance.

Key words: magnetic gradiometry, ground-penetrating radar (GPR), archaeological geophysics, fortress on Cape Chirakman.

ИНТЕГРИРАНИ ГЕОФИЗИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА АНТИЧНА И СРЕДНОВЕКОВНА КРЕПОСТ НА НОС ЧИРАКМАН, ГРАД КАВАРНА

Мирослав Анчев[1], Зузана Каракашева [1], Велислав Бонев[2]

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

[2] Софийски Университет „Св. Климент Охридски“, Център по Археометрия с лаборатория по реставрация и консервация, Исторически факултет, 1164 София

РЕЗЮМЕ. В тази статия са представени геофизичните изследвания, извършени със съвременно оборудване на територията на античната и средновековна крепост на нос Чиракман, гр. Каварна. Извършени са геомагнитно проучване с високо чувствителен калиев квантов магнитометър и георадарно проучване с 350 MHz безжична антена. Получените резултати са интегрирани в ГИС среда допълнени с археологическата документация. Направените изследвания са важен източник на информация при планирането на бъдещите археологически проучванията и теренната консервацията на проучваният археологически обект с висока туристическа, експозиционна и научна стойност.

Ключови думи: магнитна градиометрия, георадар, археологическа геофизика, крепост на нос Чиракман.

Introduction

The Bizone archaeological site is located in the end of cape Chirakman, the town of Kavarna (Fig. 1). The earliest habitation remains unclear. The site probably reached its peak in the Hellenistic period. The earliest known mention of the name Bizone was in a decree from Histria in honor of Agathocles from 200 BC. A strong earthquake in the 1st century AD destroyed a large part of the ~~city~~ town. In the 6th century, the fortress was subjected to Avar-Slavic invasions. In the Middle Ages, the site was restored under the name of Karvuna.



Fig. 1. Regional map with location of the archaeological site

Most of the revealed structures are dwellings and stone buildings. (Bonev et al. 2022) Buildings from different periods often overlap and intersect, which makes the field research complex from an archaeological point of view. This requires careful planning of archaeological investigations (Milo et al., 2022; Tzankov et al., 2022; Malamidou et al., 2023), for which the present study was conducted.

For the geophysical~~,~~ survey, an area of around 5000 sq. m. between current excavation sectors was selected. Geomagnetic survey and ground penetrating radar (GPR) were chosen for this, being well-established methods providing speed for the magnetics (Becker, 2008; Tzankov et al., 2017) and possibility to retrieve depth information from GPR (Capizzi et al., 2007; Tsankov, 2023; Tsankov & Kisyov, 2015; Tzankov & Zidarov 2024).

Measurement techniques, methods and deliverables

Before the start of the geophysical works, the area for survey was prepared for work. Part of the plateau of Cape Chirakman was cleared of vegetation. Then, on the area prepared for measurement, a reference square grid of geodetic points was created with a northwest-southeast orientation, coinciding with that of regularly conducted archaeological excavations.

Geomagnetic survey

For the geomagnetic survey, a GSMP-25G potassium quantum gradiometer, with two magnetic sensors placed above each other and a differential GNSS (DGNSS) receiver for position tracking were used for measuring magnetic values along the profiles. A GSM-19W proton magnetometer was placed stationary in an area with a minimal vertical and horizontal gradient for a local magnetic base station.

The field survey was carried out in a zigzag motion along traverses with 1 m spacing between them. The profile lines were geodetically referenced to the BGS2005 cadastral coordinate system and to the local archeological network. Where possible, the profile lines for the geomagnetic survey were extended to maximise coverage, in which case the DGNSS receiver integrated in the magnetometer was used for positioning.

The vertical spacing between the two magnetic sensors was 1.54 m. Magnetic data (T_{rover}) was corrected for diurnal variation with data from the base station (T_{base}) with reference field value (datum) of *Tref* = 48 650 nT using the formula

$$T_{corr} = T_{rover} - T_{base} + T_{ref} \quad (1)$$

Based on the processed primary data and using grid generation software, grids with 0.5 x 0.5 m cell size were created. The following basic digital models of the geomagnetic field in UTM-35N projected coordinate system were generated:

- Map of the total magnetic intensity for the first level (Fig. 2);
- Map of the vertical gradient of the magnetic field (Fig. 3).

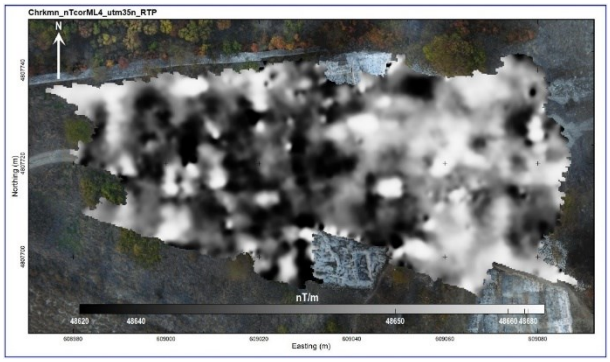


Fig. 2. Map of the total magnetic intensity in the studied area

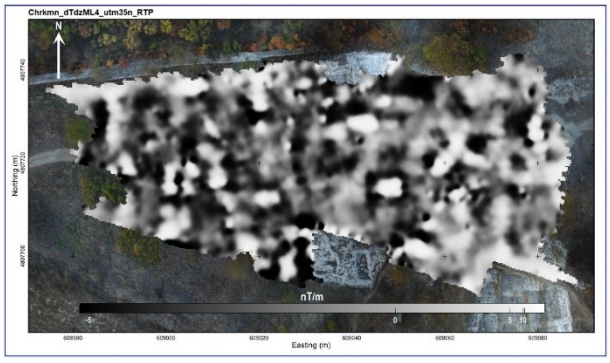


Fig. 3. Map of the vertical magnetic gradient in the studied area

Ground penetrating radar survey

In order to improve the quality and informativeness of geomagnetic data and enhance the magnetic effect of hidden underground anthropogenic sources of different size and depth, several common processing steps were followed and standard filters have been applied to the data. This included:

- Striping and displacement errors from zigzag motion and heading error were corrected with microleveling.
- A reduction to pole filter was applied to simplify the field through removing anomalies' distortions from inclination and declination of earth magnetic field.
- High-pass filters for removing anomalies with sizes larger than 5, 10, and 20 m, as well as further anomalies shape, size, and location enhancement filters.

Georadar survey

For the GPR survey, a UtilityScan unit was used: a wireless, portable system using HyperStacking technology, ensuring high data quality, with an integrated LineTrac system, equipped with a central frequency 350HS antenna.

GPR data were processed using ReflexW software with the following main steps:

- Geometrisation, including setting coordinates, orientation, and alignment of the profiles.
- Basic processing by noise removal, signal gain adjustments, background removal, etc.
- Advanced processing involving predictive deconvolution to suppress reverberations, signal migration for accurate spatial representation, etc.

Velocity of electromagnetic waves in the subsurface was determined using hyperbola fitting and comparison with known reflectors.

Analysis and results

Geomagnetic data

Magnetic intensity is in the range of 48 613 – 48 677 nT (64 nT) with 80% in the range of 48 638.8 nT – 48 654.5 nT (16 nT). Vertical gradient is in the range of -15.33 – 13.29 nT/m) with 80% in the range of -3.35 – 2.73 nT/m.

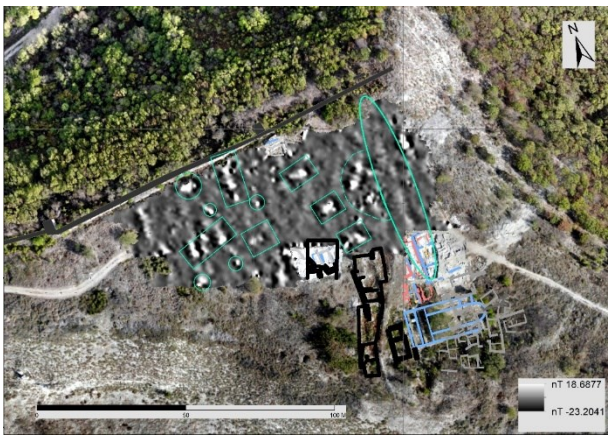


Fig. 4. Map of the total magnetic intensity in the studied area with anomalies bigger than 5 m removed (5 m size high-pass filter) with archaeological plans and outlined anomalies

Data was integrated in GIS environment with archaeological field data and plans, and visually analysed for anomalies from ancient activity based on shape, intensity, and correlation with excavated archaeological structures. Several anomalies that cannot be associated with surface shape, obstacles, and known modern activities causing distortion in the magnetic signal have been identified and outlined (Fig. 4 and Fig. 5).

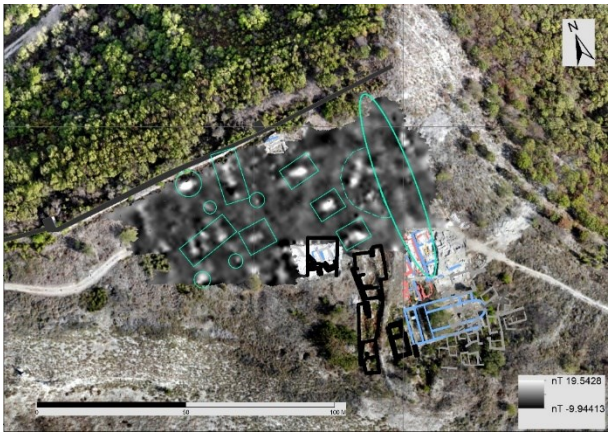


Fig. 5. Map of the vertical magnetic gradient in the studied area with archaeological plans and outlined anomalies

Magnetic anomalies were enhanced with palettes and colour ramps that improve outlines and visual perception (Fig. 6). High intensity anomalies that are identified can be produced from ferromagnetic archaeological structures, like fire pits and large pottery concentrations. Low magnetic linear anomalies can be associated with walls or concentrated stones with non-magnetic properties.

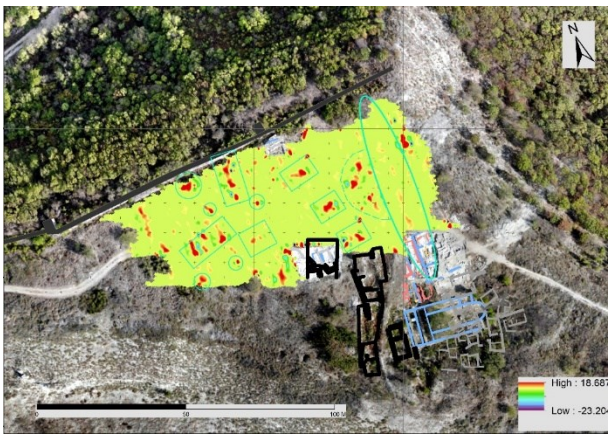


Fig. 6. Map of the of the total magnetic intensity with enhanced colour ramp for high values and anomaly outlines

Although several anomalies were outlined, they cannot be unequivocally associated with ancient activities and can be produced by modern activities, like undocumented trenches, old piles from excavations and geological sources; thus, they must be tested with field excavations.

Ground penetrating radar survey

GPR data was exported as radargrams (Fig. 7) and a 3D model of reflections was created (Bornik & Neubauer, 2022). From the model, several planar slices at different depths were created and inspected for anomalies that can be produced from ancient features (Fig. 8 and Fig. 9). Features with high reflectivity are expected from zones with significant dielectric difference between stone walls, bedrock foundation, cultural layers, and accommodating mediums. For electromagnetic wave velocity, a mean value of 0.011 m/ns was estimated. GPR signal is characterised with low permittivity and a maximum depth of investigation of 2 m was estimated. In general, only one meaningful anomaly (Fig. 10) can be extracted from the GPR data.

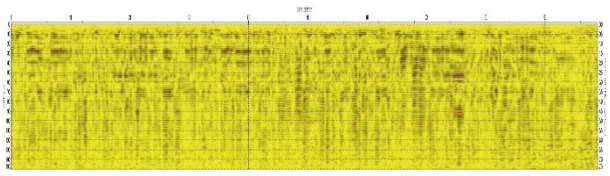


Fig. 7. Example of a radargram

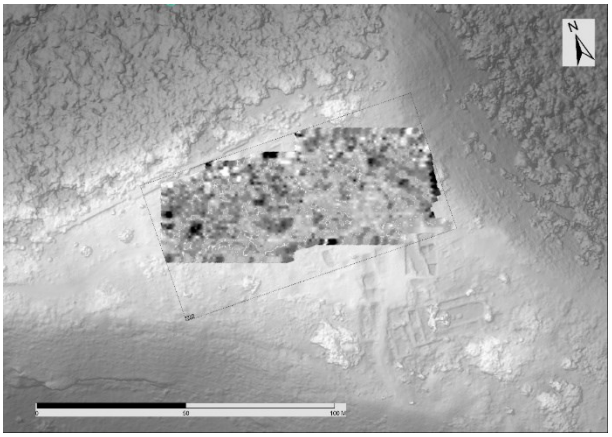


Fig. 8. Example of a GPR slice at an estimated depth of 1 m

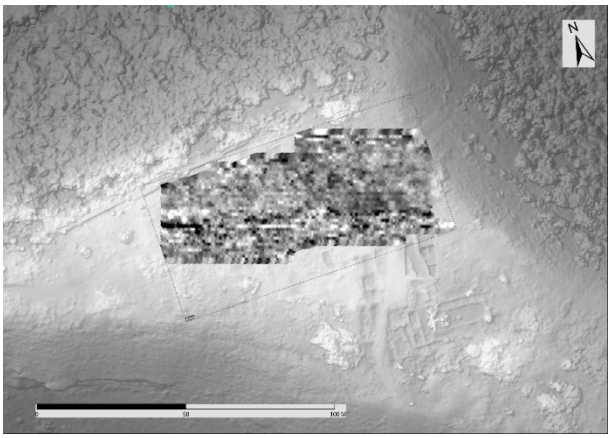


Fig. 9. Example of a GPR slice at an estimated depth of 0.5 m



Fig. 10. A GPR anomaly (yellow rectangle) at an estimated depth of 0.5 m and archaeological plan

The possible reasons for this can be mineral composition, high values of clay components in sediments, and a heterogeneous medium. A multi-frequency antenna and higher

profile density could return better results in further investigations.

Conclusions

In summary, a geophysical investigation on the archaeological site on Cape Chirakman, the town of Kavarna was conducted with the following results and conclusions:

- An area of 5000 sq. m was examined with magnetometry and magnetic gradiometry with 61 parallel profile lines with 1m spacing.
- An area of 3300 sq. m. was investigated with ground penetrating radar with parallel profile lines with 1m spacing and 4 perpendicular profiles.
- Geophysical data were processed and analysed. Digital maps of the magnetic field and electromagnetic wave reflections were produced.
- Archaeological field maps and plans were digitised and integrated with geophysical data aerial and terrestrial photogrammetric models in GIS environment for future use and excavation planning and analyses.
- On the retrieved geophysical data, multiple anomalies are visible that can be produced from ancient activities.
- Anomalies were marked as future research areas in the planning of the archeological investigations (Fig. 11).



Fig. 11. Magnetic anomalies (green lines) and GPR anomalies (yellow lines) integrated in GIS environment with archaeological plans and DEM

Although several anomalies were marked they do not all have closed contours or forms and must be tested for verification with different nondestructive or destructive methods. Retrieved information from further archaeological field data from testing of anomalies can be useful for further analysis and constraining geophysical data.

The integration of geomagnetic, GPR, and archaeological field data enabled the identification of multiple anomalies of potential archaeological significance. The study demonstrates the effectiveness and limitations of multi-method geophysical approaches for non-invasive investigation of complex archaeological landscapes.

References

Becker, H. (2008). Caesium-magnetometry for landscape-archaeology. CRC Press, p. 38. ISBN: 9780429207372. https://doi.org/10.1201/9780203889558-12

Bonev, V., Vasileva, E., Madzharov, K., Dimitrova, Y., Peevski, R. (2022). Archaeological excavations at Cape Chirakman / Bizone, Kavarna 2016–2021. *Pontika, 55*, 55-113. ISBN: 973-7951-29-8.

Bornik, A. & Neubauer, W. (2022). 3D Visualisation Techniques for Analysis and Archaeological Interpretation of GPR Data. *Remote Sensing, 14*(7), Article 1709., https://doi.org/10.3390/rs14071709

Capizzi, P., Cosentino, P. L., Fiandaca, G., Martorana, R., Messina, P. & Vassallo, S. (2007). Geophysical investigations at the Himera archaeological site, northern Sicily. *Near Surface Geophysics, 5*(6), 417-426. https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007024

Malamidou, D., Martinez-Sève, L., Bastide, M., Blond, N., Boubounelle, O., Chalazonitis, I., Crépy, M., Déderix, S., Delahaye, A., Guay, J-F., Lucas, T., Ralli, P., Rizos, E., Tzankov, C. & Zidarov, P. (2023). Terpni: Campagne de terrain 2022. *Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger* [En ligne], Grèce, mis en ligne le 20 octobre 2023, consulté le 21 octobre *2023*. https://doi.org/10.4000/baefe.9759

Milo, P., Vágner, M., Tencer, T. & Murín, I. (2022). Application of Geophysical Methods in Archaeological Survey of Early Medieval Fortifications. *Remote Sensing, 14*(10), Article 2471. https://doi.org/10.3390/rs14102471

Tsankov, H. (2023). Geofizichni izsledvaniya na nisha 1 v peshterata Bacho Kiro. Sbornik dokladi ot XI-ta Natsionalna konferentsiya po geofizika, 9 yuni 2023, Sofia, on CD. https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N4

Tsankov, H & Kisyov, A. (2015). Eksperimentalni georadarni izsledvaniya na Pamuk mogila kray s. Brestovitsa, obshtina Rodopi, oblast Plovdiv. Godishnik na MGU “Sv. Ivan Rilski”, tom 58(I), 242-246. ISSN 1312-1820.

Tzankov, C., Kisyov, A. & Leshtakov, P. (2017). Geophysical studies of traces of ancient mining and metallurgy in the eastern part of the Srednogorian metallogenic zone. Proc. 9th Congress of Balkan Geophysical Society, 5-9 November 2017, Antalya, Turkey (pp. 1-5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.201702600

Tzankov, C., Kisyov, A., Milenkovic, B. & Torbatov, S. (2022). Non-Destructive Research of the Regianum Ancient Fortress, Kozloduy, Bulgaria – Part of the Danube Limes. Proc. of NSG2022 28th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, September 18-22, 2022, Belgrade, Serbia (pp. 1-5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.202220197

Tzankov, C. & Zidarov, P. (2024). Integrated geophysical study of the ancient city of Cabyle, Southern Bulgaria. Proceedings of the 12th Congress of the Balkan Geophysical Society “Geophysics for the Better World”, 27-31 May 2024, Kopaonik, Serbia, Vol. 2024 (p. 1-5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.202149BGS24

INFLUENCE OF THE INITIAL GRADIENT AND STRUCTURAL STRENGTH OF CLAY LAYERS ON THEIR SETTLEMENT

Ina Bozhinova-Popova

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

ABSTRACT. The accurate determination of the settlement of clay soils under the conditions of consolidation due to filtration enables a more precise preliminary assessment of the subsoil and the behaviour of buildings and facilities in both under- and overground construction. The research presented in this study focuses on clarifying the influence of the initial hydraulic gradient and the structural strength of clay soils on their settlement. Using a Fourier series, relationships have been established between pore pressure, the thickness of the clay layer, and the time factor. After differentiation, a formula has been derived for determining the initial hydraulic gradient of the soil.

Key words: clayey soils, filtration consolidation, load, settlement, structural strength, initial gradient.

ВЛИЯНИЕ НА НАЧАЛНИЯ ГРАДИЕНТ И СТРУКТУРНАТА ЯКОСТ НА ГЛИНЕСТИТЕ ПЛАСТОВЕ ВЪРХУ ТЯХНОТО СЛЯГАНЕ

Ина Божинова-Попова

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

РЕЗЮМЕ. Коректното определяне на слягането на глинестите почви в условията на филтрационна консолидация дава възможност за по-точна предварителна оценка на земната основа и поведението на сгради и съоръжения при подземното и надземното строителство. Изследванията, предмет на настоящата разработка, се отнасят до изясняване влиянието на началния градиент и структурната якост на глинестите почви върху тяхното слягане. С помощта на ред на Фурие са представени зависимости между порния натиск, мощността на глинестия пласт и фактора време. След диференциране е изведена формула за определяне на началния хидравличен градиент на почвата.

Ключови думи: глинести почви, филтрационна консолидация, натоварване, слягане, структурна якост, начален градиент.

Въведение

Терминът „филтрационна консолидация“ в земната механика изразява процес на уплътняване и слягане под действие на дадено натоварване на глинестите почви, чийто пори са запълнени с вода. Тогава тази деформация е свързана с изтласкването на водата извън почвата до настъпване на равновесно положение. Този процес протича във времето и зависи от редица фактори като: големина на товара, мощност и дренажни условия на глинестия пласт, коефициент на порите, коефициент на филтрация, структурна якост на почвите и други.

Направените по-долу изводи важат само за глинести почви, които имат определени структурни връзки. Такива са почвите с плиоценски произход. Тези почви обикновено се намират на дълбочина под 5 – 6 m и често представляват земна основа на съоръжения, прилежащи до дълбоките изкопи – метрополитен, дълбоки подземни гаражи, вкопани улици, подземни транспортни тунели и други.

Изводите важат при предпоставката, че слеганията се дължат на консолидационни процеси и то преди всичко на филтрационната консолидация на почвите.

Изложение

Известно е, че след създаването на теорията на филтрационната консолидация от Терцаги, по-нови изследвания (Флорин, 1961; Божинов, 2013 и други) доказват, че идеалният случай на консолидация, създаден от Терцаги (Терцаги, 1962), много рядко се покрива с действителното поведение на почвите. При положение, че глинестите почви имат структурна якост и начален градиент на филтрация, консолидацията се влияе значително от тях.

Ако се означи напрежението върху глинестия пласт с q (това напрежение може да бъде създадено от фундаменти, от геоложки товар или друг външен товар), напрежението върху скелета на почвата със σ и порният натиск с u, то важи равенството:

$$q = \sigma + u \quad (1)$$

В действителност степента на консолидация в началото не е нула, тъй като порният натиск почти никога не е равен на приложеното натоварване. За прогнозиране на промяната на порния натиск се използват някои от приетите методи, например, този на Бишоп – Скемптън (Bishop, 1962) чрез параметъра $\bar{B}$. Стойността на порното налягане се изчислява по формулата:

$$u = u_0 + \bar{B}.q \quad (2)$$

където u_0 е порното налягане, съществуващо преди прилагането на напрежение q; $\bar{B}$ е коефициент на пропорционалност, получен емпирично, като се използват триаксиални изпитвания в неконсолидирано-недренирано състояние на почвата; u е порният натиск, получен след прилагането на напрежение q. Обикновено коефициентът $\bar{B}$ е по-малък от единица, с изключение на много слаби и водонаситени почви.

В края на консолидацията се приема, че показателят за степента на консолидация става равен на единица (или 100%), което не се случва тъй като хидравличният градиент става толкова малък, че се изравнява с началния градиент

– i_0 (Флорин, 1961), с което се блокира по-нататъшното изтичане на води от порите на почвата. Най-високата стойност на степента на консолидация достига до 0,8 (80%).

В процеса на консолидация нараства напрежението върху скелета σ и се намалява порният натиск u. Като следствие на това пластът слиза. Тук може да се направи коментар за влиянието на структурната якост върху слягането. Така например, ако напрежението σ, което се предава върху скелета на почвата е по-малко от структурната якост $\sigma_{\text{стр}}$, не би трябвало да се очаква слягане, тъй като се приема, че при напрежения, по- малки от структурната якост, почвата се разглежда като квазиеластично твърдо неслегваемо тяло. При тези случаи, например, при водопонижение не би трябвало да се очаква слягане, т.е. ако напрежението $\gamma_w h \leq \sigma_{стр}$ $(q \leq \sigma_{стр})$, където $\gamma_w.h$ е натоварването при водопонижение на дълбочина h. Ако, обаче, създаденото напрежение е по–голямо от структурната якост на почвата, следва да се очаква слягане, което е контролирано от разсейването на порния натиск.

Ако се отрази и влиянието на началния градиент, слягането също се повлиява от условието за ограничение на разсейването на порния натиск поради изискването, че напорът на водата при изтичане трябва да бъде по-голям от началния градиент.

При двустранна филтрация и постоянна стойност на създадените напрежения в пласта, уравнението на линията на порния натиск е дадено в литературата като ред на Фурие (Терцаги, 1962; Тейлор, 1960, Божинов, 2013):

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_0}{M}\left(sin\frac{M.z}{h}\right) e^{-M^2T} \quad (3)$$

където:

u_0 – начална стойност на порния натиск, kPa;

$M = \frac{1}{2}\pi(2m+1)$ - субституция (4)

m - пореден номер на члена на реда на Фурие;

h – дебелина на глинестият пласт, m;

z - дълбочина на точката, в която се определя порния натиск, m;

T – фактор-време.

Първата производна на уравнението дава тангенсът на наклона i на линията, която дефинира порния натиск:

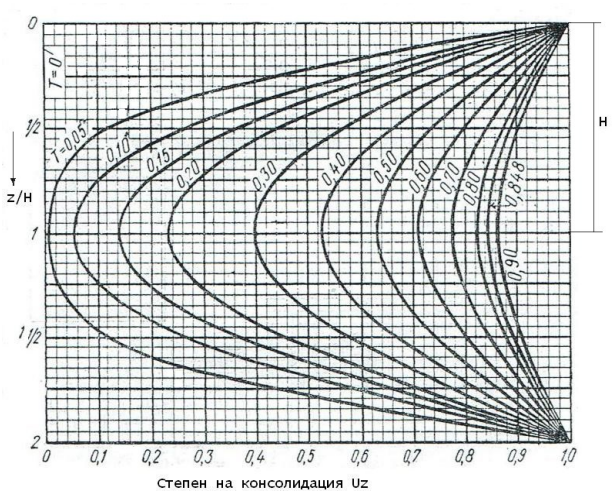
$$i = \frac{du}{dz} = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_0}{h}\left(cos\frac{M.z}{h}\right) e^{-M^2T} \quad (5)$$

За $z = 0$ и $z = h$ се получава тангенсът на наклона на линията на границата на глинестия пласт с дренажните пластове. Този наклон, на практика, представлява и градиента на порния натиск на дренажната граница.

За $z = 0$ косинусът има стойност единица. Това се отнася за горния дренажен пласт. Поради симетричност на задачата, това условие важи и за долния дренажен пласт. Граничните стойности на градиента на порния натиск не могат да станат по-ниски от началния градиент на почвената среда i_0. Това дава основание да се напише условието:

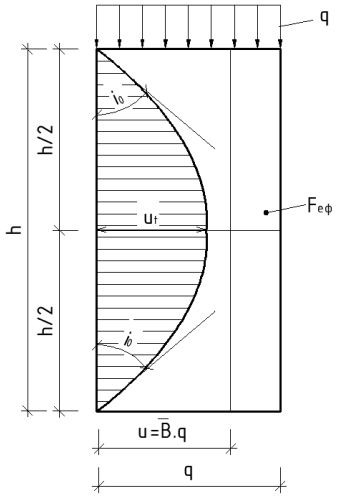
$$i_0 = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_0}{h} e^{-M^2T} \quad (6)$$

Полученото уравнение се решава по итерационен път. Първите 3 – 4 стойности от реда се използват като за определени стойности на началния градиент i_0, мощността на слегваемия пласт h и началната стойност на порния натиск u_0 се получава факторът време T. Тук може да се използва фиг. 1 за илюстрация на зона, която не консолидира поради влиянието на началния градиент.



Фигура 1: Графика на Тейлър за зависимостта на степен на консолидация Uz, Фактор-време T и мощност на пласта H

Например, при получаване на гранична стойност на фактора време T = 0,6 щрихованата част от фигурата не консолидира, а площта на нещрихованата част ($F_{еф}$), разделена на деформационния модул на почвата, дава слягането на пласта – фиг. 2 (формула 7). На фигурата ясно личи площта на диаграмата на ефективните напрежения, които диктуват слягането на пласта.



Фигура 2: Схема на разпределение на ефективните напрежения и порния натиск на пласт с мощност h и двустранна филтрация (i_0 - начален градиент)

$$S = \frac{F_{еф}}{E} \quad (7)$$

където: S – слягане на пласта, m;

$F_{еф}$ – площ на диаграмата на ефективните напрежения, kN/m;

E – усреднен деформационен модул на почвата от пласта с мощност *h*, kN/m^2.

Заключение

Практиката показва, че за софийските почви със значителна структурна якост и начален градиент над 2, слягането вследствие на филтрационна консолидация и при водопонижение на практика е нищожно и е доста по-малко от очакваната стойност при положение, че се отчитат разгледаните два фактора. Трябва да се вземе под внимание и фактът, че в глинестите почви е възможно слягането да продължи много по-дълго, поради забавена консолидация. Така 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 засегнатите сгради. Въз основа на данните от извършен мониторинг сляганията могат да се прогнозират с достатъчно висока точност.

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.

Божинова-Хаапанен А. (2021). „Деформационни свойства на структурирани глини“, 2021.

Германов, Т. (1999). Земна механика, София.

Тейлор, Д. (1960). Основы механики грунтов, Москва.

Терцаги, К.; Пек, Р. Б. (1962). Земна механика в инженерната практика, София.

Флорин, В. (1961). Основы механики грунтов Том II, Ленинград, Москва.

Цытович Н. А. (1973). Механика грунтов, Москва.

Bishop, A. W.; Henkel, D. J. (1962). “The measurement of Soil properties in the Triaxial Test”, London.

STABILITY ASSESSMENT OF THE *TORANICA* TAILINGS DAM

Vasil Bodurov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: vasko_bo@yahoo.com

ABSTRACT. This study presents a comprehensive analysis and assessment of the structural stability and functional performance of the *Toranica* tailings dam near the town of Kriva palanka, North Macedonia, based on monitoring data from 2022. The dam complex includes upstream and downstream embankments, a settling lake, drainage systems, and auxiliary infrastructure. Regular technical inspections, piezometric monitoring, hydrological measurements, and numerical modelling were conducted to evaluate filtration, stress–strain behaviour, and safety factors. Results confirm that the dam structures operated within safety parameters, with no critical deformations or filtration anomalies observed. Stability modelling validated the geotechnical reliability of both embankments, supporting continued safe operation and further vertical expansion. Recommendations for future monitoring and maintenance are proposed to ensure long-term structural integrity and environmental compliance.

Key words: hydro-tailings pond, geophysics, electrical resistivity tomography (ERT).

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТТА НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ „ТОРАНИЦА“

Васил Бодуров

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

РЕЗЮМЕ. Това проучване представя цялостен анализ и оценка на структурната стабилност и функционалните характеристики на хвостохранилището „Тораница“ близо до Крива паланка, Република Северна Македония, въз основа на данни от мониторинг от 2022 г. Комплексът от язовирната стена включва горни и долни насипи, утаително езеро, дренажни системи и спомагателна инфраструктура. Провеждани са редовни технически инспекции, пиезометричен мониторинг, хидрологични измервания и числено моделиране за оценка на филтрацията, поведението на напрежение-деформация и коефициентите на безопасност. Резултатите потвърждават, че язовирните конструкции са функционирали в рамките на параметрите за безопасност, без наблюдавани критични деформации или аномалии във филтрацията. Моделирането на стабилността е потвърдило геотехническата надеждност на двата насипа, поддържайки продължаващата безопасна експлоатация и по-нататъшното вертикално разширение. Предлагат се препоръки за бъдещ мониторинг и поддръжка, за да се гарантира дългосрочна структурна цялост и екологично съответствие..

Ключови думи: хвостохранилище, геофизика, електротомография.

Introduction

Tailings dams are critical infrastructure units in mining operations, designed to safely contain the fine-grained waste (tailings) generated during mineral processing (Aleksandrova and Koprev, 2020). These engineered embankments not only support the ongoing production activities of a mine, but also play a vital role in environmental protection by preventing the release of potentially harmful materials into the surrounding ecosystem. As stated by Tomova (2023), mineral processing is mainly focused on extracting the most valuable components from the ore, while the rest of the material is disposed of at the tailings ponds. Their importance has grown in the context of increasing mining volumes, stricter environmental regulations, and the global push toward sustainable development.

In modern mining practice, the safe and responsible management of tailings is essential to achieving the principles of sustainable development – meeting present economic and social needs without compromising the ability of future generations to meet theirs. This involves minimising the ecological footprint of mining activities, ensuring the structural integrity of waste containment facilities, and maintaining public and environmental safety.

As Grigorova and Nishkov (2014) stated in recent years, the scale of mining operations has expanded significantly due to advancements in technologies related to drilling, hauling, bulk material handling, crushing, and mineral processing. These improvements have enabled higher production rates and the economic extraction of lower-grade ores, but they have also led to a dramatic increase in the volume of mine waste, particularly tailings. As a result, modern tailings management now faces the dual challenge of safely handling growing quantities of waste while minimising long-term environmental risks.

According to Tomova (2023), the management of mine waste is a complex and multifaceted task. Ensuring the safe and efficient disposal of extractive waste materials poses both technical and environmental difficulties. Numerous studies emphasise that mining and ore processing activities produce substantial quantities of waste, which require proper handling to minimise environmental hazards. Among the various sources of risk in mining operations, tailings ponds represent one of the most critical. As such, the selection of suitable methods for tailings discharge and dam construction is essential for the effective operation of these facilities (Tayebi-Khorami et al., 2019; Yankova, 2020). The operational sequence for constructing and raising combined mine waste facilities must be carefully planned and executed to ensure long-term safety and performance (Aleksandrova et al., 2021).

The *Toranica* Mine in North Macedonia, which processes lead-zinc ores through flotation, produces a significant volume of tailings – approximately 90% of the ore mass – mixed with flotation reagents (Petrov et al., 2024).

The *Toranitsa* tailings pond, with the tailings dam and the tailings lake, are in the immediate vicinity of the town of Kriva Palanka, at an approximate distance of 15 km, and were formed for the needs of the *Toranitsa* mine.

The location of the tailings dump is 4 km away downstream of the flotation factory in the Kriva Reka valley, between the "Varoshani" and the "Tsepen Kamen", which is located immediately after the confluence of the Toranichka River in the Kriva Reka River.



Fig. 1. Location of the *Toranitsa* hydro-reservoir (closed red polygon)

The proper disposal of this material is vital for both environmental and operational reasons. The *Toranica* tailings dam, located near the town of Kriva Palanka, serves a dual purpose:

- secure storage of flotation tailings;
- clarification of process water before it is released into the natural water system.

This paper presents an integrated analysis of the stability and functionality of the *Toranica* tailings dam system based on monitoring data from 2022. The study aims to verify the dam's structural integrity, evaluate its performance under current operational conditions, and propose recommendations for its continued safe use in line with sustainable mining practices.

Site description - location and general layout

The *Toranica* tailings dam complex is situated approximately 15 km east of Kriva Palanka in northeastern North Macedonia. It lies in a narrow valley formed by the Kriva and the Toranica Rivers and was constructed to serve the operational needs of the nearby *Toranica* lead-zinc mine. The tailings facility consists of a system of interconnected structures forming a canyon-type accumulation basin that supports both tailings deposition and water management. (Figure 2).



Fig. 2. Satellite image of the *Toranica* tailings pond

The hydrotechnical complex includes the following major elements:

- Upstream retention dam (retention embankment): built with a clay core and local materials, with gradual height increases using cycloned tailings sand.
- Downstream sand dam: formed by sequentially depositing cycloned sand fractions, reinforced with geosynthetic materials and drainage systems.
- Tailings lake (settling basin): formed between the two dams, it enables sedimentation of fine tailings and allows for water clarification.
- Diversion tunnel: redirects the natural flow of the Kriva River to prevent inflow into the tailings facility during floods.
- Overflow collector system: removes clarified water from the lake through a network of predesigned outlet structures.
- Pulp pipeline: a gravity-fed PVC pipeline that transports tailings slurry from the flotation plant to the dam, equipped with pressure-reduction chambers

The *Toranica* tailings dam is designed with dual functionality:

1. Storage of tailings produced during flotation of lead-zinc ore.
2. Retention and treatment of water used in the process, allowing for sedimentation of fine particles and controlled release of clean water into the environment.

The design follows a progressive construction concept, where both the upstream and downstream dams are raised in parallel over time to increase the storage capacity as needed. The separation of sand and fine fractions via hydrocyclones enables efficient material use: sand is used to build the dam, while fine material settles in the lake.



Fig. 3. Part of old and new collector and precipitators

This modular and adaptive design, combined with systematic monitoring and environmental control, supports the long-term sustainability and safety of the *Toranica* mine’s tailings disposal operations.

Geological and geotechnical setting

The stability of tailings dam structures is heavily influenced by the geological and hydrogeological characteristics of the foundation terrain. A comprehensive understanding of the subsurface conditions at the *Toranica* tailings facility is essential for assessing both the structural integrity and long-term performance of the dam complex. The importance of creating reliable 3D geological models for slope stability assessment in similar mining contexts has been demonstrated by Alexandrova

(2018), who applied such modelling to the *Mizia* quarry, highlighting the role of geological heterogeneity in determining slope behaviour.

The *Toranica* tailings dam is located in a narrow valley formed by the Kriva and the Toranica Rivers, underlain by a diverse geological sequence comprising both unconsolidated and crystalline bedrock materials. The area exhibits a combination of alluvial and proluvial deposits (gravels, sands, and blocks) along the riverbeds, as well as metamorphic rocks, primarily albite-quartz-chlorite schists and gneisses, in the valley flanks and foundation zones.

These crystalline rocks, common in the region of "Cepen Kamen," are categorised as medium to weakly fractured and partially weathered, with varying degrees of tectonic deformation. The alluvial sediments in the river valleys represent relatively young and unconsolidated deposits, often forming the immediate substrate beneath the embankments.

Engineering-geological characteristics

Upstream dam zone

The upstream (retention) dam is founded partly on albitised schists and gneisses, and partly on thick alluvial-proluvial cover. These materials demonstrate variable geomechanical properties:

- The albite-quartz-chlorite schists are fine-grained, grey-green rocks with schistosity and common open fractures. These fractures allow limited groundwater circulation, classifying the rock as a relative hydrogeological collector in fractured zones.
- The gneisses are more massive and coherent, showing moderate strength and low permeability outside faulted zones.

According to the GN-200 geotechnical classification, these rocks fall into Category V, indicating moderately stable conditions suitable for dam foundation with appropriate engineering measures.



Fig. 4. Upstream dam zone

The alluvial-proluvial sediments – gravelly-sandy with frequent large clasts – are generally highly permeable (kf = 10^{-3} to 10^{-5} cm/s) and serve as unconfined aquifers in places. Their thickness ranges from 15 to 34 metres, with shallow groundwater levels between 0.8 and 1.9 metres.

Downstream dam zone

The downstream (sand) dam also rests on similar alluvial and crystalline materials. The geotechnical characteristics are consistent with those observed in the upstream area, but here, the hydraulic conductivity and strength of the sandy deposits are more critical due to the dam being constructed entirely of tailings-derived sand. These sands are deposited hydraulically and compacted by natural sedimentation.

To improve geotechnical performance, a drainage system with geotextiles, geomembranes, and graded filters was installed in the downstream toe area. This design helps manage seepage and enhances slope stability.

The hydrogeological regime of the area is influenced by:

- Surface water from the Kriva and the Toranica Rivers, which is diverted via a dedicated tunnel to prevent direct inflow into the tailings pond.
- Shallow groundwater in alluvial sediments, with locally high water tables.
- Seepage from the tailings pond, monitored through piezometers placed within and around both dams.



Fig. 5. Downstream (sand) dam

The permeability of the underlying materials varies significantly. While fractured crystalline rocks and coarse alluvial layers allow groundwater flow, the presence of a clay core and engineered filters in the dams helps control seepage paths and reduces uplift pressures.

Objectives and scope of monitoring

The monitoring program at the Toranica site is intended to:

- Ensure the structural stability of the upstream and downstream dams.
- Control and analyse the pore water pressures within the embankments.
- Track the water level fluctuations in the settling pond (tailings lake).
- Evaluate the performance of drainage and overflow systems.
- Detect possible deformations or displacements in the dam body or foundation.
- Verify compliance with regulatory and design safety requirements.

To complete this task, the following techniques are applied regularly:

- **Piezometric monitoring**. A network of 20 piezometers is installed across the upstream and downstream embankments, providing data on groundwater levels and pore water pressures. The piezometers are strategically placed to cover different zones - 6 piezometers within the upstream (retention) dam and 14 piezometers in the downstream (sand) dam. Data from the piezometric network in both the upstream and downstream dams demonstrated consistent and predictable pore water pressure behaviour. Random piezometer readings from downstream dam are shown on Figure 6.

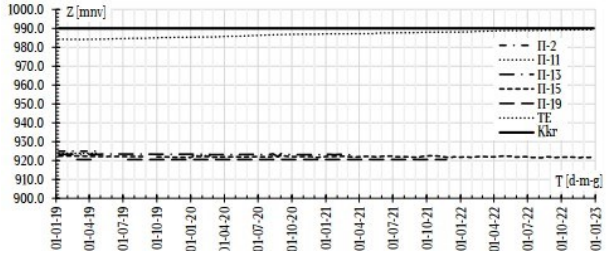


Fig. 6. Water level in piezometers P-2, P-11, P-13, and P-15, water level in a sedimentary lake (TE), and elevation of the crown of a downstream dam (Ккг) for the year 2022.

Piezometers in the downstream dam showed low and stable water tables, well below the dam crest, confirming the efficiency of the drainage system.

Piezometers in the upstream dam also indicated controlled phreatic levels, especially in areas reinforced with geotextiles and geocomposites.

- **Surface water level monitoring**. The water level in the tailings pond is measured at least four times per month.
- **Flow rate measurements**. Discharge from the overflow collector and drainage outlets is monitored to track seepage and surface water outflows. Measurements help identify anomalies, such as increased seepage or blockages in the drainage systems.
- **Visual inspections**. Visual inspections are performed monthly and after major rainfall events. Observations are documented in technical reports and supplemented by photographic records.
- **Geodetic surveys**. Benchmark points are installed on both dams for detecting potential displacements. Geodetic measurements are taken periodically to verify that the embankments remain stable and that no differential settlement is occurring.
- **Water quality control**. Water samples from the tailings pond, drainage discharges, and monitoring wells are analysed for physical and chemical parameters. This ensures that water released into the Kriva Reka River complies with environmental standards and that no contamination from flotation reagents is occurring.

The factors of safety calculated from numerical models further support the assessment that both embankments maintain a high degree of stability under static conditions.

This is especially important given the method of dam construction, which relies on cycloned tailings sand — a material whose geotechnical properties can vary over time. The effectiveness of the drainage system, including geotextiles, geomembranes, and granular filters, plays a key role in maintaining slope stability and preventing excess pore pressures that could lead to failure.

The integrated monitoring system at *Toranica* has proven to be a valuable tool in ensuring safe dam operation. Regular and systematic tracking of water levels, piezometric data, flow measurements, and geodetic surveys has allowed for early detection of changes and ensured that the dam’s behaviour remains well understood.

Geophysical investigations are planned to be performed as a part of the monitoring program. As Tomova and Kisyov (2023) stated, implementing reliable monitoring systems is crucial for the early detection of potential stability issues. To determine the level of drainage and spatial distribution of water content, electrical resistivity tomography (ERT) is very useful to be performed. This geophysical technique can be deployed without disturbing the surface or subsurface infrastructure and can help identify zones of increased moisture content or water saturation (Tomova & Kisyov, 2024). The results would support the continued vertical expansion of the tailings dam in accordance with the master design plan. The dam's design enables phased elevation, while maintaining safety through consistent material quality, drainage management, and monitoring.

This approach reflects broader trends in sustainable mine waste management, where facilities are not only engineered for capacity and performance but also for adaptive monitoring, environmental compliance, and community safety. As emphasised by Yankova (2021), as global demand for mineral resources continues to rise, it becomes increasingly important for mining and mineral processing companies to adopt sustainable waste management practices. This includes not only minimising the environmental impact during operations, but also planning for effective reclamation of disturbed lands and ensuring long-term stewardship of rehabilitated ecosystems. The findings from 2022 reinforce the importance of maintaining strong data records, updating numerical models, and enhancing technical systems as the dam evolves.

Conclusions

This study assessed the structural stability and operational performance of the *Toranica* tailings dam using comprehensive monitoring data and geotechnical modeling from 2022. The results confirm that the dam system is operating within its design parameters and remains structurally and hydraulically stable. Both the upstream and downstream embankments showed no signs of deformation or instability, with pore pressures effectively controlled and seepage behavior consistent with safe operating conditions. The engineered drainage systems performed well, and no anomalies were detected in water levels, seepage discharge, or visual inspections.

The tailings pond water levels remained below critical thresholds, ensuring adequate freeboard and hydrological safety throughout the year. The technical monitoring program – comprising piezometric networks, geodetic benchmarks, flow measurements, and visual inspections – continues to provide valuable insights into the dam performance. Water discharged into the environment met applicable regulatory standards, confirming effective sedimentation and treatment systems. Numerical modelling validated these findings and demonstrated satisfactory factors of safety, supporting the continued operation and phased elevation of the dam in line with long-term planning.

To ensure continued safe operation and alignment with sustainability objectives, several recommendations are proposed. Routine monitoring should continue with enhanced

resolution and frequency, particularly during periods of dam raising or extreme weather. Geodetic surveying and piezometric control should be supported by geophysical methods, such as electrical resistivity tomography (ERT), which can help detect zones of increased water saturation, internal erosion, or structural heterogeneity within the dam body or foundation – especially in inaccessible or non-instrumented areas. Periodic ERT surveys can provide valuable complementary data to conventional instrumentation, improving the ability to detect early warning signs of seepage anomalies or instability.

Finally, sustainable mine waste management principles must remain central to all operational strategies. This includes protecting environmental quality, maintaining community safety, and ensuring long-term stewardship of tailings facilities through proactive monitoring, responsible engineering, and the integration of innovative technologies, such as ERT.

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.

References

Aleksandrova, E., Dimitrov, L., Kaykov, D. (2021). Operational sequence for constructing and combined mine waste facility. XVI International Conference of the Open and Underwater Mining of Minerals, 6 – 10 September 2021, Resort “St. St. Constantine and Elena”, Astor Garden Hotel, Varna, Bulgaria, pp. 7-13, ISSN 2535- 0854.

Aleksandrova, E., Koprev. I. (2020). Complex solutions for the construction of integrated facilities in stoped-out open-pit mining facilities. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"* – Sofia: 63/2020, pp. 9-12.

Alexandrova, E. (2018). Development of a 3D model for the assessment of the stability of the slopes in the *Mizia* quarry. *Journal of Mining and Geological Sciences*. Part 2, Mining, technology and mineral processing, Sofia: Univ. of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", pp.5-9, ISSN 2535-1184.

Grigorova, I. & Nishkov, I.̵ (2014). Tailings pond elimination technology, International Mineral Engineering Congress, September 21-24, 2014, San Luis Potosi, Mexico, Vol. 008, pp. 1-12

Petrov, M., Yankova, T., Grigorova, I. (2024). Obogatyavane na olovno-tsinkovi rudi v republika Bulgariya I Republika Severna Makedoniya, *sp. Geologiya I mineralni resursi*, *br. 2-3*/2024, str. 3-9, ISSN: 1310-2265.

Tayebi-Khorami M., Edraki, M., Corder, G., & Golev, A. (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, *9*(286), 1-12.

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for the monitoring of integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26*, 341-347.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2023). Geophysical techniques for the determination of areas with increased water saturation in an integrated mine waste storage facility. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26,* 13-18.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2024). Geophysical Monitoring for Stability Assessment of an Integrated Mine Waste Storage Facility. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics (EPSTEM)*, *29*, 22-27. https://doi.org/10.55549/epstem.1550210

Yankova, T. (2020). Mineral processing waste utilization. *XX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*, *20,* 219-226. Albena, Bulgaria.

Yankova, T. (2021). Mining damaged landscape reclamation study. *XXI International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021*, *2*(1.1), 383-390. Albena, Bulgaria.

THE *DELIK KAYA* (PIERCED ROCK) GEOTOPE NEAR THE VILLAGE OF STOMANTSI, KARDZHALI DISTRICT

Boris Valchev

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

ABSTRACT. On the territory of the Eastern Rhodopes, in the land of the village of Stomantsi, Kardzhali region, in the southern slope of the Ustra Ridge, the southeastern branch of the Zhalti Dyal (Yellow Lobe) Ridge, a small ensemble of erosion and karst forms, is formed including, a rock pyramid (Delik Kaya, or the Pierced Rock), a rock cliff, and a cave. The geotope is formed in the reef limestones of the Oligocene (Rupelian) limestone formation and is a small strip 250 m long, 60 m wide and spreading W-E. The site has not been described as a geological phenomenon and is not included in the Ministry of Environment and Water's list of natural sites and protected areas. This paper aims to briefly present the geological structure of the area, as well as to make a geoconservation characterisation of the geotope. According to the classification of geological phenomena, it belongs to the group of sites of aesthetic value (geomorphological class), and according to the original Bulgarian methodology for the assessment of geological phenomena, it is referred to the sites of local importance.

Key words: the *Delik Kaya* geotope, geoconservation, Eastern Rhodopes.

ГЕОТОП „ДЕЛИК КАЯ“ („ПРОДУПЧЕНАТА СКАЛА“) ПРИ С. СТОМАНЦИ, КЪРДЖАЛИЙСКА ОБЛАСТ

Борис Вълчев

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

РЕЗЮМЕ. На територията на Източните Родопи, в землището на с. Стоманци, Кърджалийско, в южния склон на Устренски рид, югоизточно разклонение на Жълти дял, е оформен малък ансамбъл от ерозионни и карстови форми, включващи скална пирамида („Делик кая“ или „Продупчената скала“), скален венец и пещера. Геотопът е оформен в рифовите варовици на олигоценската (рупелска) варовикова задруга и представлява неголяма ивица с дължина 250 m, ширина 60 m и посока на разпространение З-И. Обектът не е описван като геоложки феномен и не фигурира в списъка на природните забележителности и защитените местности на Министерството на околната среда и водите. Настоящата статия има за цел да представи накратко геоложкия строеж на района, както и да направи геоконсервационна характеристика на геотопа. Съгласно класификацията на геоложките феномени, той попада в групата на обектите с естетическа стойност (клас геоморфоложки), а според оригиналната българска методика за оценка на геоложки феномени, се отнася към обектите с локално значение.

Ключови думи: геотоп „Делик кая“ (“Продупчената скала“), геоконсервация, Източни Родопи.

Въведение

Територията на Източните Родопи предоставя отлични условия за образуването и експонирането на геоложки феномени (геотопи) с висока естетическа, научна, образователна и изследователска стойност. В „Регистър и кадастър на геоложките феномени в Република България“ (Jelev, Sinnyovsky, 2003[1]), първата финансирана от държавата инициатива за документиране и популяризиране на българското геоложко наследство, са включени с научни досиета емблематични за района геотопи като „Вкаменената сватба“ (с. Зимзелен), „Гъбата“, „Глухите камъни“ (с. Вълче поле), „Калето“ (с. Устрен), „Кован кая“ (с. Долно Черковище), „Лъвът“ и „Крокодила“ (с. Бенковски), както и някои по-слабо известни обекти. Преобладаващо, споменатите геотопи представляват обекти, възникнали в резултат от действието на екзогенните процеси и се отнасят към феномените с естетическа стойност. Наред с тях, тази територия разкрива още множество обекти, които по една или друга причина остават неизвестни както за геоложката общественост в България, така и за любителите на геотуризма, екотуризма, селския и винения туризъм.

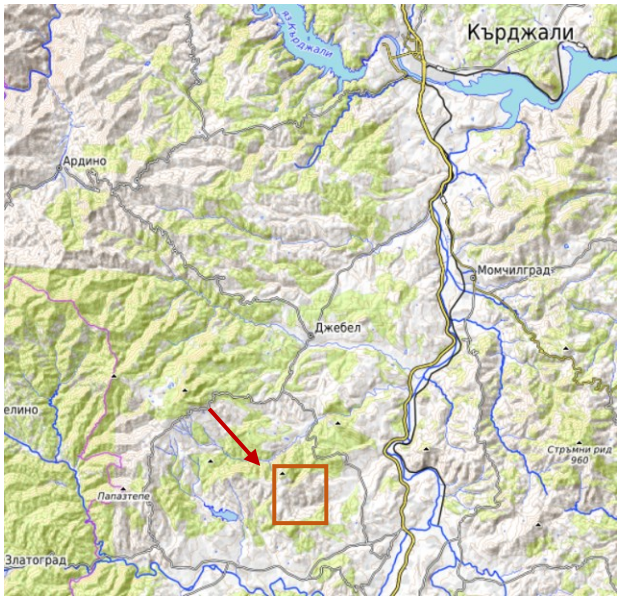
В землището на с. Стоманци, Кърджалийско, в южния склон на Устренски рид, югоизточно разклонение на Жълти дял, е оформен малък ансамбъл от ерозионни и карстови форми, включващ, скална пирамида (Делик кая или Продупчената скала), скален венец и пещера (фиг. 1, 2). Обектът не е описван като геоложки феномен и не фигурира в списъка на природните забележителности и защитените местности на Министерството на околната среда и водите.

Настоящата статия има за цел да представи накратко геоложкия строеж на района и геоконсервационната характеристика на геотопа.



Фиг. 1. Тектонска подялба на територията на България (по Dabovski and Zagorchev, 2009) с местоположението на изследвания район

[1] Jelev. V., Sinnyovsky, D. (Eds). 2003f. *Register and Cadastre of the Geological Phenomena of Republic of Bulgaria. 188 files in 5 volumes*. – Ministry of Energy of the Republic of Bulgaria, National Geological Fund, report XV-1232 (In Bulgarian, English, and Russian).



Фиг. 2. Топографска карта на част от Източните Родопи с местоположението на изследвания район
(https://kade.si/#otm=11/2812430.58/5084185.9/0)

Данни за геоложкия строеж на района

Стратиграфия

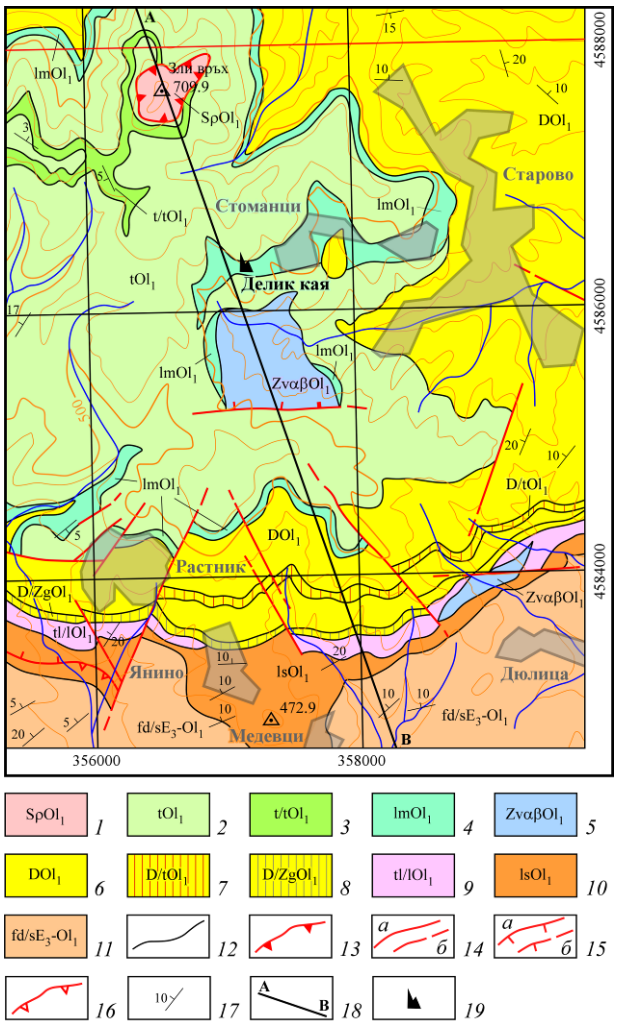
Районът на геотопа е изграден от приабон–рупелската флишоидна задруга, както и от рупелски седиментни, вулканогенно-седиментни и вулканогенни единици (фиг. 3, 4).

Приабон–рупелският интервал включва *флишоидната задруга* (Yordanov et al., 2008), която е представена от *пачката на дебелослоестите пясъчници*. Тя съответства на горните нива на ритмичната пясъчниково-мергелна задруга (Kozhoukharov et al., 1995). Пачката е изградена от бели, сиви до кафяво-жълти полимиктови дебелопластови дребно- до среднозърнести пясъчници с отделни прослойки от варовити пясъчници, мергели и алевролити. Разполага се с постепенен литоложки преход над по-ниските нива на флишоидната задруга и се покрива също с литоложки преход от теригенно-варовиковата задруга. Дебелината ù надхвърля 300 m. Разкрива се в най-южните части на изследвания район при селата Янино и Дюлица.

Рупелският етаж включва седем вулканогенно-седиментни и вулканогенни единици.

Теригенно-варовикова задруга (Yordanov et al., 2008). Отговаря на пачката на киселите и среднокиселите туфи, туфити, туфозни пясъчници и туфозни рифови варовици от задругата на втория кисел вулканизъм (Kozhoukharov et al., 1989). Изградена е от сиво-бели до сиво-жълти плътни биостромни рифови варовици, прослояващи се от жълтеникави средно- до дебелопластови варовити пясъчници. Разполага се с постепенен литоложки преход над пачката на дебелослоестите пясъчници на флишоидната задруга, а се покрива с размивна граница от варовиковата или туфозната задруга. Дебелината варира от 50 до 150 m. Разкрива се като тясна ивица с посока запад-изток в южната част на изследвания район.

Пирокластично-варовикова задруга (Yordanov et al., 2008). На геоложката карта на България в М 1:100 000 (Kozhoukharov et al., 1995) скалите са отнесени към задругата на първия кисел или втория среднокисел вулканизъм. В рамките на изследвания район зардугата е представена от *варовиковата пачка* (Yordanov et al., 2008). Тя е изградена от рифови до туфозни и глинести варовици, редуващи се с кисели туфи. В района на геотопа са представени единствено последните. Те са бели, фино- и грубопепелни до варовити. Дебелината им не надхвърля 30 m. Разкриват се като под формата на две тесни ивици с посока запад-изток в южната част на изследвания район.



Фиг. 3. Геоложка карта в М 1:50 000 (по Sarov et al., 2008b, с изменения) с местоположението на изследвания геотоп
Рупел (1–10): *1* – Стомански вулкан (риолити и пирокластити), *2–3* – туфозна задруга (*2* – кисели туфи и ксенотуфи, *3* – туфити), *4* – варовикова задруга (рифови варовици), *5* – Звезделски вулкански комплекс (андезитобазалти и андезити), *6–8* – Джебелска свита (*6* – пясъчници, *7* – кисели туфи, *8* – Загорски член: конгломерати), *9* – пирокластично-варовикова задруга (варовикова пачка: варовици и кисели туфи), *10* – теригенно-варовикова задруга (рифови варовици и варовити пясъчници), Приабон–Рупел (11): *11* – флишоидна задруга (пачка на дебелослоестите пясъчници: пясъчници с прослойки от мергели и алевролити), *12* – литостратиграфска граница, *13* – граница на екструзивна куполна структура, *14* – разлом с неустановен характер (*а* – установен, *б* – предполагаем), 15 – разсед (*а* – установен, *б* – предполагаем), *16* – възсед, *17* – слоестост, *18* – линия на геоложки разрез, *19* – местоположение на геотоп



Фиг. 4. Геоложки разрез на района на геотоп „Делик кая“ (по Sarov et al., 2008b, с изменения)
Условните знаци са като на фигура 3

Джебелска свита (Yordanov et al., 2008). Изградена е от охрено-жълти, разнозърнести полимиктови и кварц-фелдшпатови средно- до дебелопластови пясъчници с хоризонтална или коса слоестост. В подчинено количество, като отделни прослойки или лещи, присъстват гравийни и дребночакълни конгломерати, глинести и органогенни варовици, алевролити, мергели, както и отделни пачки от кисели туфи и туфити. Свитата се разполага трансгресивно върху разнообразна подложка от палеогенски седиментни и вулканогенно-седиментни единици и се покрива съгласно от скалите на Звезделския комплекс. Дебелината ù в лектостратотиповия разрез северозападно от с. Янино е 89 m. Разкрива се на широки площи в източната и южната част на изследвания район.

В основата на свитата, между селата Янино и Дюлица, под формата на тясна ивица с посока запад-изток, се разкриват масивни валунно-блокови конгломерати до брекчоконгломерати с песъчлив и неравномерно разпределен матрикс, обединени в *Загорски член* (Sarov et al., 2008a). Дебелината му е 15 m. Късовете са от слюдени гранити, пегматити и кварц.

Звезделски вулкански комплекс (Yordanov et al., 2008). Отговаря, в редуциран обем, на Звезделския андезитобазалтов комплекс, въведен от Georgiev & Milovanov (2003). В рамките на изследвания район се разкриват две субвулкански тела от периферията на Звезделския вулкан с базичен до среднокисел състав, внедрени сред скалите на пирокластично-варовиковата и туфозната задруга. Изградени са главно от андезитобазалти и андезити.

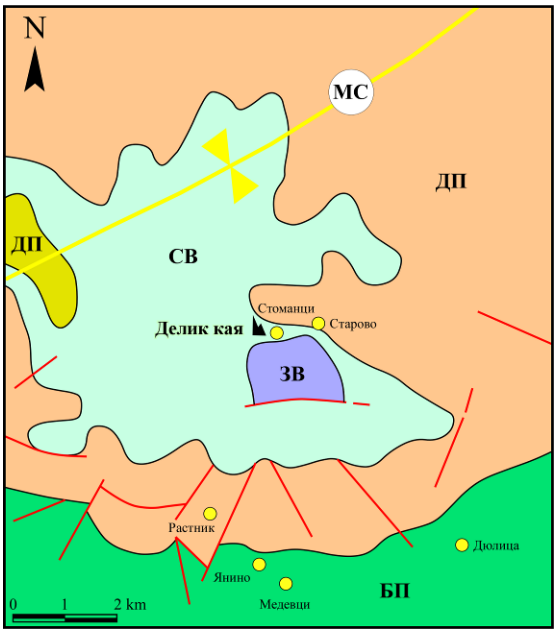
Варовикова задруга (Yordanov et al., 2008). Съответства на пачката на органогенните (рифови) варовици от задругата на третия кисел вулканизъм (Kozhoukharov et al., 1995). Изградена е от сиви до кремави неяснослоести плътни органогенни варовици, съдържащи многобройни останки от корали, бивалвии и гастроподи. Покрива с рязък литоложки контакт Джебелската свита. Покрива се съгласно от скалите на туфозната задруга. Дебелината на единицата достига 50 m. Разкрива се на широки площи в централната и северозападната част на изследвания район. Разкрива се под формата на тясна ивица в района на с. Стоманци.

Туфозна задруга (Yordanov et al., 2008). Изградена е главно от кисели туфи и ксенотуфи, като в горните нива се наблюдава пачка от среднокисели туфи, туфити и епикластити. Разполага се съгласно върху Джебелската свита и варовиковата задруга. Процепена е от субвулканско тяло на Звезделския комплекс и риолитите на Стоманския вулкан. Разкрива се на широки площи в централната и северозападната част на изследвания район (около Зли връх и с. Стоманци).

Стомански вулкан (Yordanov et al., 2008). Отнася се към Устренския вулкански подкомплекс. Известен е и като Стомански риолитов комплекс (Georgiev, 2012). Единицата включва риолити и пирокластити, които се разкриват в района на Зли връх, северозападно от с. Стоманци. Процепва скалите на Джебелската свита, варовиковата и туфозната задруга.

Тектоника

Изследваният район попада в югоизточните предели на Моравско-Родопската зона (фиг. 1). Землището на с. Стоманци е разположено върху скали, изграждащи Източнородопското комплексно понижение, от което в района попадат фрагменти от Джебелското понижение, Стомански и Звезделския вулкан, както и Бенковското понижение (фиг. 5). Геотоп „Делик кая“ („Продупчената скала“) е оформен в обхвата на Стомански вулкан, процепващ югоизточното бедро на Момчилградската синклинала.



Фиг. 5. Тектонска схема на изследвания район (по Sarov et al., 2008b) с местоположението на геотоп „Делик кая“
ДП – Джебелско понижение, СВ – Стомански вулкан, ЗВ – Звезделски вулкан, БП – Бенковско понижение, МС – Момчилградска синклинала

Геоконсервационна характеристика на геотоп „Делик кая“ („Продупчената скала“)

Геотопът е оформен в рифовите варовици на олигоценската (рупелска) варовикова задруга и представлява неголяма ивица с дължина 250 m, ширина 60 m и посока на разпространение З-И, разкриваща се непосредствено на северозапад от махала Златовръх на с. Стоманци (фиг. 3, 4, 6). Представлява малък ансамбъл от ерозионни и карстови форми, включващи скална пирамида („Делик кая“ или „Продупчената скала“), скален венец и пещера. Оформянето на геотопа е литоложки и тектонски предопределено. Наблюдават се три системи ясно изразени пукнатини – две със субвертикално положение и с посока З–И и С–Ю, и една със

субхоризонтално положение. Те са предопределили протичането на карстовите процеси.

Скалният венец (табл. I, фиг. *а–е*) заема цялата дължина на ивицата. Височината му варира между 3 и 5 m, като в централната и източната си част (табл. I, фиг. *д*, е) той представлява относително гладка субвертикална стена. В основата на западната част на венеца се наблюдава отворът на неголяма пещера (табл. II, фиг. *а*). Той е с овална форма и височина 2 m, като оформянето му е предопределено от окарстяването по субвертикална пукнатина с посока С–Ю. В непосредствена близост е оформена и плитка ниша с височина 3 m (табл. II, фиг. б).

Скалната пирамида „Делик кая“ (табл. II, фиг. *в–ж*) е най-атрактивната част от геотопа. Оформена е в най-западната част на скалния венец, като нейните отвесни стени представляват повърхностите на пукнатини от двете субвертикални системи, а наблюдателната около пирамидата скална площадка е естествено оформена върху повърхността на субхоризонтална пукнатина (табл. II, фиг. *д*). Гледана от запад (табл. II, фиг. *ж*), пирамидата наподобява лице на филмов герой, поради което е наричана неофициално „Извънземното“.

Достъпът до „Делик кая“ е лесен – преминава се по асфалтов път, водещ от центъра на с. Стоманци към махала Златовръх. В непосредствена близост до скалния венец е оформен малък паркинг, от който по макадамова пътека след около 200 m се достига до него. В подножието на скалния венец е изградена каменна пътека (табл. I, фиг. *г*), непосредствено над него също има пътека, позволяваща цялостното му обхождане.



Фиг. 6. Сателитна снимка на землището на с. Стоманци с местоположението на геотоп „Делик кая“ (Google Earth Pro)

Съгласно класификацията на геоложките феномени, геотоп „Делик кая“ („Продупчената скала“) при с. Стоманци попада в групата на обектите с естетическа стойност (клас геоморфоложки), а според оригиналната българска методика за оценка на геоложки феномени (Sinnyovsky et al., 2002), той се отнася към обектите с локално значение.

Заключение

Като геоложки образувания, ерозионните форми, развити в карбонатни комплекси привличат интереса на посетителите. Комбинацията от скален венец, пещера и каменна пирамида, наподобяваща лице на филмов герой, придава допълнителна привлекателност на скалния ансамбъл.

Геотоп „Делик кая“ е лесно достъпен и за неговото популяризиране е достатъчно поставянето на няколко табла с геоложка информация, като по този начин, наред с идентичностното си значение като култов обект той би придобил и образователна стойност. Предвид отдалечеността на с. Стоманци от индустриални обекти, антропогенното въздействие върху геотопа е сведено до минимум.

Литература

Dabovski, H., Zagorchev, I. (2009). Alpine tectonic subdivision of Bulgaria. – In: Zagorchev, I., H. Dabovski, T. Nikolov (Eds). *Geology of Bulgaria. Part II, Mesozoic Geology*. “Prof. Marin Drinov” Sofia, Publishing House, 30–37 (in Bulgarian with English abstract).

Georgiev, V. (2012). Metalogeny of the Eastern Rhodopes. Sofia, Prof. Marin Drinov Academic Publisjing House, 261 p. (In Bulgarian, with English summary).

Georgiev, V., Milovanov, P. (2003). Magmatic complexes in the Momchilgrad Depresiion (Eastern Rhodopes). – *Ann. Univ. Mining and Geol*., *46*, 1, 37–42.

https://kade.si/#otm=11/2812430.58/5084185.9/0.

Kozhoukharov, D., Boyanov, I., Goranov, A., Yanev, Y., Shilyafova, Zh., Ruseva, M. (1989). *Geological Map of Bulgaria on Scale 1:100 000, Kardzhali Map Sheet*. Sofia, Committee of Geology, Enterprise for Geophysical Prospecting and Geological Mapping.

Kozhoukharov, D., Boyanov, I., Goranov, A., Kozhoukharova, E., Shilyafova, Zh., Ruseva, M. (1995). *Explanatory Notes to the Geological Map of Bulgaria on Scale 1:100 000, Kardzhali Map Sheet*. Sofia, Committee of Geology and Mineral Resources, Geology and Geophysics Ltd., 87 p. (In Bulgarian with English abstract).

Sarov, S., Yordanov, B., Georgiev, S., Valkov, V., Balkanska, E., Grozdev, V., Markov, N., Marinova, R. (2008a). *Explanatory Notes to the Geological Map of the Republic of Bulgaria at a Scale 1:50 000. K-35-87-V (Zlatograd) and K-35-99-A (Drangovo) Map Sheet*. Sofia, Sofia, Ministry of Environment and Water, Bulgarian National Geological Survey, Uniscorp Ltd., 136 p.

Sarov, S., Yordanov, B., Valkov, V., Georgiev, S., Kalinova, I., Kamburov, D., Raeva, E., Voynova, E., Ovcharova, M., Kuncheva, B., Grozdev, V., Balkanska, E., Moskovska, L., Dobrev, G. (2008b). *Geological Map of the Republic of Bulgaria at a Scale 1:50 000. K-35-87-G (Dzhebel) and K-35-99-B (Kirkovo) Map Sheet*. Sofia, Sofia, Ministry of Environment and Water, Bulgarian National Geological Survey, Apis 50 Ltd.

Sinnyovsky, D., Jelev, V., Antonov, M., Juranov, S., Iliev, Z., Vangelov, D., Ajdanlijski, G., Petrov, P., Vasilev, H. (2002). A method for estimation of the geological phenomena. – *II Intern. Conf. SGEM, Varna*, 25–33.

Yordanov, B., Sarov, S., Georgiev, S., Valkov, V., Balkanska, E., Grozdev, V., Marinova, R., Markov, N. (2008). *Explanatory Notes to the Geological Map of the Republic of Bulgaria at a Scale 1:50 000. K-35-87-G (Dzhebel) and K-35-99-B (Kirkovo) Map Sheets*. Sofia, Ministry of Environment and Water, Bulgarian National Geological Survey, Uniscorp Ltd., 132 p.

ТАБЛИЦА I



а – общ изглед на геотоп „Делик кая“, поглед от югозапад; ***б*** – поглед към скалния венец и част от махала Златовръх на с. Стоманци, поглед от запад; ***в*** – общ изглед на запазната част на геотопа, поглед от изток; ***г*** – скалният венец, изградената пътека (на преден план) и каменната пирамида „Делик кая“ („Продупчената скала“ – на заден план), поглед от югоизток; ***д*** – централната част на скалния венец, поглед от югоизток; ***е*** – източната част на скалния венец – поглед от юг

ТАБЛИЦА II



а – отвор на неголяма пещера, формиран в основата на скалния венец, който е предопределен от субвертикална пукнатина с посока север–юг; ***б*** – скална ниша с височина 3 m, предопределена тектонски от субвертикална пукнатина с посока север–юг; ***в–ж*** – скална пирамида „Делик кая“ („Продупчената скала“): ***в*** – поглед от югоизток, като в основата на пирамидата ясно се вижда скалната площадка, оформена върху субхоризонтална пукнатина, ***г*** – поглед от североизток, в основата на пирамидата се наблюдават отчетливо двете субвертикални пукнатини ***д*** – поглед от север, наблюдателната площадка около пирамидата е естествено оформена върху повърхността на субхоризонтална пукнатина, ***е*** – поглед от югозапад, в средата се наблюдава ясно изразена отворена субвертикална пукнатина с посока север–юг, ***ж*** – поглед от запад, на преден план се наблюдава субвертикална пукнатина с посока изток–запад

HYDROCHEMICAL CHARACTERISATION OF GROUNDWATER IN THE BEBRESH RIVER BASIN

Emanuela Malinkova

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

ABSTRACT. Groundwater represents a key natural resource, crucial for providing drinking water and water for domestic needs, as well as for various industrial applications. The catchment area of the Bebresh River is one of the important aquifer zones in northern Bulgaria. Two main types of groundwater are observed in the area, which differ in their chemical composition: $HCO_3 < Ca^{2+} + Mg^{2+} < HCO_3 + SO_4^{2-}$ (Type II water) and $HCO_3 + SO_4^{2-} < Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (Type III water). Type II water is more widely distributed and is primarily found in river valleys, predominantly occurring in Neogene and Quaternary sediments. It is characterised by low mineralisation and pH values below 7. Type III water, with high mineralisation, is found in smaller areas, mainly in the northern part of the basin. The total mineralisation of groundwater in the area ranges from 200 to 500 mg/l, classifying the water as weakly mineralised. The groundwater in this area is fresh, and its chemical composition is characterised by a predominance of calcium and magnesium hydrogencarbonates.

Key words: catchment area, the Bebresh River, groundwater, chemical composition, GIS.

ХИДРОХИМИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ ОТ БАСЕЙНА НА Р. БЕБРЕШ

Емануела Малинкова

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

РЕЗЮМЕ. Подземните води представляват ключов природен ресурс, който има решаващо значение за осигуряване на питейни и битови нужди, както и за различни индустриални приложения. Водосборът на р. Бебреш е една от важните водоносни зони на територията на Северна България. В района се наблюдават два основни типа подземни води, които се отличават с различен химичен състав: $HCO_3 < Ca^{2+} + Mg^{2+} < HCO_3 + SO_4^{2-}$ (води от втори тип) и $HCO_3 + SO_4^{2-} < Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (води от трети тип). Водите от втори тип имат по-широко разпространение и се намират основно в долините на реките, като преобладаващо се срещат в неогенските и кватернерните седименти. Те се характеризират с ниска минерализация и pH, което е под 7. Водите от трети тип, с висока минерализация, се наблюдават в по-малки зони, главно в северната част на котловината. Общата минерализация на подземните води в района варира от 200 до 500 mg/l, което ги класифицира като слабо минерализирани води. Подземните води в този район са пресни, а химическият им състав се характеризира с преобладаване на калциеви и магнезиеви хидрогенкарбонати.

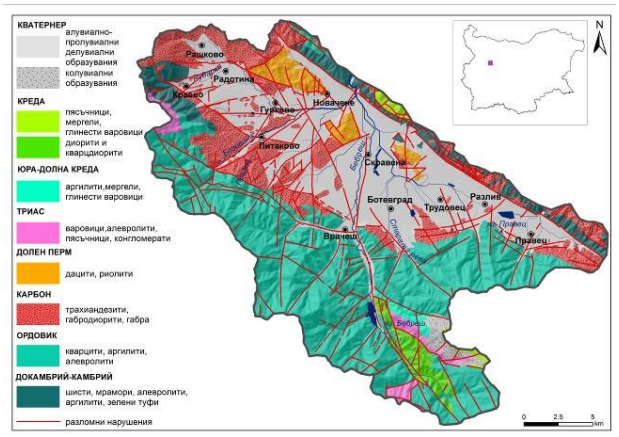
Ключови думи: водосборен басейн, р. Бебреш, подземни води, химичен състав, ГИС.

Въведение

Определянето на физико-химичните свойства и състава на подземните води е тясно свързано с техния произход. Многообразните фактори за формирането на състава им като: климат, релеф, хидрогеоложки условия, геоложки фактори и строеж и други, са от първостепенно значение за състава и динамиката на подземните води. В статията пространствено е представен и анализиран химичният състав на водосборния басейн на подземните води на р. Бебреш. На базата на обобщените данни на отделни химични компоненти от картите на Т. Кехайов (1982), е направен пространствен анализ на получените резултати. Допълнителните материали, използвани за представяне на данните, са химични анализи на подземните води в района, взети от извори, кладенци и сондажи. На базата на получените резултати са изработени в ГИС среда представителни карти за разпространение на отделните химични показатели в района на водосбора на р. Бебреш.

Обща характеристика на района

За определянето химичния състав на подземните води е разгледан водосборът на р. Бебреш, който според площта си може да се причисли към средните водосбори съгласно Директива (2000/60/ЕО). Поречието на р. Бебреш се намира в Северна България (Фиг. 1). Площта на водосборния басейн на реката е 492 km^2. Река Бебреш извира от Етрополската планина в Западна Стара планина.



Фиг. 1. Геоложка карта на района

В морфографско отношение районът обхваща части от две основни единици – Старопланинската верига и Предбалкана (Ж. Гълъбов 1966г.), като между тях е разположена и Ботевградската котловина. Според хидрогеоложкото райониране местоположението на разглеждания обект попада в Област Стара планина (Антонов, Дачев, 1980). Характеризира се с мезозойски и терциерни седименти, палеозойски гранити и шисти, като най-водоносни са среднотриаските и малмските варовици. Релефът на водосбора е основно котловинен до нископланински, на места интензивно разчленен. Средната надморска височина на водосборната област е между 300 и 400 m. Климатът на Ботеврадската котловина се отнася към

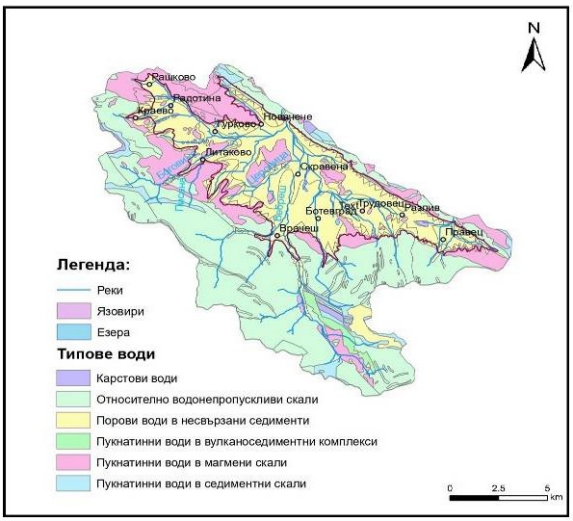
умерено континенталната област. Средната годишна температура е около 12,6°C. Средното количество на валежите варира между 750 и 1000 mm. Почвената покривка в района е представена от алувиално и делувиално-ливадни и светлосиви горски почви (Почвена карта на България М 1:000000, Е. Танов, 1956г.). Според класификацията на почвите по ФАО (Нинов, 2002, 2005), водосборът на река Бебреш попада в Старопланинската средновисока и Старопланинската висока почвени поровинции. Растителността е представена от широколистни и листопадни гори, типични за умерено континенталната зона.

Геоложка и хидрогеоложка характеристика на котловината

Ботевградската котловина е изградена изцяло от ядките на Берковската, Свогенската и Етрополската антиклинали, и части от Издремецката и Етрополската синклинали. Най-широко площно развитие тук има Старопалеозойският нискометамоефен комплекс (ДФФ), който изгражда ядките на антиклиналите. Скалите на комплекса се представят от четири задруги и са най-старите по възраст Камбрий-Ордовик. Хидрогеоложката структурата на котловината се предопределя от Ботевградско грабеновидно понижение (Филипов, Чешитев, 1992), свързано с големия Драгойбалкански разлом, запълнен с кватернерни алувиални и пролувиални пясъци, чакъли, глини и лежащите под тях неогенски теригенни скали (Фиг. 1).

Според последната хидрогеоложка карта на подземните води на България в М 1:500 000 (Пенчев и др., 2004) във водосборния басейн на Ботевградската котловина се поделят следните ходрогеоложки формации: Главен водонос (B) геоложка формация със средна пропускливост и Водонос с незначителни водни ресурси (D) литоложка формация с твърде ниска пропускливост.

Геоложките условия в Ботевградската котловина определят формирането на порови, карстови и пукнатинни води (Фиг. 2.) За тяхното разпространение са използвани геоложките разновидности, представени на картни листове в М 1:50 000 (Картен лист К-34-48-Б (Ботевград) В. Ангелов, М. Антонов и др., 2010 г.).

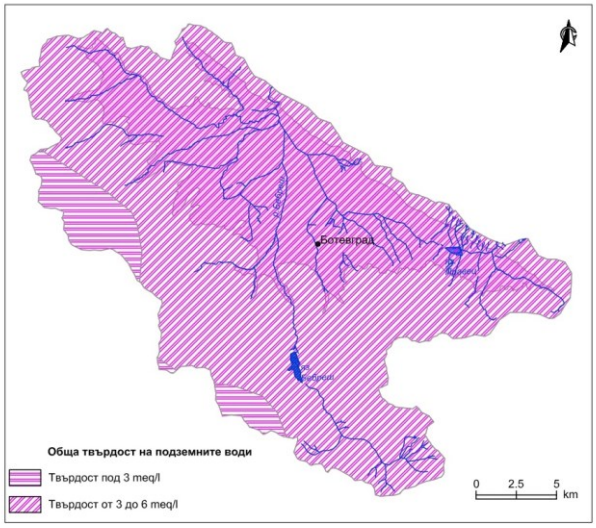


Фиг. 2. Карта за разпространение на типовете води

Поровите води, формирани в кватернерния водоносен хоризонт, са привързани към алувиално-пролувиалните отложения, изпълващи котловината и имат най-голямо значение за осигуряването на водни запаси в региона (Антонов, Данчев, 1980). В триаските и горнокредните скали се разпространяват карстови подземни води но, поради ограниченото им подхранване и площ на разкриване, условията за тяхното образуване не са благоприятни и не се разглеждат като самостоятелна единица. Широко разпространение в котловината имат пукнатинните води, привързани към юрските и кредни варовици и са формирани в напуканите зони и разломни нарушения. (Фиг. 1).

Хидрохимична характеристика на подземните води

Анализът на химичния състав на подземните води от зоната на активния водообмен е извършен на базата на карти за състава на подземните води на България в М1:1 000 000 (Кехайов, 1982г.). Картите са прехвърлени и визуализирани в ГИС, георефериран са и са поставени границите на водосборната област на Ботевградската котловина. Информацията от картите дава пространственото разпространение на някои от главните компоненти като: обща минерализация, обща твърдост (Фиг. 3), хидроген карбонати, сулфати и други.



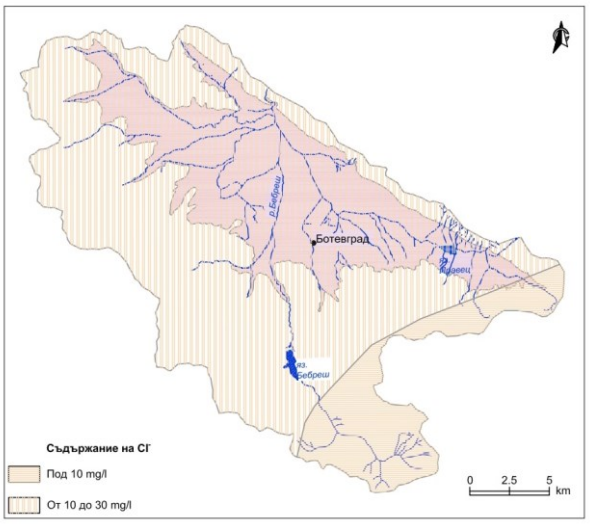
Фиг. 3. Карта по обща твърдост на подземните води

Подземните води в изследваната област са пресни. Общата минерализация, показана на картата на подземните води в котловината, е 200 до 500 mg/l, което ги квалифицира като слабо минерализирани (Alekin, 1953). По хидрохимичната класификация на О. А. Алекин подземните води във водосбора на котловината са представени от два типа: HCO_3^-<Ca^{2+}+Mg^{2+}< HCO^-_3+SO_4^{2-} (води от втори тип) и HCO^-_3+SO_4^{2-}<Ca^{2+}+Mg^2 (води от трети тип). По-голямо разпространение имат водите от втория тип, които са акумулирани в порови води около долините на реките в неогенските и кватернерните наслаги. Тези води са предимно с ниска минерализация и pH < 7. Третият тип води се разпространяват в по-малки граници само в северните части на котловината, около с. Рашково и североизточно от с. Новачене. По генезис тези типове води са смесени,

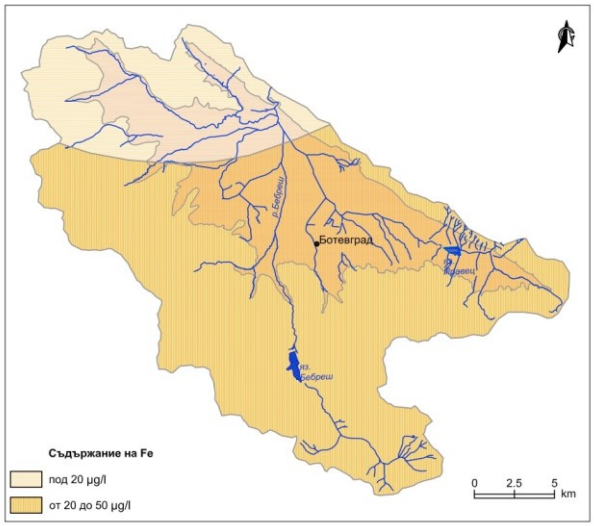
метаморфозирани с висока минерализация. По класификацията на Алекин за обща твърдост, подземните води от водосбора на котловината се квалифицират като умерено твърди от 3 до 6 mq/l (Фиг. 3).

Качествена оценка на подземните води

Количествените стойности на отделните химични компоненти са сравнени със стандарта по Приложение 1 към чл. 10, ал. 2, т. 1 на Наредба № 1/10.10.2007 за проучване, ползване и опазване на подземните води. Пространственото разпределение на компонентите е векторизирано спрямо картите на Кехайов (1982).

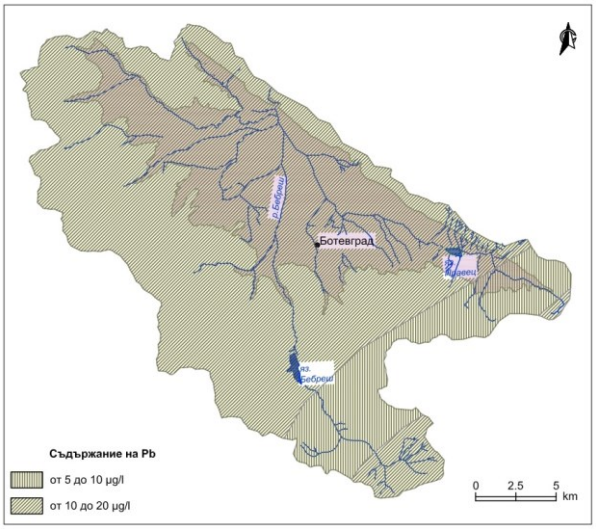


Фиг. 4. Карта по съдържание на Cl^-



Фиг. 5. Карта по съдържание на Fe

След направен подробен анализ и разглеждане на получените пространствени данни, може да бъде направено заключение, че концентрациите по основните физико-химични показатели (нитрати, обща твърдост, сулфити, хлориди), металоиди и метали (никел, мед, алуминий, хром, манган, желязо, цинк арсен, магнезий, натрий, калций) на подземните води във водосбора на р. Бебреш не надвишават пределно допустимите концентрации по Наредба № 1/10.10.2007. Изключение правят концентрациите на олово в изследваната област, която е над 10 mg/l. (Фиг. 6).



Фиг. 6. Карта по съдържание на Pb

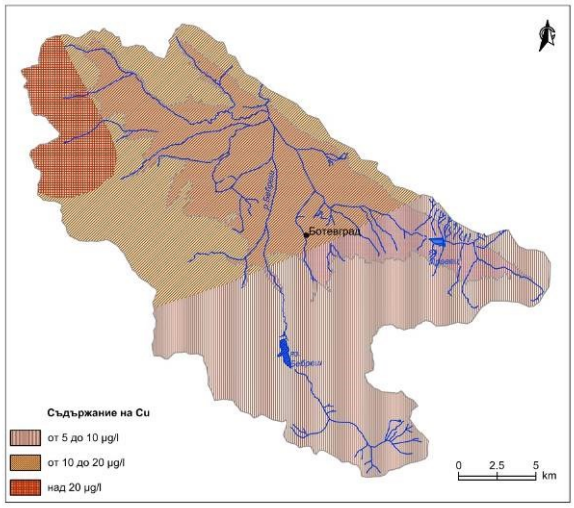
По Наредба № 1 и визуализацията на пространствените данни, хлоридите са с концентрации под пределно допустимите норми. В югоизточната част на котловината, концентрациите им са под 10 mg/l, а в останалата част - от 10 до 30 mg/l, което показва липса на антропогенно замърсяване. Нитратите са показателни за наличие на старо замърсяване. След преминаването им веднъж в зоната на аерация и в наситената зона, много трудно се елиминират от течната фаза. Сулфатите са широко разпространени в подземните води, поради пътищата на миграцията на сяра, която е в състава на много от минералите. Концентрацията на сулфатите във водосбора е от 10 до 50 mg/l, което е доста под пределно допустимите концентрации от 250 mg/l. Съдържанието на натрий е до 10 mg/l, което е доста под допустимите концентрации по Наредба 1. Концентрацията на желязо не надвишава пределно допустимите стойности от 200 mg/l. В северната част на котловината около селата Рашково и Радотина концентрацията е под 20 mg/l.

В цялата южна част на водосбора концентрациите са между 20 и 50 mg/l. По отношение на пределно допустимите концентрации за хром които са 50 mg/l по Наредба 1, разпространението в цялата разглеждана област е под 0,01 mg/l. Концентрацията на никела във водосборната област на р. Бебреш е над 10 mg/l, пределно допустимата концентрация по Наредба 1 е 20 mg/l, вероятно попадането му в подземните води идва от честото използване в миналото за изграждане на водопроводната мрежа. По отношение на съдържанието на олово (Фиг. 6).

ПДК по Наредба 1 е 10 µg/l. Разпространението му във югоизточната част на водосборната област е на границата на допустимите концентрации. В останалата по-голяма част от водосбора, концентрациите на олово надвишават пределно допустимите, като стойностите са между 10 и 20 µg/l. Вероятната причина за превишаването на концентрациите са наличието на антропогенни източници в района, но, по така направените анализи, не може да се даде точна оценка.

Елементът мед (Фиг. 7) попада в изследваната област под различни стойности от 5 до 20 µg/l, като в

северозападната част стойността му е над 0,02 mg/l, което е под пределно допустимите стойности по Наредба 1 от 2 mg/l. По така представените резултати, не може да се даде точна



Фиг. 7. Карта по съдържание на Cu

оценка каква е стойността на концентрацията на мед в района. Съдържанието на алуминий, манган и цинк е под пределно допустимите концентрации по Наредба 1.

Заключение

Подземните води от водосборния басейн на р. Бебреш се характеризират с хидрогенкарбонатен и калциев химичен състав, като преобладават водите от втори тип. Те са слабо минерализирани, подходящи за питейни и битови нужди. Въпреки че в някои части на района се наблюдава повишена концентрация на олово, като цяло качеството на водата не надвишава пределно допустимите стойности за повечето химични компоненти. Изследването показва, че подземните води в този регион са чисти и подходящи за различни приложения, като се препоръчва продължаване на мониторинга и подобряване на управлението на водните ресурси в района.

Литература

Alekin, O. A. (1953). Basics of hydrochemistry. Hydrometeorological Publishing House, Leningrad, 296 p. (in Russian).

Antonov, H., D. Danchev. (1980). Groundwater in the Republic of Bulgaria. Sofia, 152 p. (in Bulgarian)

Galabov, M., N. Stoyanov. (2005). Groundwater dynamics. Publishing house „V. Nedkov”, Sofia, 202 p. (in Bulgarian).

Йовчев, Й., М. Алтовски (Ред.). (1967). Хидрогеоложка карта на НР България М 1:200 000. Картен лист София. С., Комитет по геология.

Йовчев, Й., М. Алтовски (Ред.). (1975). Обяснителен текст към Хидрогеоложката карта на Народна РепубликаБългария в мащаб 1:200 000. С., Национален Геофонд.

Malinkova, E., A. Toteva, P. Gerginov, (2023). Hydrogeological conditions in the Botevgrad Kettle. Engineering Geology and Hydrogeology, vol 37, ISSN:0204-7934, https://doi.org/10.52321/igh.37.1.101, 101-115 pp.

Филипов, Л., Г.Чешитев (ред). (1992). Геоложка карта на България картен лист Ботевград, М 1:100000, ВТС - Троян

НАРЕДБА № 1 от 10.10.2007 г. за проучване, ползване и опазване на подземните води

GEOPHYSICAL MONITORING FOR SUSTAINABLE MINING: CASE STUDIES USING ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Bogdana Milenkovich

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

ABSTRACT. The application of geophysical methods at all stages of mining operations and facility management significantly enhances the understanding of the dynamics of geotechnical and hydrogeological processes. The use of electrical resistivity tomography (ERT) as part of an integrated system for sustainable mine planning supports the achievement of higher standards of safety and sustainability. The development of standardised protocols for geophysical monitoring, as well as the implementation of automated and long-term observation systems, would contribute to the timely diagnosis of potential risks and improved security of mining sites. The systematic application of this method, in combination with drilling data and engineering and geological information, provides a reliable basis for informed decision-making in favour of environmental protection, facility safety, and public trust.

Key words: mines, monitoring, geophysics, electrical resistivity tomography (ERT).

ГЕОФИЗИЧЕН МОНИТОРИНГ ЗА УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИННАТА ДЕЙНОСТ: ПРИМЕРИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЕЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ

Богдана Миленкович

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

РЕЗЮМЕ. Прилагането на геофизични методи във всички етапи от експлоатацията и управлението на минните обекти и съоръжения значително подобрява разбирането за динамиката на геотехническите и хидрогеоложки процеси. Използването на електротомография (ERT) като част от интегрираната система за устойчиво планиране в мините подпомага постигането на по-високи стандарти за безопасност и устойчивост. Разработването на стандартизирани протоколи за геофизичен мониторинг, както и въвеждането на автоматизирани и дългосрочни системи за наблюдение, биха допринесли за навременна диагностика на потенциални рискове и повишена сигурност на минните обекти. Систематичното приложение на този метод в комбинация със сондажи и инженерно-геоложки данни осигурява надеждна основа за вземане на информирани решения в полза на околната среда, безопасността на съоръженията и общественото доверие.

Ключови думи: минни обекти, мониторинг, геофизика, електротомография.

Introduction

The sustainable management of mining operations has become an increasingly important concern in the context of environmental responsibility, public safety, and long-term economic efficiency. As mining activities inevitably alter the geological and hydrological regimes of the subsurface environment, a comprehensive understanding of geotechnical and hydrogeological processes is essential throughout the entire lifecycle of a mining project — from exploration and extraction to waste management and site closure (Hristov and Aleksandrova, 2000). As Yankova (2021) mentions, some of the largest damages and environment contamination is caused by mining. In this context, geophysical methods have emerged as invaluable tools for non-invasive and cost-effective subsurface investigation.

According to many authors, among these methods, electrical resistivity tomography (ERT) has gained widespread attention due to its high sensitivity to variations in lithology, porosity, saturation, and fluid conductivity. The application of ERT in mining environments enables the detection and spatial characterisation of critical subsurface features, such as saturated zones, structural discontinuities, and material compaction. Its integration into monitoring programs supports proactive risk management and enhances the ability to detect early signs of instability or environmental hazards (Dimovski et al., 2020; Tomova, 2023; Tomova & Kisyov, 2023).

The adoption of ERT as part of a broader, integrated system for sustainable mine planning contributes to the realisation of higher safety and environmental standards. When applied systematically during key operational stages — such as tailings dam construction, drainage evaluation, post-closure stability assessment or detection of geological hazards, such as voids, cavities, and abandoned workings within the mine — ERT provides continuous insights into the evolving conditions of the subsurface (Tomova, 2024). This approach allows for the implementation of real-time decision-making process and helps identify potential geotechnical risks before they develop into failures.

Furthermore, the development of standardised geophysical monitoring protocols, combined with the implementation of automated, long-term observation networks, offers a forward-looking solution for mining companies seeking to align with international best practices in environmental and social governance. Furthermore, geophysical surveys for identifying hard inclusions in the open-pit horizons of the East Maritsa Basin can be cited as good mining practices (Zlatanov and Aleksandrova, 2008). When coupled with drilling data and engineering-geological models, geophysical methods provide a reliable, multidimensional framework for decision-making, supporting not only operational safety but also building public trust and ensuring regulatory compliance.

Methodology

This paper presents the application and interpretation of ERT data in a mining context, with a focus on its use for monitoring the hydrodynamic behaviour of tailings storage facilities and understanding the subsurface conditions and optimising mining operations. The study illustrates how geophysical techniques, particularly ERT, can be effectively

integrated into routine mine monitoring workflows to improve the overall resilience and sustainability of mining infrastructure.

As Bharti (Bharti et al., 2023) stated, ERT is a versatile tool for the mapping of subsurface features like voids, cavities, underground galleries/tunnels (air-or water-filled), and so on, where high contrast in resistivity is leveraged to delineate the features very easily.

Many authors have stated that the purpose of electrical surveys is to determine the subsurface resistivity distribution by making measurements on the ground surface. The ERT method is appropriate for two-dimensional mapping of the near-surface area in vertical sections along the surveyed lines (Loke, 1999; Dimovski & Stoyanov, 2020). Aleksandrova (2008) points out that when combined with hydrogeological data, ERT can provide essential information for the design and stability assessment of waste storage facilities.

Electrical resistivity tomography (ERT) is a non-invasive geophysical technique that images the subsurface by measuring the spatial distribution of electrical resistivity. The method is based on injecting a known electrical current into the ground using a pair of electrodes and recording the resulting voltage difference at other electrode pairs. These measurements are used to compute the apparent resistivity of the subsurface, which is then inverted to generate a 2D or 3D model representing the true resistivity distribution.

ERT is particularly effective in environments where contrasts in resistivity correspond to variations in lithology, porosity, fracture density, or moisture content. Because water-saturated zones typically exhibit lower resistivity compared to dry or compacted materials, ERT is widely used for detecting groundwater, monitoring seepage, and delineating weak or fractured zones — all of which are critical in both underground mine tunnels and tailings storage facilities.

The method’s sensitivity to changes in subsurface conditions makes it especially suitable for dynamic monitoring applications. In mining contexts, ERT enables early detection of geotechnical instabilities, fracture zones, and zones of anomalous saturation, which may pose risks to infrastructure integrity. The technique is also effective in evaluating the performance of drainage systems and identifying potential pathways for contaminant migration.

Field data are acquired using electrode arrays (e.g., Wenner, Dipole–Dipole, or Schlumberger), with the choice of configuration depending on the required resolution and depth of investigation. Modern ERT systems typically include an automated switching unit that allows sequential activation of numerous electrodes (often 48 to 96 or more), significantly improving acquisition speed and data density. The apparent resistivity values collected in the field are processed using inversion software, such as RES2DINV (Loke, 2001), which iteratively adjusts a subsurface model to minimise the misfit between observed and calculated values (de Groot-Hedlin and Constable, 1990; Loke and Barker, 1996).

The final output consists of resistivity cross-sections that can be interpreted in terms of geological structure, fluid saturation, and mechanical properties. When combined with geological, hydrogeological, and geotechnical data, ERT provides a reliable foundation for risk assessment and decision-making in complex mining environments.

However, 2-D electrical surveys are now practical commercial techniques with the relatively recent development of multi-electrode resistivity surveying instruments (Griffiths et al., 1990) and fast computer inversion software (Loke, 1994).

Case study: Stability assessment in underground mining conditions

In the present study, stability assessment was carried out for a part of an underground mine tunnel. As Tomova and Kisyov (2024a) pointed out, a lot of case studies worldwide demonstrate the efficacy of geophysical methods in detecting underground uncertainties. The detection and characterisation of subsurface uncertainties, such as fractures, faults, cavities, zones of high porosity, or variable saturation, remain central challenges in geotechnical engineering, hydrogeology, and mining operations. Geophysical methods, especially non-invasive techniques, such as electrical resistivity tomography (ERT), offer cost-effective, spatially continuous, and high-resolution imaging capabilities that complement direct investigation methods like drilling and sampling (Reynolds, 2011).

Among these techniques, ERT has proven particularly effective for mapping electrical resistivity variations related to lithological heterogeneities, water content, fault zones, and voids. The method is especially valuable in environments where direct access is limited or where continuous monitoring is required to assess temporal variations, such as in tunnels, mine waste storage facilities, and unstable slopes.

Resistivity surveys give a picture of the subsurface resistivity distribution. To convert the resistivity picture into a geological picture, some knowledge of typical resistivity values for different types of subsurface materials and the geology of the area surveyed is important.

ERT effectively images structural features, such as faults, fractures, and cavities, even when they are not visually observable, enabling early detection of geotechnical hazards in mining settings.

To demonstrate the ability of ERT to face this challenge, a line measured on the ceiling of a mine gallery is shown (Figure 1).



Fig. 1. Part of a mine gallery, where an ERT line is recorded

The measured ERT line is shown in Figure 2.

The interpretation of the zones marking the spatial distribution of an environment with reduced electrical resistivity values - in the range from 0.1 to about 1 Ωm - probably marks the presence of mylonitised, clayey areas, very likely hydrated, also part of the active fault system.

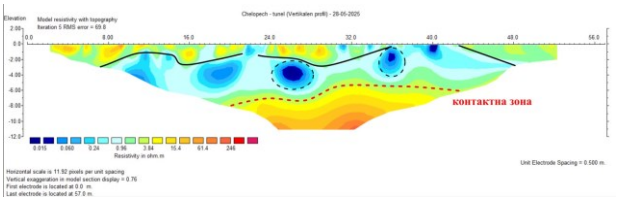


Fig. 2. The ERT line measured on the ceiling of a mine gallery

The contact marking the two environments can trace the boundaries of the spatial distribution of each of the zones thus separated, even though the contact difference in their electrical resistance is not noticeably sharp.

Fracture zones, which typically manifest as localised zones of low resistivity due to increased porosity and water content, can be accurately delineated through dense electrode arrays and high-resolution inversion models.

When used alongside borehole data, ERT provides reliable and spatially continuous subsurface information, enhancing the detection and characterisation of underground weaknesses before failure occurs.

The interpretation made confirms the activity and complex nature of the fault system, which is important in planning future mining activities and assessing geotechnical risk.

The identified heterogeneities in the rock massif, especially the areas with reduced electrical resistivity values, should be subject to additional control and monitoring, given their possible connection with waterlogged areas.

The geophysical surveys conducted demonstrate the significant potential of geophysical methods, and in particular electrical tomography, as an effective tool for geotechnical assessment. Although these methods are traditionally associated with the search and exploration of mineral resources, their application in engineering-geological and geotechnical tasks is becoming increasingly significant, especially in the context of assessing the quality of the rock mass, determining geological structures, and hydrogeological conditions in the design and development of mines.

In conclusion, the applied methodology shows high efficiency in clarifying the geological situation and can be successfully used as part of the preliminary studies for mining design purposes.

Case study: Stability assessment in an Integrated Mine Waste Storage Facility

In an extensive review, Tomova and Kisyov (2024b) report that Integrated Mine Waste Storage Facilities (IMWF) often consist of various components, such as tailings dams, waste rock dumps, and water management structures. Monitoring techniques like geophysical methods can provide valuable information on factors, such as slope movements, deformation behavior, and physical properties of the materials in the facility. This knowledge is essential for conducting risk assessments, helps in identifying potential hazards, and in evaluating the associated risks. Implementing reliable monitoring systems is crucial for early detection of potential stability issues.

The concept of the Integrated Mine Waste Storage Facility (IMWSF) involves the accumulation of a thickened tailings layer within cells constructed from waste rock and soil. The competent waste rock provides the structural strength necessary for the overall stability of the facility and also functions as a drainage medium for fluids within the cells.

The construction of such an integrated facility directly links mining operations with tailings deposition, as the formation and stability of the cells require the availability of competent waste rock (Eldridge et al., 2011).

The Integrated Mine Waste Storage Facility (IMWSF) is designed to function as a fully self-draining structure. A drainage system has been constructed at the base of each cell within the facility, which channels water into one of two reservoirs located at the end of the facility. To minimise the formation of ponded water, the facility is engineered with a "honeycomb" structure, which reduces the length of drainage paths (both horizontally and vertically) and optimises the system’s capacity to discharge water (Diaz, 2014).

Tailings consolidation plays a vital role in ensuring the overall stability of these facilities. Since tailings are typically composed of finely ground rock particles, water, and residual processing reagents, their unconsolidated state can pose serious geotechnical and environmental risks. The effective consolidation of tailings, often aided by chemical or mechanical treatment, contributes to increased material strength and reduced pore water pressures, thereby improving the integrity of the storage structure (Dimitrov & Grigorova, 2023).

For this purpose, geophysical surveys based on electrical resistivity tomography (ERT) are implemented in IMWFs. ERT’s sensitivity to changes in saturation, porosity, and mineral composition enables the detection of geotechnical anomalies that may not be readily apparent through traditional monitoring approaches (Hasan et al., 2021). This makes ERT a powerful tool for assessing consolidation processes and identifying zones where drainage or material behaviour may compromise structural stability.

The measurement is performed along a profile with a length of 760 meters. The measurements were conducted using a four-electrode Wenner-Schlumberger array configuration. Data acquisition was performed with the Australian-made *ZZ Universal 96-Channel Resistivity/IP Meter* (Figure 3). This equipment allows for the measurement of the specific electrical resistivity of the subsurface and can also be effectively used for registering both self-potential and induced polarisation signals.



Fig. 3. The *ZZ Universal 96-Channel Resistivity/IP Meter* on the terrain

The *ZZ Universal 96* system is equipped with the *FlashRES-UNIVERSAL 96* technology, which enables the simultaneous utilisation of all electrodes, thus collecting a higher volume of data along the profile. This capability allows for greater flexibility in electrode layout and significantly enhances the accuracy and reliability of the electrical resistivity tomography results. The *FlashRES-UNIVERSAL 96* system includes 93 channels and can simultaneously collect data from 93 points during each current injection cycle along the survey line.

The registered ERT line measured in the Integrated Mine Waste Storage Facility (IMWSF) is shown in Figure 4.

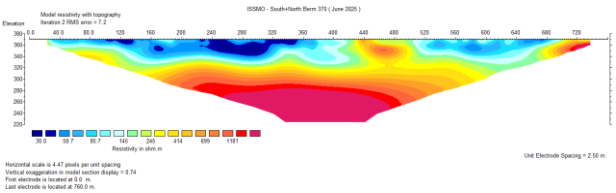


Fig. 4. ERT line measured in the Integrated Mine Waste Storage Facility

To perform a deeper measurement, a cable with a distance between the electrodes of 10 meters was used when recording the electrical resistivity profile along the line. In this way, the resulting image reaches a depth of 160 meters and confidently highlights the natural terrain and the size of the cells. The distribution of the deposited material, limited by the natural terrain, the road between the two valleys and the surface, is also clearly visible.

Zones exhibiting low electrical resistivity along the measured profiles are most likely indicative of water-saturated regions, attributed to incomplete drainage within the cell structure. The extent and geometry of these low-resistivity anomalies observed along the line are plausibly influenced by the overburden pressure exerted by the superimposed mine waste, as well as the varying degrees of material consolidation over time.

Furthermore, temporal variability in the spatial distribution and intensity of these low-resistivity zones may be associated with seasonal environmental factors such as precipitation, temperature fluctuations, and so on. These external conditions can affect moisture content and pore water distribution, thereby modulating the electrical properties of the subsurface materials.

Conclusions

The application of electrical resistivity tomography (ERT) in mining-related geotechnical investigations demonstrates significant potential for improving environmental safety and operational sustainability. In the first case study, the deployment of ERT within an underground mine tunnel effectively delineated low-resistivity zones, interpreted as potential fault or fracture zones. This geophysical insight supports risk reduction strategies for underground infrastructure and enhances geological understanding, particularly in areas inaccessible by direct observation.

In the second case study, ERT was implemented as part of an integrated geophysical monitoring program within an Integrated Mine Waste Storage Facility (IMWSF). The results revealed areas with anomalously low resistivity values, indicating zones of elevated saturation or incomplete consolidation. These findings correspond with seasonal and operational variables, such as precipitation, drainage efficiency, and deposition loading. The integration of ERT data with hydrogeological and geotechnical information allowed for a more comprehensive understanding of fluid migration, cell drainage behavior, and material consolidation within the facility.

The systematic use of ERT across various phases of mining operations – from underground exploration to surface waste management – enables non-invasive, real-time assessment of critical subsurface conditions. This approach strengthens early warning capabilities, supports informed decision-making, and aligns with best practices for sustainable and safe mining. Furthermore, the adoption of standardised protocols and automated monitoring systems, as highlighted in the reviewed literature, enhances the long-term reliability of such geophysical surveillance, reinforcing the role of ERT as a core component of modern mine monitoring systems.

The results of the electrical sections clearly show a differentiation of geological environments by electrical resistivity, which allows for a more confident separation of lithological varieties and zones of cracking, as well as delineation of contact surfaces between different rock types. The variations in electrical resistivity observed in the studied profiles provide a basis for distinguishing water-saturated zones, mylonitised and clayey areas from more compact and less fragmented rock complexes.

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.

References

Aleksandrova, E. (2008). Stability assessment of rock slopes with complex slip surfaces. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 51*, Part II, Extraction and Processing of Mineral Raw Materials, pp. 113-115, Publishing House “St. Ivan Rilski”, Sofia, 2008. ISSN 1312-1820. (in Bulgarian).

Bharti, A. K., Singh, S. K., Pal, S. K., Singh, K. K. K., Prakash, A., Bhattacharjee,R. et al. (2023) Electrical resistivity tomographytechnique coupled with numerical modelling: a casestudy for stability analysis. *Geophysical Prospecting, 71*, 1368–1384.https://doi.org/10.1111/1365-2478.13382

de Groot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam’s inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics, 55*(12), 1613–1624.

Diaz, M. (2014). Evaluation of liner requirement. Krumovgrad integrated mine waste facility (A150-14-R2243). Retrieved from https://s27.q4cdn.com/486073686/files/doc, last accessed 2024/02/09.

Dimitrov, L., & Grigorova, I. (2023). Improved tailings consolidation using dewatering agents: A step towards safer and sustainable mining waste management. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 23*, 225-231.

Dimovski, S., Stoyanov, N. (2020). Application of electrical resistivity tomography for mapping zones affected by roof

caving during tunnel construction. International Scientific Conference GEOBALCANICA 2020, DOI: http://dx.doi.org/10.18509/GBP.2020.01

Dimovski, S., Stoyanov, N., Tzankov, Ch., Kisyov, A. (2020). Application of ERT method for localizing karst zones along the route of Balkan Stream gas pipeline, Bulgaria, *Review of the Bulgarian Geological Society, vol. 81*, part 3, 2020, pp. 259–261

Eldridge, T., Wickland, B., Goldstone, A., & Kissiova, M. (2011). Integrated mine waste storage concept, Krumovgrad gold project, Bulgaria. Tailings and Mine Waste. Vancouver, http://dx.doi.org/10.14288/1.0107692

Griffiths D. H., Turnbull J., & Olayinka A. I. (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. *First Break 8*, 121-129.

Hasan, M., Shang, Y., Meng, H., Shao, P., Yi, X. (2021). Application of electrical resistivity tomography (ERT) for rock mass quality evaluation. *Scientific Reports, Vol. 11*, p. 23683, https://doi.org/10.1038/s41598-021-03217-8.

Hristov, St., Aleksandrova, E. (2000). Timely reclamation of lands disturbed by the mines of the "Maritsa East" Mines – a necessary condition for their effectiveness. *Journal “Geology and Mineral Resources”, No.* 9/ 2000, pp. 20–23, Sofia, ISSN 1310-2265.

Loke, M. H., (1994). The inversion of two-dimensional resistivity data. Unpubl. PhD thesis, Univ. of Birmingham.

Loke, M. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Malaysia, pp. 67.

Loke, M. H. (2001). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. www.geotomosoft.com

Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting, 44*(1), 131–152.

Reynolds, J. M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Preview, 2011, 33-40. https://doi.org/10.1071/PVv2011n155other

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26*, 341-347.

Tomova, M. (2024). Geophysical Methods for Optimising the Design and Construction of Underground Mining, EAGE, 12th Congress of the Balkan Geophysical Society, May 2024, Volume 2024, pp.1–5, DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.202449BGS28

Tomova, M., & Kisyov, A. (2023). Geophysical techniques for determination of areas with increased water saturation in integrated mine waste storage facility. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26,* 13-18.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2024a). Applications and advantages of geophysical methods in underground mining. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 67*/2024, pp. 184-188.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2024b). Geophysical Monitoring for Stability Assessment of Integrated Mine Waste Storage Facility. The *Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics (EPSTEM), 29*, 22-27. https://doi.org/10.55549/epstem.1550210

Yankova, T. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, Vol. 21, Iss. 1.1, (2021). DOI:10.5593/sgem2021/1.1/s04.071

Zlatanov, P., Aleksandrova, E. (2008). Technological solutions for extraction and destruction of hard inclusions in the open-pit horizons of the East Maritsa coal basin. *Journal of Geology and Mineral Resources, no. 7-8*, 2008, pp. 2-6, ISSN 1310-2265.

THE INFLUENCE OF THE LITHOLOGICAL-TECTONIC FACTOR ON THE EROSION-DRAINAGE NETWORK IN THE CATCHMENT OF THE BYUYUKDERE RIVER (THE EASTERN RHODOPES)

Miloslava Stefanova, Valentina Nikolova, Ivan Dimitrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: m.sstefanova@mgu.bg, v.nikolova@mgu.bg, ivan.d.ivanov@mgu.bg

ABSTRACT. The interaction between the lithology, the strike and dip of geological layers, and the tectonic factor influences erosion processes and the development of river systems. Understanding these interactions is essential for territorial planning, implementing erosion control measures, and ensuring effective environmental management. In this consideration, the current study aims to determine the presence or absence of a relationship between lithological-tectonic features and the erosion-drainage network in the Byuyukdere River watershed. The studied watershed is located in the Northeastern Rhodopes Depression (southern Bulgaria) and is characterised by active erosion processes. The analysis was conducted in the ArcGIS Pro environment (ESRI Inc.), using a geological map at a scale of 1:50,000 and a digital elevation model with a resolution of 12.5 meters (ALOS PALSAR). The stream orientation was analysed, considering the lithological composition, bedding surfaces, and fault tectonics. The results show that in the scope of the studied watershed the erosion-drainage network is mainly controlled by lithological variations and less by tectonics.

Key words: water erosion, geology, gullies, river system.

ВЛИЯНИЕ НА ЛИТОЛОГО-ТЕКТОНСКИЯ ФАКТОР ВЪРХУ ЕРОЗИОННО ДРЕНАЖНАТА МРЕЖА ВЪВ ВОДОСБОРА НА РЕКА БЮЮКДЕРЕ (ИЗТОЧНИ РОДОПИ)

Милослава Стефанова, Валентина Николова, Иван Димитров

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

РЕЗЮМЕ. Взаимодействието между литологията, посоката и наклона на геоложките пластове и тектонския фактор оказва влияние върху ерозионните процеси и развитието на речните системи. Разбирането на тези взаимодействия е от съществено значение за териториалното планиране, прилагането на мерки за контрол на ерозията и ефективно управление на околната среда. Във връзка с това, целта на настоящото изследване е да се установи наличие или отсъствие на връзка между литолого-тектонски особености и ерозионно дренажната мрежа във водосбора на река Бююкдере. Изследваният водосбор е част от Североизточнородопското понижение и се характеризира с активна проява на ерозионни процеси. Анализът е направен в ArcGIS Pro среда (ESRI Inc.) на базата на геоложка карта в мащаб 1: 50 000 и цифров модел на релефа с резолюция 12.5 метра (ALOS PALSAR). Анализирана е ориентацията на ерозионно-дренажната мрежа предвид литоложкия състав, ориентировката на пластовете и разломната тектоника. Резултатите от анализа показват, че в изследвания водосбор ерозионно-дренажната мрежа се контролира главно от литоложкото разнообразие и по-малко от тектониката.

Ключови думи: водна ерозия, геология, ровини, речна система.

Introduction

The interaction between lithology and tectonic processes plays a critical role in shaping landscapes and controlling erosion rates. In tectonically stable regions, lithological variability — particularly differences in rock strength and weathering resistance — directly governs erosion rates and drainage development. Different types of lithology lead to varying erosion rates, which alter landscapes ~~over~~ in the course of time (Haag et al., 2025). Softer, less resistant lithology, such as unconsolidated sediments or weakly cemented rocks, is subject to rapid weathering and erosion, often resulting in densely developed and highly dissected drainage networks. In contrast, more resistant rocks, such as quartzites or volcanics, typically form flatted topographies with sparse drainage due to their greater resistance to weathering and lower erodibility. The absence of stabilising vegetation, combined with the presence of easily erodible materials, promotes the formation of extensive erosion-drainage networks. In tectonically active regions, the relationship between lithology and erosion is modified and often intensified by structural influences. As McCarthy et al. (2019) point out, in areas with recent tectonic activity, both the type of rock and tectonic features have a big impact on how fast the land erodes and changes — sometimes even more than the climate. Tectonic structures, such as folds and faults, impose directional constraints and introduce mechanical weaknesses that significantly influence drainage patterns. Studies have demonstrated that the rate of surface runoff and the density of the drainage network vary within fold structures, with higher river network density indicating more intense erosional activity. (Delcaillau et al., 2006; Ramsey et al., 2008). Fault systems, as long-term expressions of regional tectonic regimes, form structural boundaries that strongly influence the orientation, evolution, and incision depth of fluvial systems. Active fault zones commonly act as preferential erosion corridors due to enhanced rock fracturing and localised mechanical breakdown, facilitating focused surface water flow and the development of fault-aligned valleys (Schumm, 1986; Twidale, 2004). The alignment of high-order drainage segments along major faults often reflects this tectonic control, while lower-order tributaries may develop independently, responding more strongly to local lithology or slope conditions. Furthermore, the coupling of lithology and tectonics plays a central role in long-term landscape evolution. Tectonic uplift alters local base levels and slope gradients, triggering differential erosion that is strongly modulated by lithological heterogeneity. Yanites et al. (2017) emphasise that variations in erosion rates and landscapes are best understood through an integrated approach, where geological composition interacts with tectonic forcing to determine drainage structure, relief evolution, and landscape dynamics.

A synthesis of recent studies (Gabet, 2019; Bartley et al.,

2020; Beeson & McCoy, 2020; Seagren & Schoenbohm, 2021; Haag et al., 2025) demonstrates that lithological and tectonic factors are primary controls on drainage network development, erosion intensity, and fluvial morphology. On the other hand, the drainage network is one of the most dynamic components of the landscape, continuously responding to geological and geomorphological processes. In this context, watershed morphometric parameters, such as drainage density, bifurcation ratio, and stream order, serve as effective indicators of underlying structural and lithological influences. The interaction between lithology, tectonic activity, and the orientation of geological strata not only influences erosion patterns but also governs the evolution, adjustment, and hierarchical organisation of river systems. This relationship is especially prominent in small to medium-sized drainage basins (generally under 1000 km²), where local geological and climate conditions have a more direct influence on fluvial dynamics. Analysing the morphometric characteristics of drainage networks within the framework of regional litho-structural settings provides valuable insights into basin development trends. Such understanding is essential for quantifying erosion potential and for developing land management strategies aimed at mitigating hydro-geomorphological hazards.

Regarding the above, the aim of the current study is to assess how the lithological-tectonic features influence the development of the erosion-drainage network in the catchment of the Byuyukdere River. The results of the study can be used as indicators for the assessment of the erosion processes in the watershed scale.

Data and methods

The area of interest in this study is the Byuyukdere River watershed. It is located in the Eastern Rhodope Mountains in southern Bulgaria, and forms part of the larger hydrological basin of the Arda River (Fig. 1). The total surface area of the Byuyukdere watershed is approximately 27 km^2. The river itself originates in the vicinity of the village of Yavorovo, located in the northern section of the watershed, and flows predominantly southwards until it discharges into the Kardzhali Dam.

The watershed exhibits a diverse topography characterised by varying slope gradients, which play a critical role in shaping hydrological behaviour, surface runoff dynamics, erosion intensity, and the development of the drainage network. Areas with slopes of up to 3° are limited in extent, covering only about 2% of the total watershed area (Fig. 2). These relatively flat zones typically exhibit low surface runoff and minimal erosion activity. In contrast, moderate slopes ranging between 3° and 15° dominate the central part of the watershed. This slope interval takes around 44% of the Byuyukdere River catchment. This terrain represents a transitional zone from lowlands to more rugged uplands and is typified by increased erosional processes. These conditions foster the development of a dense fluvial network, including numerous small tributaries and intermittent streams that contribute to the overall hydrological complexity of the basin.

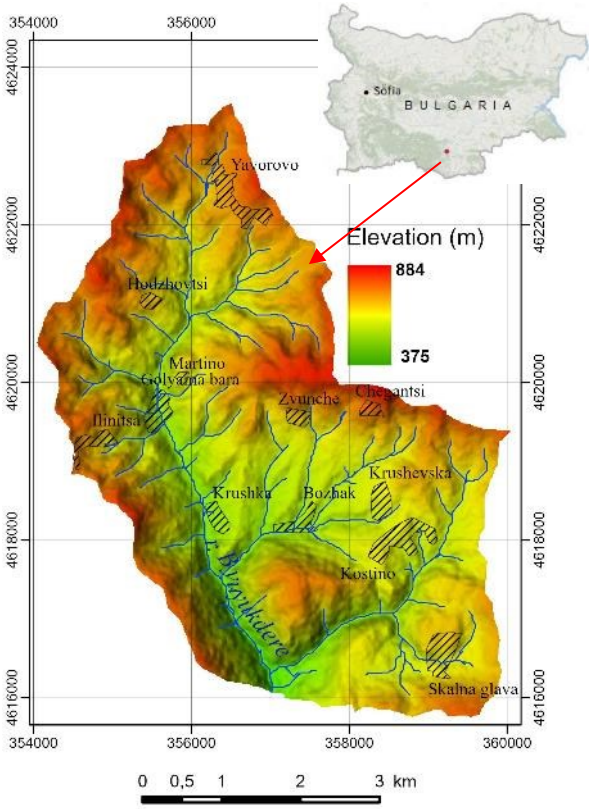


Fig. 1. Study area

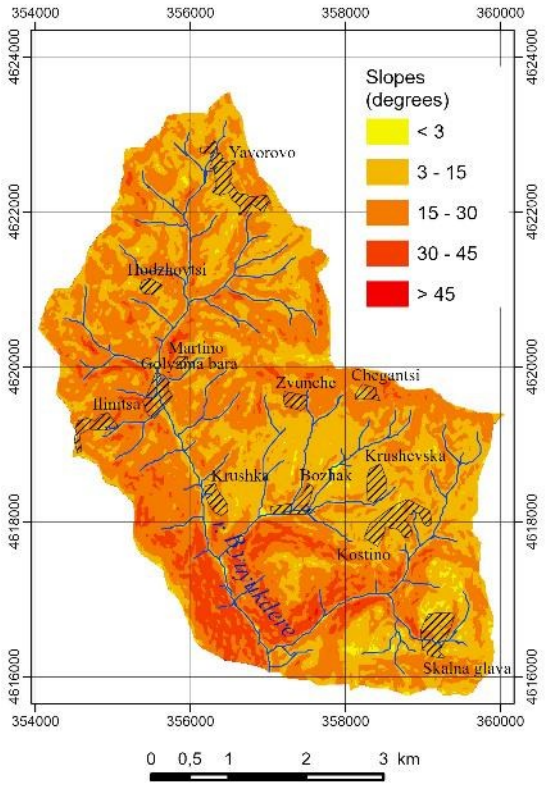


Fig. 2. Slope map

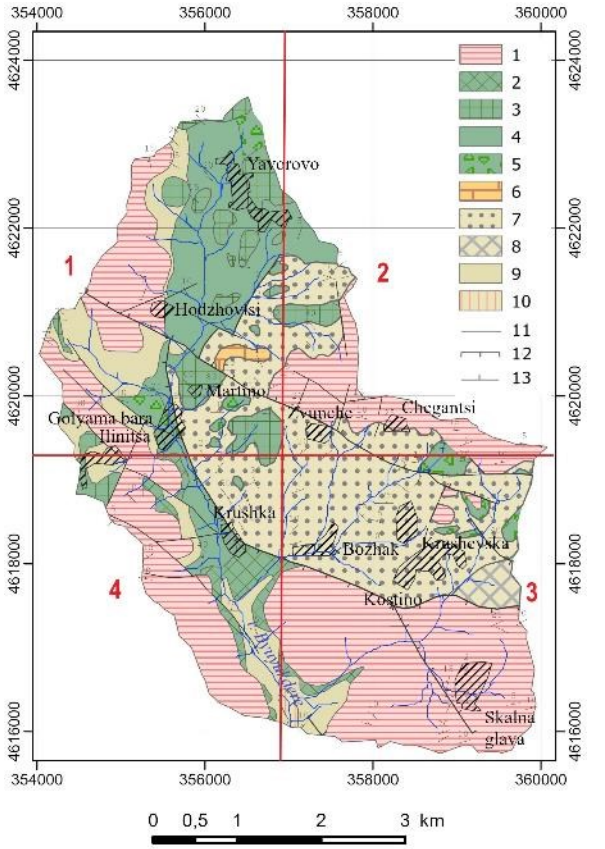
The majority of the watershed — approximately 47% — comprises areas with steeper inclines, ranging from 15° to 30°. These slopes are highly susceptible to intensive surface erosion, which significantly affects soil stability and sediment transport. The most pronounced topographic gradients,

exceeding 30°, are found in about 7% of the watershed. These steepest areas are concentrated primarily in the lower reaches of the river, close to its confluence with the Kardzhali Dam. Their steepness is largely a result of tectonic activity and faulting within the river valley, combined with ongoing erosion processes.

Additionally, steep slopes are also a distinguishing feature of certain headwater valleys formed by first- and second-order streams, particularly in the eastern and northern sectors of the watershed. These streams, classified according to the Strahler stream order system (Strahler, 1957), contribute to the complex geomorphological and hydrological structure of the basin.

Geologically, the area belongs to the Northeastern Rhodopes Depression. The lithological composition is predominantly represented by volcanogenic-sedimentary rocks, including tuffs, tuffites, and breccia-conglomerates. Additionally, andesites and latites are present, along with more limited areas containing limestones and marls (Fig. 3). The lithological composition of the watershed combined with the hydro-climatic conditions determine to a great extent the formation of Chromic Cambisol and Chromic Luvisol (FAO-UNESCO-ISRIC, 1990) which are moderate to highly susceptible to erosion. On the other hand, the outcrop of the different petrographic composition affects the selective erosion. All these features influence the pattern of the drainage network of the area.

The current study is based on a geological map at the scale of 1:50 000, map sheet K-35-75-G (Yordanov et al., 2008), a digital elevation model (DEM) with 12.5 m horizontal resolution, and field observations. Based on the DEM, the stream lines were generated within ArcGIS Pro, 3.4.0 (ESRI Inc., 2024) environment. Their order was determined using the Strahler method (Strahler, 1957). The pattern of the erosional-drainage network was analysed in consideration of the lithological and tectonic features of the studied watershed. For the purpose of the study, the Byuyukdere catchment was divided into 4 domains (Fig. 3). All identified permanent and temporary streams were considered in the analysis. Rose-diagrams of the direction of the streams in each one of the domains were created and compared to the fault tectonics and bedding.



1 - fine-ash and vitriclastic acidic tuffs, calcareous tuffites, and platy impure limestones; 2 – andesites; 3 – latites to andesites; 4 - coarse-ash intermediate-acid tuffs, tuffites, and epiclastics; 5 - latitic to andesitic lava breccias; 6 - organogenic limestones; 7 - sandstones with rarely developed breccia-conglomerate beds; 8 – flysch; 9 - alternation of marls, siltstones, sandstones, tuffs, and tuffites; 10 - polyclastic conglomerate-breccias; 11- fault; 12 – normal fault; 13 - Inclined bedding; In red colour: 1; 2; 3; 4 – number of the domains; red lines – domain's borders

Fig. 3. Geological map (after Yordanov et al., 2008 with amendments)

Analysis of structural and petrographic controls on erosion and drainage network orientation

In terms of geotectonics, the watershed of the river Byuyukdere is located in a regional tectonic fold known as the Mastatepe syncline. It comprises Oligocene pyroclastic and mixed sedimentary-pyroclastic rocks in the cores, and Eocene volcano-sedimentary units in the limbs. This syncline has been complicated by tectonic faults with two main orientations, N-NW and W-NW. The NE and E-W fault directions are present to a lesser extent. The major N-NW and W-NW faults have proven normal fault displacement, indicated by the age of the sediments they displace. They have less obvious strike-slip displacement, which is inferred by the lozenge shape of the basins they delineate. These basins have the geometry of pull-apart basins.

The upper Eocene horst structure to east of the Byuyukdere and to south of the hinge of the Mastatepe syncline (southern limb of the syncline) is particularly well defined. It is infilled with Priabonian conglomerates and sandstones with abundant evidence for syntectonic exotic blocks – olistostromes, indicating that the fault boundary was active during the Priabonian sediment deposition.

The N-NW bounding fault that delimits the Priabonian from the west, along which the river Byuyukdere flows, also exposes features of a synsedimentary tectonic activity. The Byuyukdere river follows this N-NW striking fault for about 2.5 km, as upper Eocene sediments are exposed from the east of the river valley, and lower Oligocene lava flows and subvolcanic rock of intermediate composition are exposed to the west of the river valley. Based on this observation, it can be concluded that the larger faults of above-mentioned directions were active at least during the Upper Eocene and controlled the subsidence and uplift of the tectonic blocks.

On the geological map of Bulgaria in scale 1:50 000 (Yordanov et al., 2008), it is observed that the fault structures usually follow the lithological contacts between the effusive and subvolcanic rocks from one side and the pyroclastic rock or sedimentary rocks from the other side. The pyroclastic rocks have some dubious properties concerning erosion susceptibly, which are expressed by the features listed below. The finer grained varieties usually have high percentage of volcanic glasses, which tend to alter after the deposition into clay minerals, thus clogging the water permeable paths. This greatly decreases the water permeability allowing this rock to act like an impermeable screen. On the other hand, the enrichment with

clay makes the rock soft, susceptible to mechanical erosion, and unable to support steep slopes. The nature of the volcanic activity in this region, however, has been dominated by predominantly acid and intermediate eruptions, which leads to the alternation of lava flows with high angle of repose and pyroclastics inverted to clayish rocks with low angle of repose. This is expressed by step-like natural slopes of the terrain, as usually the highest parts of the terrain are shielded by resistant rocks.

The variation in the erosional resistance of sedimentary rocks is also significant. Biohermal limestones typically form the upper parts of the terrain, while sandstones often occupy the lower areas. Alternations of sandstone and conglomerate show varying resistance to water erosion, depending on the degree of their lithification. In general, it can be assumed that Eocene sedimentary rocks tend to be more lithified than their Oligocene counterparts. However, original grain size and the chemical composition of the matrix also influence resistance. Coarser-grained rocks, such as conglomerates and breccias, are generally more resistant to erosion, and clastic rocks cemented with carbonate or chalcedony also exhibit high resistance.

The analysis of the rose-diagrams (Fig. 4) in relation to the geological structures and lithology in the respective zones (domains) shows the following:

Domain 1

The dominant stream orientation in this area is north–south (N–S), with a secondary east–west (E–W) trend (Fig. 4a). Several faults identified on the geological map trend northwest–southeast (NW–SE), and one fault is aligned approximately N–S. Bedding generally dips toward the southwest (SW). Given that the bedding dips SW while the primary stream orientation is N–S, it can be inferred that the drainage network is not structurally guided by bedding planes. This indicates that bedding is not the principal control on stream alignment. Although the main faults exhibit a NW–SE orientation, most streams do not follow these fault lines closely. This suggests that the development of the drainage network is largely independent of fault structures and is instead influenced by lithological factors that favour water erosion. Notably, some streams — particularly in the eastern and southwestern parts of Domain 1 — do exhibit alignment with mapped faults, implying localised structural control. In addition, vertical jointing or contrasts in lithology may also contribute to guiding stream paths in these areas. The most prominent example of tectonically controlled drainage is the channel occupied by the Byuyukdere River, which closely follows a structural lineament and reflects a stronger influence of faulting.

Domain 2

The dominant stream direction is clearly defined as E-W (Fig. 4b). Other directions appear almost symmetrically distributed around the centre of the diagram, suggesting lithological control, likely related to the sandy substrate. Bedding dips predominantly toward the southwest, although southeast and northward dips are also observed. Faults in domain 2 are sparse and mainly trend NW–SE or N–S; however, the E–W-oriented streams are not aligned with these faults. The area is primarily composed of sandstones, breccia-conglomerates, and tuffs. It can be assumed that stream orientation is more likely controlled by topographic slope or lithological variation, not by tectonic structures.

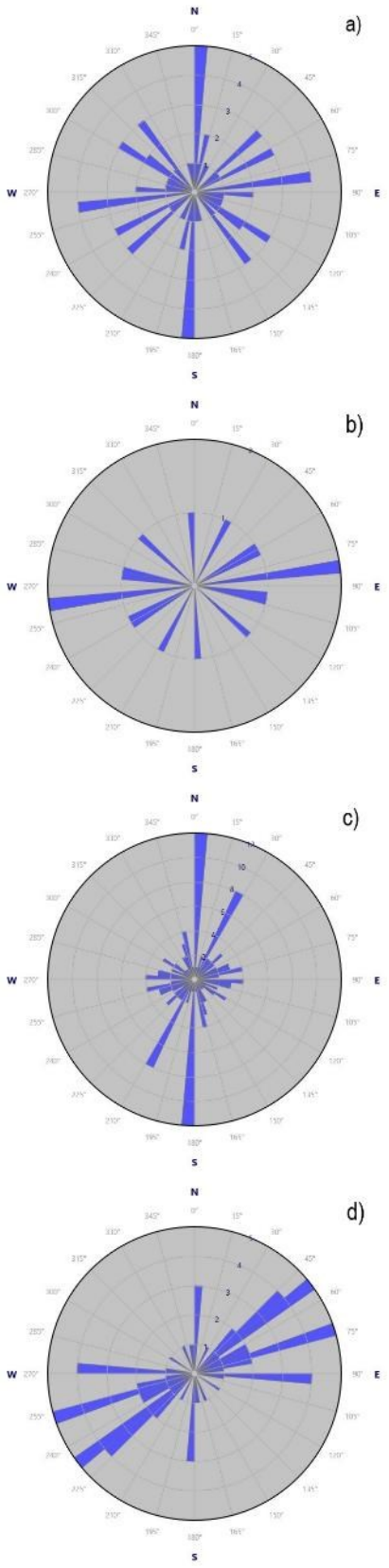


Fig. 4. Rose-diagram: a) Domain 1; b) Domain 2; c) Domain 3; d) Domain 5

Domain 3

Streams are clearly oriented along a N–S axis, with a secondary orientation trending NE–SW (Fig. 4c). The northern part of the domain is predominantly composed of sandstones

with some breccia-conglomerates, whereas the southern part is primarily built of tuffs. Faults are well developed, mainly trending NW–SE and nearly W–E. Bedding dips are variable, including NW, N, and some layers dipping NE. The main N–S drainage direction appears nearly orthogonal to the fault systems, suggesting that faults do not control stream orientation. The N–S erosional-drainage system through more complex lithology, is likely influenced by topography and difference in the erosion resistance of the rocks. It could be assumed that the NE-SW direction of the streams is controlled by small faults that are not visible at the mapping scale of the geological map used.

Domain 4

The dominant stream orientation is clearly NE–SW, with a secondary but less prominent trend along the N–S axis (Fig. 4d). Fault lines primarily trend NW–SE and do not align with the dominant stream direction. However, the main river — 4th and 5th order — flows from NNW to SSE, closely following the orientation of the same direction trending faults. These faults likely represent zones of structural weakness that have guided the river's course. It can be assumed that the younger valleys (1st and 2nd order streams) have developed independently of the fault systems, while the older, higher-order streams (4th and 5th order) are structurally controlled. The NE–SW stream alignment may be influenced by SW-dipping strata, local slope conditions, lithological variations, or by smaller faults conjugate to the NW–SE structures.

Conclusion

The analysis of the Byuyukdere watershed reveals a complex interaction between lithology, tectonic structures, and drainage development. While localised segments of the drainage system align with major faults, the overall stream orientations appear more strongly influenced by lithological contrasts and topographic gradients. The variability in erosional resistance among the volcanic and sedimentary rocks exerts a dominant control on drainage density and orientation.

Overall, the study shows that in moderately deformed terrains, drainage patterns are primarily controlled by lithology and slope, and less by tectonic structure. Integrating morphometric data with geological mapping improves understanding of basin evolution and supports erosion risk management in similar tectono-lithological settings. To sum up, the interplay between lithology and tectonics is essential for understanding the dynamics of erosion and the resultant drainage network development. Lithology provides the material context that influences erosion resistance, while tectonic activity controls the kinetics of landscape evolution. Together, these factors contribute to the complexity of geomorphological processes, underscoring the necessity for integrated analyses in future research.

Acknowledgements

Project: Debris Flows: Mechanisms of Formation, Dynamics, and Risk Management – A Case Study from the Byuyukdere River Catchment, Eastern Rhodopes, Contract No GPF-255 – 01.04.2025, University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”.

References

Bartley, R., Poesen, J., Wilkinson, S., & Vanmaercke, M. (2020). A review of the magnitude and response times for sediment yield reductions following the rehabilitation of gullied landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, *45*(13), 3250-3279. https://doi.org/10.1002/esp.4963

Beeson, H. & McCoy, S. (2020). Geomorphic signatures of the transient fluvial response to tilting. *Earth Surface Dynamics*, *8*(1), 123-159. https://doi.org/10.5194/esurf-8-123-2020

Delcaillau, B., Carozza, J. M. & Laville, E. (2006). Recent fold growth and drainage development: the Janauri and Chandigarh anticlines in the Siwalik foothills, Northwest India. *Geomorphology 76*: 241–256. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.005

FAO-UNESCO-ISRIC (1990). Soil Map of the World, Revised Legend with corrections, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, World Soil Resources Report No 60, Italy, p. 140.

Gabet, E. (2019). Lithological and structural controls on river profiles and networks in the northern Sierra Nevada (California, USA). *Geological Society of America Bulletin*, *132*(3-4), 655-667. https://doi.org/10.1130/b35128.1

Haag, M., Schoenbohm, L., Wolpert, J., Jess, S., Bierman, P., Corbett, L., Sommer, C. A. & Endrizzi, G. (2025). Rock strength controls erosion in tectonically dead landscapes. *Science Advances*, *11*(4). https://doi.org/10.1126/sciadv.adr2610

McCarthy, J., Schoenbohm, L., Bierman, P., Rood, D., & Hidy, A. (2019). Late quaternary tectonics, incision, and landscape evolution of the Calchaquí river catchment, Eastern Cordillera, NW Argentina. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, *124*(8), 2265-2287. https://doi.org/10.1029/2019jf005091

Ramsey, L.A., Walker, R.T., Jackson, J., 2008. Fold evolution and drainage development in the Zagros Mountains of Fars province, south-east Iran. *Basin Res. 20* (1), 23–48. https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00342.x

Schumm, S.A. (1986). Alluvial river response to active tectonics. In: N.R. Council (Editor), Active Tectonics. National Academy Press, Washington (D.C.), pp. 80-94

Seagren, E. and Schoenbohm, L. (2021). Drainage Reorganisation Across the Puna Plateau Margin (NW Argentina): Implications for the Preservation of Orogenic Plateaus. *Journal of Geophysical Research Earth Surface, 126*(8). https://doi.org/10.1029/2021jf006147

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am. Geophys. Union, 38*, 913–920; https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913

Twidale, C.R. (2004) River Patterns and Their Meaning. *Earth-Science Reviews, 67*, 159-218. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.03.001

Yanites, B., Becker, J., Madritsch, H., Schnellmann, M., & Ehlers, T. (2017). Lithologic effects on landscape response to base level changes: a modeling study in the context of the eastern Jura mountains, Switzerland. J*ournal of Geophysical Research Earth Surface*, *122*(11), 2196-2222. https://doi.org/10.1002/2016jf004101

Yordanov, B., Sarov, S., Georgiev, S., Dobrev, G., Moskovska, L., Grozdev, V., Balkanska, E. (2008). Geological map of the Republic of Bulgaria, Scale 1:50000, Map sheet K-35-75-G (Nikolovo). Ministry of Environment and Water, Bulgarian Geological Survey (In Bulgarian)

SIMPLIFIED METHOD FOR THE EVALUATION OF GROUNDWATER INFLOW INTO CONSTRUCTION EXCAVATIONS AT INSUFFICIENTLY INVESTIGATED SITES

Nikolay Stoyanov

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

ABSTRACT. In work practice, it is not uncommon to solve various engineering problems without knowing well the specific hydrogeological conditions. In such cases, finding an unambiguous solution is almost impossible or it is usually substituted with a range of values, which are based on variation of reasonably selected values of insufficiently studied parameters of the geological setting. The simplified method presented here for evaluation of the groundwater inflow into construction excavations is based on multivariant numerical three-dimensional (3D) models of groundwater flow with variation of the hydraulic conductivity of the strata in insufficiently studied aquifer. The method capability is illustrated by a practical example of quantitative evaluation of the groundwater discharge into an excavation at a construction site in the eastern part of Sofia Basin. The presented multivariant numerical model was developed using *Modflow* software with input of tabled hydraulic conductivity values for the modelled layers.

Key words: hydrogeological modelling, groundwater inflow, construction excavation, hydrogeology.

ОПРОСТЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОДЗЕМНИЯ ВОДОПРИТОК КЪМ СТРОИТЕЛНИ ИЗКОПИ В СЛАБО ПРОУЧЕНИ ТЕРЕНИ

Николай Стоянов

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

РЕЗЮМЕ. Нерядко в практиката се налага да решаваме различни инженерни задачи без добре да познаваме конкретните хидрогеоложки условия. В тези случаи е почти невъзможно намирането на еднозначно решение, което най-често заместваме с диапазон от стойности на търсената величина, получени след вариране в разумни граници на слабо изучените параметри на геоложката среда. Предложеният опростен метод за определяне на подземния водоприток към строителни изкопи се базира на многовариантни числени 3D модели на подземния поток при вариране на коефициента на филтрация на пластовете, съставящи слабо проучения водоносен комплекс. Възможностите на метода са илюстрирани с практически пример за количествената оценка на подземния водоприток към строителен изкоп в източната част на Софийската котловина. Представеният многовариантен числен модел е разработен с компютърна програма Modflow, като са използвани таблични стойности за коефициента на филтрация на моделните пластове.

Ключови думи: хидрогеоложки модели, приток на подземни води, строителни изкопи, хидрогеология.

Въведение

Важен въпрос при проектиране на строителни обекти, независимо от тяхното предназначение, е предварителната оценка на конкретните хидрогеоложки условия и ясно дефиниране на възможните проблеми, свързани с притока на подземни води по време строителството и/или след неговото завършване. За тази цел на строителната площадка се провеждат различни по вид и обем специализирани проучвания, съобразени със значимостта и конструктивните особености на всеки обект, сложността на природните условия и степента на тяхната изученост. Въз основа на получените резултати, в световната практика се прилагат най-различни методи за понижаване на водното ниво и оценка на водоотлива от строителните изкопи (Powers et al, 2007; Иванов, 2013; Tang et al, 2017; Liu et al, 2019; Cashman and Preene, 2020).

В повечето случаи, според спецификите на обекта, параметрите на хидрогеоложкото проучване са методично и/или нормативно детерминирани. Поради недооценяване на проблема или липса на достатъчно финансиране, обаче, нерядко се налага прогнозните оценки на водопритока да се правят при слаба изученост на площадката и главно по архивна информация на хидрогеоложките условия.

Предлаганият опростен метод за определяне на водопритока в недостатъчно проучени терени се базира на двадесет и пет годишния опит на автора в проектирането и моделирането на отводнителни съоръжения и системи за понижаване на подземните води в строителни изкопи, кариери за инертни материали, открити и подземни минни обекти, тунели, метростанции, хвостохранилища, открити водосъбирателни съоръжения и басейни, свлачищни терени и др. (Стоянов, 2006, 2011, 2019; Стоянов и Лаков, 2009; Stoyanov et al, 2016; Stoyanov and Dimovski, 2022). Частично решение на проблема при изчисленията и изготвянето на прогнози в сложни хидрогеоложки условия е представено в публикувания преди няколко години опростен подход за предварителна оценка на водопритока, който бе успешно приложен при проектирането на водопонизителна система на една от строящите се метростанции на Софийския метрополитен (Stoyanov and Dimovski, 2022). По темата, през последните години, има публикации и на други български автори, в част от които са показани възможностите на числените едномерни модели за предварителни оценки на водопритока в малко по-различен контекст на конкретните изследвания (Antonov et al., 2018; Цветкова и др., 2019). В други работи са ползвани класически аналитични формули с цялата условност на приетите изчислителни схеми (Бендерев и др., 2010; Божинова-Попова и Малинкова, 2023, 2024).

В настоящата публикация се разглеждат възможностите за прогнозиране на притока на подземни води към строителните изкопи при много по-слабо познаване на конкретните хидрогеоложки условия. Предложеният метод се основава на голям брой вариантни решения за определяне на търсената величина при вариране стойностите на коефициента на филтрация на пластовете, съставящи недостатъчно проучения водоносен комплекс. Методът е апробиран с практически пример за определяне на възможния водоприток към строителен изкоп в района на

с. Казичене, Софийска област. Прогнозите са направени посредством различни варианти на разработения с програма Modflow основен числен 3D модел, като са използвани таблични стойности за коефициента на филтрация на зададените в компютърните симулации модели пластове. При композирането на модела са използвани и непубликувани данни за геоложкия строеж и нивата на подземните води от проведените в района на изследвания обект сондажни проучвания.

Концептуален модел

В разработения многовариантен числен 3D модел за определяне на подземния водоприток към строителния изкоп е имплементирана следната най-обща концепция за съществуващите хидрогеоложки условия:

Основната хидрогеоложка единица в района е кватернерният водоносен хоризонт. Той е съставна част на неоген-кватернерния комплекс, който е главната водоносна структура в Софийската котловина (Антонов и Данчев, 1980). Кватернерният водоносен хоризонт е изграден от пролувиално-алувиални глинесто-песъчливи наслаги с дебелина 25-30 m. Разрезът е с неоднороден литоложки и зърнометричен състав, което предпоставя и големи различия във водопропускливостта и водообилността на съставящите го пластове и прослойки.

В рамките на кватернерния хоризонт могат да се отделят три хидрогеоложки единици от по-нисък ранг: *Горен слабо водоносен пласт (ХГЕ1)* – песъчлива глина; *Среден водоносен пласт (ХГЕ2)* – пясък, пясък с чакъл и единични прослойки от глина; *Долен слабо водоносен пласт (ХГЕ3)* – глина, прахова глина, песъчлива глина, глина с чакъл и единични прослойки от пясък. Обобщени данни за средната дебелина и коефициента на филтрация на тези единици са представени в Табл. 1.

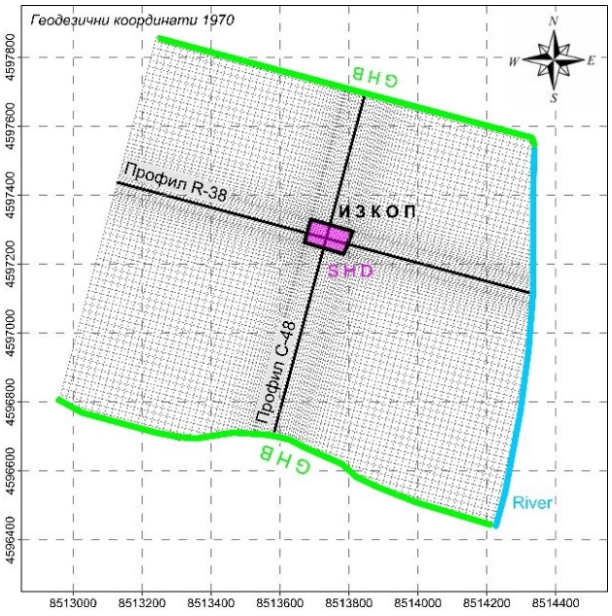
Подземните води са безнапорни до слабо напорни със статично ниво на около 2,5-3,0 m под терена. В района на строителния изкоп са на кота 541 - 542 m. Генералната посока на подземния поток е на С-СИ, а средният градиент е 0,005. Основното подхранване на кватернерния хоризонт е от идващия от юг подземен поток и от падналите валежи. Скоростта на инфилтрационно подхранване е $1,6x10^{-4}$ m/d. Тя е изчислена съобразно средната водопропускливост на повърхностния слой, средногодишната температура на въздуха и годишната сума на валежите (Bredenkamp, 1990). Източно от площадката протича малка река с непостоянен отток, която е хидравлично свързана с подземните води.

Строителният изкоп ще се изгради в горния слабо водоносен пласт (ХГЕ1). Той има формата на правоъгълен трапец с площ 6750 m^2 и дълбочина – около 5 - 6 m под терена. Проектната кота на дъното на изкопа е 539 m.

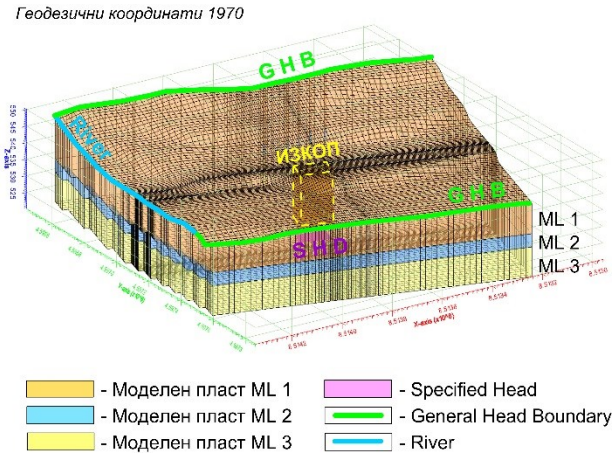
Методика и инструменти

Посредством разработения с програма Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988; Harbaugh, 2005; Anderson et al, 2015; Стоянов, 2019) многовариантен числен модел, са направени 3D симулации на филтрационното поле в района на изследвания обект, които отчитат конкретните хидрогеоложки условия и геометрията на строителния изкоп. Моделната рамка обхваща част от кватернерния водоносен хоризонт на площ 1,3 km^2 и до дълбочина 30 m (Фиг. 1). Моделът включва три моделни пласта – ML1, ML2 и ML3, които симулират пространственото разпространение на отделените в разреза хидрогеоложки единици от по-нисък ранг – ХГЕ1, ХГЕ2 и ХГЕ3 (Фиг. 2).

Граничните условия са дефинирани посредством програмните пакети General head boundary (GHB), River, Recharge и Specified head (Harbaugh, 2005). Регионалният поток е моделиран чрез симулиране на разход по северната и южната граница по схемата GHB. Реката е зададена в моделен пласт ML1 с гранично условие River. За началното разпределение на напорите са приети такива стойности, при които средният хидравличен градиент е около 0,005. Използваната проводимост по външните граници е изчислена съобразно дебелината и коефициента на филтрация на всеки моделен пласт при съответния подвариант. Инфилтрационното подхранване е зададено като постоянна с гранично условие Recharge като постоянна величина в моделен пласт ML1. Строителният изкоп е симулиран като площен дренаж с гранично условие Specified Head на кота 539. Моделът е калибриран спрямо установените в проучвателните сондажи водни нива с вариране на коефициента на филтрация, инфилтрацията и регионалния подземен поток.



Фиг. 1. Моделна рамка на основния числен 3D модел.



Фиг. 2. Пространствена дискретизация на моделната област, геометрия на моделните пластове и гранични условия.

Таблица 1. *Граници на вариране на стойностите на коефициента на филтрация k на нискоранговите ХГЕ*

Хидрогеоложка единица	Дебелина, m	k, m/d		
		max	min	average
ХГЕ1	11,5	0,01	0,35	0,20
ХГЕ2	4,0	5,00	30,0	15,0
ХГЕ3	12,5	0,005	0,40	0,10

Забележка: Дебелините на ХГЕ са определени по непубликувани данни от сондажно проучване, а стойностите на k – по данни на Spitz and Moreno (1996) и Fetter (2001)

Таблица 2. *Вариантни модели и подварианти. Стойности на k в моделни пластове ML1, ML2 и ML3.*

Вариант	Подвариант	Коефициент на филтрация k, m/d		
		ML1	ML2	ML3
v.01	v.01-Max30	0,35	30	0,40
	v.01-Min05		5	0,01
v.02	v.02-Max30	0,35	30	0,4
	v.02-Max20		20	
	v.02-Max15		15	
	v.02-Max10		10	
	v.02-Max05		5	
	v.02-Mid30		30	0,1
	v.02-Mid20		20	
	v.02-Mid15		15	
	v.02-Mid10		10	
	v.02-Mid05		5	
	v.02-Min30		30	0,01
	v.02-Min20		20	
	v.02-Min15		15	
	v.02-Min10		10	
	v.02-Min05		5	

Посредством калибрирания 3D модел са разработени два вариантни модела, с които е симулирана структурата на филтрационното поле в следните случаи: Модел v.01 - естествена структура на филтрационното поле до началото на водоотлива; Модел v.02 - нарушена структура на полето в условията на водоотлив от строителния изкоп.

С двата модела са проиграни голям брой подварианти (общо 17). Основните мотиви за това по-подробно изследване са: (1) Идентифицирането на представителни стойности на k на трите ХГЕ е обективно затруднено от много голямата хетерогенност на седиментния комплекс и отсъствието на опитно-филтрационни изследвания на проучваната площадка. (2) Представените в Табл. 1 твърде широки диапазони на k за средния водоносен пласт (ХГЕ2) и долния слабо водоносен пласт (ХГЕ3) са определени по литературни данни. От друга страна, основният водоприток към изкопа е от тези два пласта и, макар те да имат различен дял при неговото формиране, тяхното прецизиране е изключително важно за точността на направената прогноза. (3) Относително хомогенният състав на наслагите в горния слабо водоносен пласт (ХГЕ1) предполага, че той е еднороден и по своите филтрационни характеристики. Затова във всички модели с достатъчен инженерен запас за него се приема максималната стойност на k (0,35 m/d). С оглед на това, в подвариантите модели са варирани единствено стойностите на k в средния водоносен пласт и долния слабо водоносен пласт. Приетите стойности на k в проиграните подварианти на двата вариантни модела са представени в Табл. 2.

Въз основа на получените резултати от подвариантите на Модел v.02 е изведена функционална зависимост Q = f (k), даваща връзката между подземния водоприток към строителния изкоп (Q) и зададените в моделните пластове коефициенти на филтрация (k).

Резултати и дискусия

Посредством разработените варианти и подварианти на основния модел са получени голям брой решения за разпределението на напорите и градиентите на подземния поток при различни стойности на зададените коефициенти на филтрация в моделни пластове ML2 и ML3. Част от тези решения са твърде близки и трудно различими на хидродинамичните карти и разрези. От друга страна конкретната задача не изисква по-прецизен анализ на промените в пиезометричната картина, поради което тук са представени единствено решенията при екстремно високи или ниски стойности на k в средния водоносен пласт. Тези гранични случаи са отразени на фигури 3, 4, 5 и 6 с поредица от хидродинамични карти и разрези по профили R-38 и C-48. Разположението на двата профила е дадено на Фиг. 1.

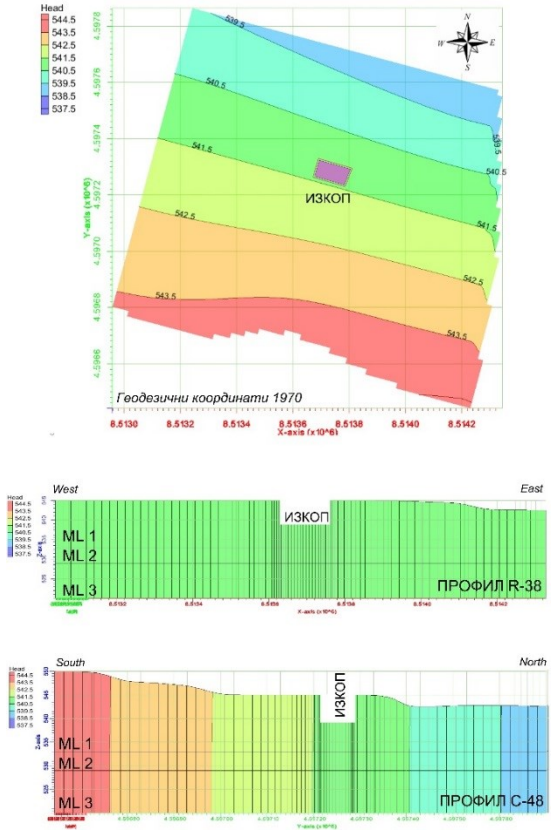
Наблюдаваните на фигури 3, 4, 5 и 6 забележими промени в структурата на подземния поток дават основание да се направи следния коментар:

(i) В естествени условия подземният поток е ориентиран на североизток. Средният хидравличен градиент е около 0,005 - Фиг. 3 и Фиг. 5.

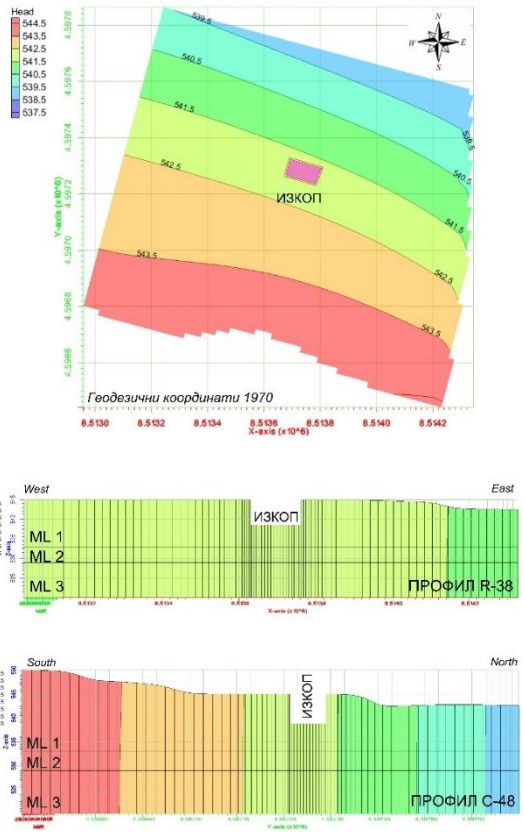
(ii) При слаба водопропускливост на средния и долния пласт естествените нива при изкопа са по-високи, което вероятно се дължи на намаления обем на празните пространства, повишена дисперсност на запълнителя и, свързаното с това, частично подприщване на потока. В резултат се наблюдава и много ясна диференциация по отношение на градиента на потока – по-нисък в южната част на моделната област и по-висок в северната – Фиг. 5.

(iii) Размерите на създадената при водоотлива пиезометрична депресия пряко зависи от водопропускливостта на лежащите под изкопа пластове. Деформациите на филтрационното поле са забележимо по-големи при приети по-високи стойности на коефициента на филтрация и обратното - Фиг. 4 и Фиг. 6.

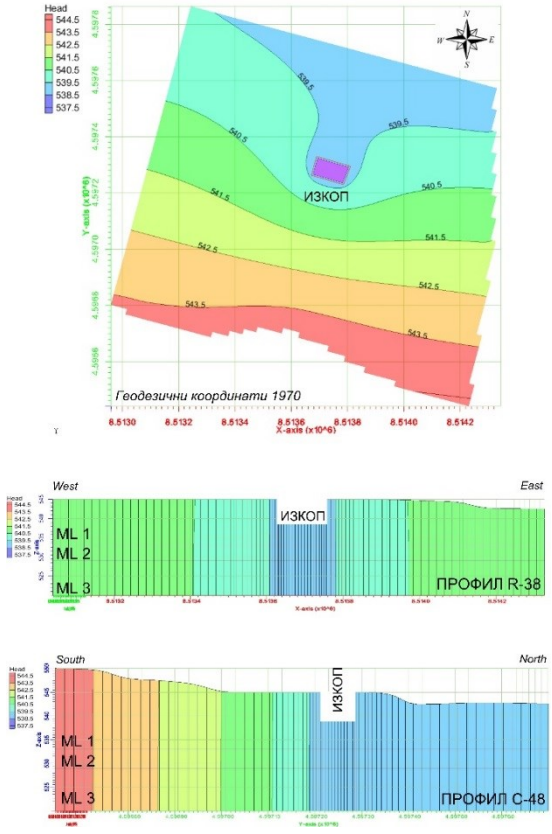
С разработените вариантни модели са получени и различни решения за водния баланс в изследваната част на кватернерния водоносен хоризонт. Количествено са определени всички приходни и разходни елементи – приток/отток по външните граници на модела, приток от инфилтрация на валежни води и отток към строителния изкоп, който по същество е и търсеният подземен водоприток Q. Определените, въз основа на моделните решения за водния баланс при различните подварианти на Модел v.02, стойности на Q са представени в Табл. 3. По тези данни е съставена зависимостта Q = f (k) – виж Фиг. 7, даваща връзката между подземния водоприток в изкопа Q и коефициента на филтрация k в средния водоносен пласт и долния слабо водоносен пласт.



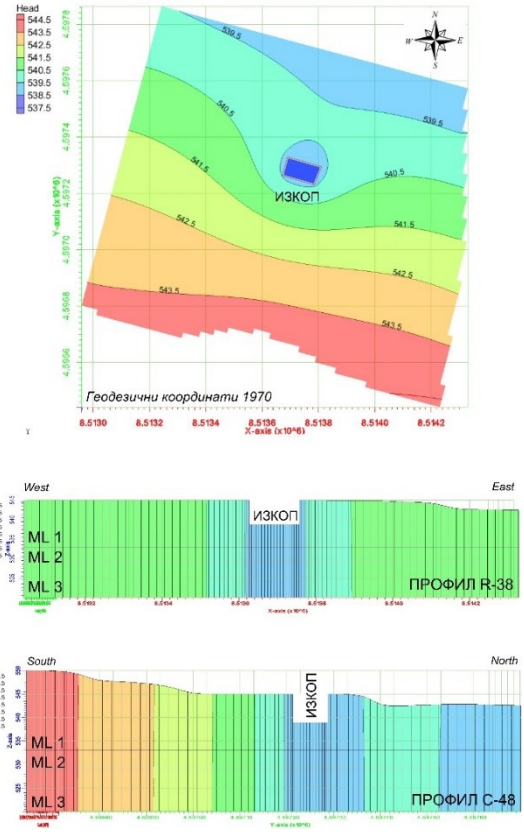
Фиг. 3. Модел v.01-Max30. Естествена структура на филтрационното поле. Хидродинамична карта и разрези по профили R-38 и C-48.



Фиг. 5. Модел v.01-Min05. Естествена структура на филтрационното поле. Хидродинамична карта и разрези по профили R-38 и C-48.



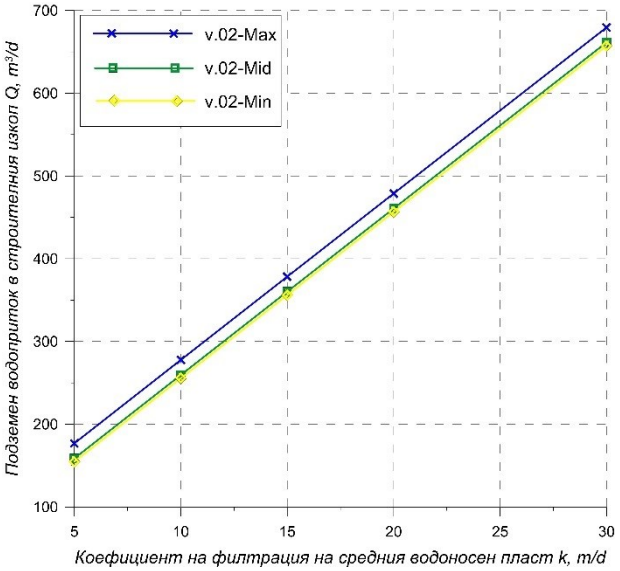
Фиг. 4. Модел v.02-Max30. Нарушена структура на филтрационното поле. Хидродинамична карта и разрези по профили R-38 и C-48



Фиг. 6. Модел v.02-Min05. Нарушена структура на филтрационното поле. Хидродинамична карта и разрези по профили R-38 и C-48.

Таблица 3. *Подземен водоприток към строителния изкоп, определен от моделните решения за водния баланс при различните подварианти на Модел v.02.*

Подвариант	Подземен водоприток към изкопа Q	
	m^3/d	L/s
v.02-Max30	679,5	7,86
v.02-Max20	478,8	5,54
v.02-Max15	378,3	4,38
v.02-Max10	277,7	3,21
v.02-Max05	176,9	2,05
v.02-Mid30	661,4	7,66
v.02-Mid20	460,7	5,33
v.02-Mid15	360,2	4,17
v.02-Mid10	259,5	3,00
v.02-Mid05	158,7	1,84
v.02-Min30	657,3	7,61
v.02-Min20	456,6	5,28
v.02-Min15	356,1	4,12
v.02-Min10	255,5	2,96
v.02-Min05	154,7	1,79



Фиг. 7. Модел v.02. Номограма, определяща връзката между подземния водоприток Q и коефициентите на филтрация k в средния водоносен пласт и долния слабо водоносен пласт.

Анализът на получените резултати от водния баланс позволява да се направят следните обобщения и изводи:

(i) Връзката между големината на подземния водоприток към строителния изкоп и водопропускливостта на отдолулежащите водоносни пластове е линейна.

(ii) Прогнозните стойности на очаквания водоприток варират в сравнително тесен диапазон – от 1,8 до 7,9 L/s.

(iii) Максималните стойности на възможния водоприток (от 7,6 до 7,9 L/s) корелират с приетите най-високи стойности на коефициента на филтрация (30 m/d) за средния водоносен пласт, от който впрочем постъпва основният дял от дрениращите се в изкопа подземни води.

(iv) Обратно на това минималните стойности на водопритока (от 1,8 до 2,1 L/s) се свързват с приетата най-ниска стойност на k в средния водоносен пласт, която в случая е в размер на 5 m/d.

(v) Направените по-горе констатации и много близкото отстояние на представените на Фиг. 7 линейни зависимости показват Q = f (k), че водопритокът от долния слабо водоносен пласт към изкопа е нищожен и е без особено практическо значение.

(vi) В заключение може да се прогнозира, че подземният водоприток към строителния изкоп най-вероятно ще е в границите между 4,0 и 5,5 L/s, но е възможно, макар и много малко вероятно, да достигне до не повече от 8-10 L/s.

Заключение

Предложеният метод дава възможност за изготвяне на сравнително точни и финансово ефективни прогнози относно подземния водоприток към строителни изкопи в слабо проучени терени. Приведеният практически пример потвърждава тезата, че дори при отсъствие на достатъчно данни за конкретния обект, посредством прилагане на многовариантни компютърни 3D модели с вариране стойностите на основните характеристики на водоносните пластове (напр. коефициент на филтрация) е възможно да се получи реална представа за възможния диапазон на всеки от елементите на водния баланс. Впоследствие количествената оценка на водопритока се прецизира въз основа на много подробен анализ на получените моделни решения. Анализът включва и отговор на други важни въпроси относно естествената и нарушената при водоотлива структура на филтрационното поле, размерите на създадената пиезометрична депресия, проектирането на водопонизителни системи и/или противофилтрационни съоръжения, условията за суфозия и/или слягане на терена и т.н. Очевидно, предложеният опростен метод може да се прилага успешно за решаването на много и различни хидрогеоложки, инженерно-геоложки, минно-технически и екологични и задачи.

Литература

Anderson M., W. Woessner, R. Hunt. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (2nd ed.). Elsevier, Academic press, 720 p.

Antonov, D., K. Nakamura, T. Kotsev, V. Stoyanova, R. Kretzschmar. (2018). Application of hydrus-1D for evaluation of the vadose zone saturation state in connection with arsenic mobilization and transport in contaminated river floodplain – Ogosta Valley case study, NW Bulgaria. – Proc. 18th Intern. Multidisciplinary Sci. GeoConference “SGEM`2018”, 18, 1.2, (pp. 83–90) doi.org/10.5593/sgem2018/1.2/S02.011.

Bredenkamp, D. (1990). Quantitative estimation of groundwater recharge by means of a simple rainfall-recharge relationship. – In: *Groundwater recharge. IAH Memoir, Vol 8.* (Eds. Lerner, D., A. Issar, I. Simmers). Heise, 247−256.

Cashman, P., M. Preene. (2020). *Groundwater lowering in construction. A practical guide to dewatering* (3rd ed.). CRC Press, Taylor & Francis, NY, 918 p.

Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology* (4th Ed.). Prentice Hall Inc., NJ. 598 p. ISBN 0-13-088239-9.

Harbaugh, A., (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model - the ground-water flow process*: U.S.G.S. Techniques and Methods 6-A16, 253 p. https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF/TM6A16.pdf

Liu, L., M. Lei, C. Cao, C. Shi. (2019). Dewatering characteristics and inflow prediction of deep foundation pits with partial

penetrating curtains in sand and gravel strata. *Water, 11,* no.10: 2182. doi.org/10.3390/w11102182.

McDonald, J., A. Harbaugh. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference flow model*. Techniques of Water Resources Investigations of USGS, Book 6. 586 p.

Powers J., A.Corwin, P.Schmall, W.Kaeck. (2007). *Construction dewatering and groundwater control: New methods and applications*. John Wiley & Sons Inc., NJ, 656 p.

Tang, Y., J. Zhou, P. Yang, J. Yan, N. Zhou. (2017) *Groundwater Engineering. Springer Natural Hazards* (2nd ed.), Springer Singapore, 423 p. doi.org/10.1007/978-981-10-0669-2.

Spitz, K., J. Moreno. (1996). *A practical guide to groundwater and solute modeling*. John Wiley & Sons Inc., NY, 460 p.

Stoyanov N., A. Benderev, V. Petrov, I. Ivanov, V. Hristov. (2016). Some problems on the interaction of the urban environment and groundwater in the city of Sofia, Proceedings of the 2nd IAH Central European Groundwater Conference "Groundwater risk assessment in urban areas", 14-16 October, 2015, Bucharest, Romania (pp. 158-172).

Stoyanov, N., S. Dimovski. (2022). A simplified approach based on mathematical modelling for the preliminary assessment of groundwater inflow to excavations at a construction site, Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 65/2022 - 65th International Scientific Conference, 21.10.2022, Sofia, Bulgaria (pp. 79-84) doi.org/10.5281/zenodo.14412409

Антонов, Х., Д. Данчев. (1980). *Подземни води в НРБ*. Техника, София, 360 с.

Бендерев, А., В. Спасов, Б. Михайлова, Т. Василева. (2010) Хидрогеоложки условия и проблеми при бъдещо разработване на Ломския въглищен басейн. Инженерна геология и хидрогеология. 25, 123-142.

Божинова-Попова. И., Е. Малинкова. (2023). Инженерно-геоложки и хидрогеоложки условия и методи за отводняване и фундиране на сграда в близост до воден басейн. Год. на МГУ, т.66 – 66-та Международна научна конференция, 20.10.2023, София, България (стр.134-137). doi.org/10.5281/zenodo.8334597

Божинова-Попова. И., Е. Малинкова. (2024). Укрепване на дълбок изкоп при сложни инженерногеоложки условия. Год. на МГУ, т.67 – 67-ма Международна научна конференция, 18.10.2024, София, България (стр.126-130). doi.org/10.5281/zenodo.13762680

Иванов, И. (2013). *Отводняване на строителни изкопи. Методи за изчисляване и примери, съгласно изискванията на Еврокод 7*. Димакс, София, 110 с.

Стоянов, Н. (2006). Математически модел за оразмеряване на водопонизителна система за отводняване на свлачището в района на град Оряхово. БУЛАКВА, 4, 45-52. ISSN 1312 3912.

Стоянов, Н., А. Лаков. (2009). Оценка на опасността от суфозия и слягане на основите на хотел “Марица” в град Пловдив при отводняване на строителен изкоп, Год. на МГУ, т.52 (стр. 165-170). ISSN 1312 1820.

Стоянов, Н. (2011). Модел на пиезометричната депресия в неоген-кватернерния комплекс при изграждане на I-ви диаметър на метрополитена в централната част на град София, Год. на МГУ, т.54 (стр.155-160). https://mgu.bg/wp-content/uploads/2025/04/Vol.-54-I-2011-155-160.pdf

Стоянов, Н. (2019). *Математическо моделиране в хидрогеологията. Числени 3D модели по метода на крайните разлики*. В. Недков, София, 246 с.

Цветкова, М., Д. Антонов, Д. Карастанев. (2019). Моделни изследвания за оценка на влажностния режим на мергелите от Сумерската свита, Северозападна България. Списание на Българското геоложко дружество, 80, 3, 194-196.

GEOLOGICAL POSITION AND MINERAL COMPOSITION OF THE LOWEST MINED LEVELS OF THE *KASHANA* BARITE DEPOSIT (PRELIMINARY DATA)

Stanislav Stoykov, Lyubomir Mihaylov, Elia Pavlova

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

ABSTRACT. The Kashana Deposit is located in the northern part of the Srednogorie magmatic and metallogenic zone, in the Elatzite–Chelopech ore field, between the town of Etropole and the village of Chelopech, near the Elatzite Cu-porphyry deposit and the Chelopech Au-Cu epithermal deposit. The mineralisation of the Kashana barite deposit is related to the Late Cretaceous intermediate Ca-alkaline magmatism. It was discovered in 1929 and its underground operation started in 1939. The aim of the present study is to determine the mineral composition of samples from the lowest mined part of the deposit using optical microscopy, XRD, and SEM methods of investigation. The deposit is hydrothermal, vein type The main mineral is barite, but the current study establishes the presence of minor minerals, like quartz, muscovite, and hematite. The barite raw material is characterised by massive texture, high whiteness, and low content of Sr.

Key words: barite, mineral composition, mineral deposit, critical raw materials.

ГЕОЛОЖКО ПОЛОЖЕНИЕ И МИНЕРАЛЕН СЪСТАВ НА НАЙ-НИСКИТЕ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ХОРИЗОНТИ НА БАРИТНОТО НАХОДИЩЕ „КАШАНА“ (ПРЕДВАРИТЕЛНИ ДАННИ)

Станислав Стойков, Любомир Михайлов, Елия Павлова

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

РЕЗЮМЕ. Находище „Кашана“ се намира в северната част на Средногорската магмена и металогенна зона. То попада в Елашко-Челопешкото рудно поле, между град Етрополе и Челопеч, в близост до които се намират медно-порфирното находище „Елаците“ и медно-златно-епитермалното находище „Челопеч“. Минерализацията на баритното находище „Кашана“ е свързана с къснокредния калциево-алкален магматизъм, проявен в района. То е открито през 1929 година, а неговото подземно разработване започва през 1939 година. Целта на настоящото изследване е определянето на минералния състав на проби от най-ниските разработвани нива на находището. Използвани са оптична микроскопия, рентгено-структурен анализ и сканираща-електронна микроскопия. Находището е хидротермално от жилнен тип. Най-широко разпространеният минерал е барита. При настоящото изследване е установено е присъствието в малки количества на: кварц, мусковит и хематит. Баритната суровина се характеризира с масивна текстура, висока белота и ниско съдържание на стронций.

Ключови думи: барит, минерален състав, баритно находище, суровини от критично значение.

Introduction

Barite is naturally occurring $BaSO_4$. Barium can be substituted isomorphously by Sr and Ca. Barite is inert and non-toxic. It has high density (4.5 g/cm^3), low hardness 2.5-3.5 (on the Moss scale), and low oil absorption. It is 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). About 60% of barite consumption is for weighting agent in oil and gas drilling fluids, about 30% for fillers in rubbers, plastic, paints, and paper production, and about 10% in the chemical industry. The leading world suppliers of barite are China (about 40% of the world production), followed by India and Morocco. 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 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 Kremikovtsi (open pit) mine. The largest part of mined barite in Bulgaria was exported. More then 75 barite deposits were in operation in Bulgaria during the previous century (Andreevich, et. al. 1989).

The aim of our investigation is to determine the mineral composition of the barite raw material from the lowest levels of underground extraction in the Kashana mine.

Geology of the Kashana deposit

The Kashana deposit is situated in the northern part of the Central Srednogorie volcano-plutonic area, which forms part of the Srednogorie tectonic and magmatic and metallogenic zone (Dabovski et al., 2002), (Fig. 1). The deposit is situated in the Elatzite – Chelopech ore field, between the town of Etropole and the village of Chelopech, near the Elatzite Cu-porphyry deposit and the Chelopech Au-Cu epithermal deposit.

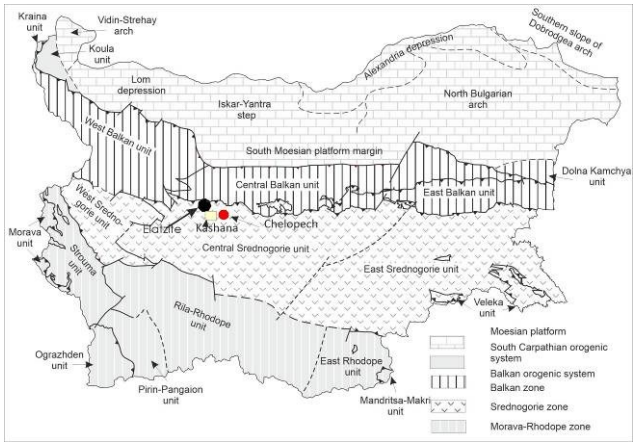


Fig. 1. Tectonic Scheme of Bulgaria (after Dabovski et al., 2002) with the location of the Elatzite, Chelopech and Kashana deposits

The mineralisation of the Kashana barite deposit is related to the Late Cretaceous intermediate Ca-alkaline magmatism. The basement in the area consists of high-grade metamorphic

rocks (two-mica migmatites with thin intercalations of amphibolites, amphibole-biotite, and biotite gneisses) of Pirdop Group (Dabovski, 1988), and low metamorphic phyllites and diabases of the Berkovitsa group (Early Paleozoic island-arc volcanic complex) (Haydoutov, 2001), (Fig. 2). These units are in tectonic contact with each other, and to the north of Chelopech the phyllites of the Berkovitsa group are intruded by the Variscan granitoids (Kamenov et al., 2002) of the Vezhen pluton – hornblende-biotite granodiorite and granite of Carboiniferous age. The Late Cretaceous succession in the region is presented by magmatic and sedimentary rocks. In the area of the Elatzite Cu-porphyry deposit, the Upper Cretaceous magmatism is represented by 3 units: 1 – subvolcanic quartz-monzonite porphyrites, 2 – granodiorite porphyrites, and 3 – aplites (Kamenov et. al, 2003). The Late Cretaceous sedimentary succession in the southern part of region starts with conglomerates and coarse-grained sandstones intercalated with coal-bearing interbeds (coal-bearing formation) (Moev and Antonov, 1978) covered by polymictic, argilleous and arkose sandstones to siltstones (sandstone formation). Pollen data suggests that both formations are Turonian (Stoykov and Pavlishina, 2003). The sedimentary rocks are cut by volcanic bodies and overlain by sedimentary and volcanic rocks of the Chelopech Formation (Moev and Antonov, 1978). It comprises the products of the Chelopech volcanic complex, epiclastics, as well as the Vozdol sandstones. The latter are paleontologically dated as Turonian in age (Stoykov and Pavlishina, 2003). These formations have been eroded and transgressively covered by sedimentary rocks of the Upper Senonian Mirkovo Formation (reddish limestones and marls), which are in turn overlain by flysch of the Chugovo Formation (Campanian-Maastrichtian in age) (Moev and Antonov, 1978). Based on their structures, host rocks, cross-cutting relationships and alterations on the surface of the products of the Chelopech volcanic complex, have been subdivided into 3 units:

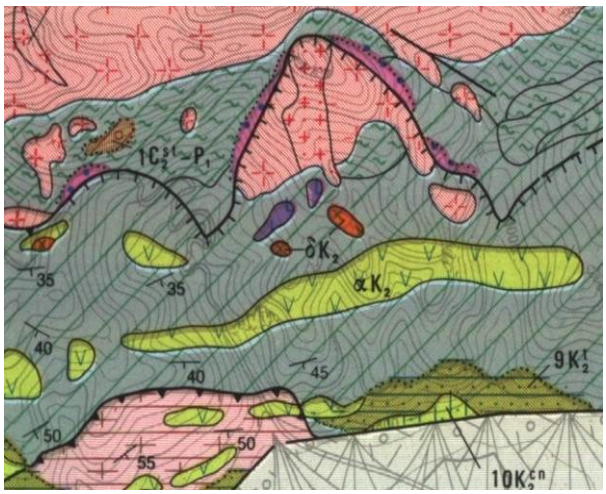
(I) dome-like volcanic bodies – andesites and trachydacites,

(II) lava and agglomerate flows – of latitic-trachydacitic and dacitic composition,

(III) the Vozdol volcanic breccias and volcanics – basaltic-andesites, and andesites to latites (Stoykov et al., 2002; 2004).

Several dykes are exposed to the east of to the Chelopech volcanic complex (Fig. 2). They strike predominately in an east west direction and intrude into the Pre-upper Cretaceous metamorphic basement. They do not show cross-cutting relationships to the Chelopech volcanic complex. The largest dyke is more than 7 km in length. These dykes have andesitic, latitic, dacitic, and trachydacitic compositions. Their phenocrysts (> 40 volume %) consist of plagioclase, zoned amphibole, minor biotite, and titanite; whereas the microlites consist only of plagioclase and amphibole. These dykes host barite mineralisation in the region and the Kashana mine. The magmatic products in the areas of the Elatzite and Chelopech deposits reveal similar Sr, Nd, and Hf characteristics, where the tendency of an increase of 90 (Nd) and a decrease of 90 (Hf) zircon could be related to minor assimilation of host rocks within parts of the magmatic chamber (Stoykov et. al. 2004).

The Kashana deposit is hydrothermal, vein type and was discovered in 1929 and its underground operation started in 1939. The deposit was mined by 8 operational underground levels. The main barite vein is 280 m long and from 0.2 to 10 m thick. The economic vein has a depth of more than 450 m. Mining continued until 1971 when its operation was stopped. Numerous smaller barite veins in the area of the main one have been described. The mineralization is related to Upper Cretaceous altered Ca-alkaline intermediate small intrusive. Barite is the main mineral, minor minerals are presented by quartz, calcite, ankerite, fluorite, pyrite, galenite, sphalerite, chalcopyrite, etc. (Andreevich, et. al. 1989).



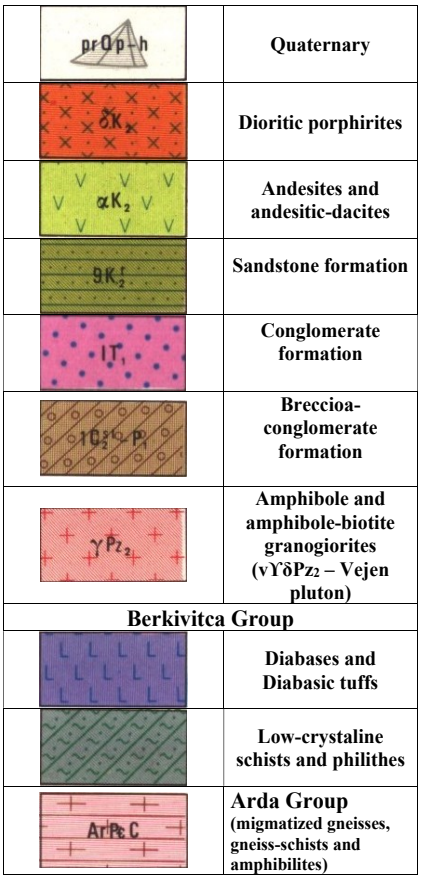


Fig. 2. Geological map of Bulgaria, Teteven sheet, 100 000 scale (after Cheshitev et al., 1995)

Barite content in the higher levels of the Kashana mine is from 48 to 93% (about 80% average) and it decreases in depth to 40%, while quartz content increases up to 50% and calcite up to 5% in the lowest mining level of 1150 m (Andreevich, et. al. 1989).

Analytical techniques

To determine mineral composition of barite raw material, 3 color types of it were sampled: white, greenish colored – A, and pinkish colored – B (Fig. 3).



Fig. 3. Studied sample from the Kashana deposit: A - greenish coloured zone, B - pinkish coloured zone

Polished sections from the lower mined levels of the Kashana deposit were prepared for examination in reflected light. They were investigated under reflected light with a Leica DM2500P microscope at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, Bulgaria. The microphotographs illustrating the mineral composition were taken with a Leica DFC295 integrated digital camera, CMOS type sensor. The same also served to more precisely identify interesting mineral grains subject to microprobe analysis. The electron microprobe analyses were performed 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 was determined by the following analytical conditions: 20 kV accelerating voltage. No standards were used. The measurements of one powdered sample of barite with greenish colored zone 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 7-90° 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”.

Mineral composition

The optical microscope, X-Ray powder diffraction, and SEM investigation shows that the major mineral in the raw material is barite. Minor minerals are presented by quartz, calcite, and hematite.

The white raw material is composed mostly of barite and quartz. According to the X-Ray powder diffraction analyses, the greenish zone is composed of barite – 66%, muscovite – 28,5%, quartz – 5%, and hematite – below 1%. The colour of the pinkish zone is related to the hematite content.

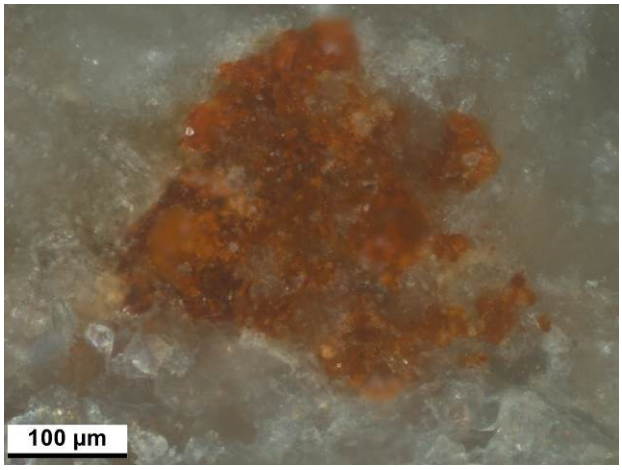


Fig. 4. Hematite in barite and quartz

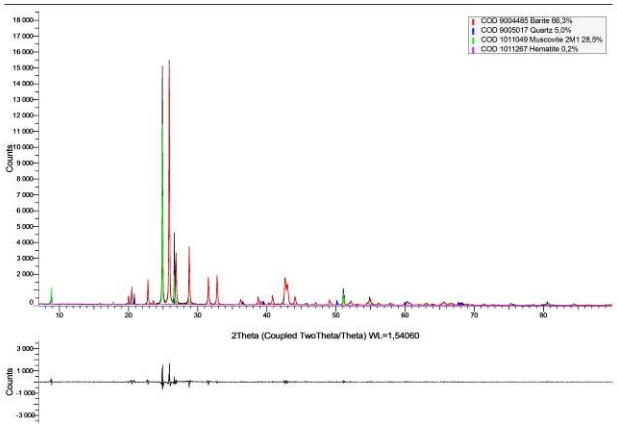


Fig. 5. X-Ray powder diffraction pattern of barite raw material

The barite raw material from the Kashana deposit is characterised by its high whiteness and low Sr content. The SEM investigation shows that Sr content is below 1.5%.

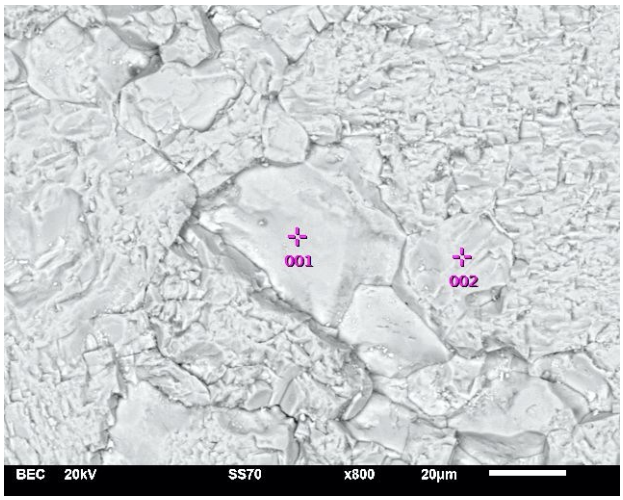


Fig. 6. A SEM image of analysed barites

Table 1. *Chemical composition of studied barites in wt. %*

Sample	Ba	Sr	S	O
001	67.42	1.13	14.15	17.30
002	62.91	1.26	14.44	21.39

Conclusion

The Kashana barite deposit is hydrothermal, vein type. Its formation is related to Late Cretaceous magmatic activity in the Elatzite-Chelopech ore field. The mineralisation is hosted in altered dykes of andesitic, latitic, dacitic, and trachydacitic compositions.

The combined optical microscope, SEM, and XRD investigation of samples from the lowest mining levels of Kashana barite mine suggest that:

- The main mineral in this part of the deposit is barite; minor ones are presented by muscovite, quartz, and hematite.
- The barite raw material is characterised by high whiteness and low Sr content.

Acknowledgements. The present study is partly supported 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 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. This research is partly supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science under the National Program “Young Scientists and Post-doctoral Students-2” - Mineralogical characteristics of Celectite from the region of Targovishte - TD-536/26/09/2024.

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.* 260. Technika, Sofia. (in Bulgarian with English abstract).

Cheshitev, G., Milanova, V., Sapunov, I., & Chumashenko, P. (1995). Geological map of Bulgaria on 100 000 scale, Teteven map sheet.

Dabovski, C. (1988). Precambrian in the Srednogorie zone (Bulgaria). – In Cogne, J., D. Kozhoukharov. H. G. Krautner (Eds.). *Precambrian in Younger Fold Belts. Essex*. 841-847.

Dabovski, C., Boyanov, I., Hrischev, H., Nikolov, T., Sapunov, I., Yanev, Y., & Zagorchev. I. (2002). Structure and Alpine evolution of Bulgaria. *Geol. Balcanica, 32*/2–4, 9–15.

European Commission, Study on the EU’s list of Critical Raw Materials (2020), Factsheets on Critical Raw Materials. (http://www.europa.eu).

Haydoutov, I. (2001). The Balkan island-arc association in West Bulgaria. *Geol. Balcanica, 31*/1–2, 109–110.

Kamenov, B., von Quadt, A., & Peytcheva, I. (2002). New insight into petrology, geochemistry, and dating of the Vezhen pluton, Bulgaria. *Geochem. Mineral. Petrol., 39*, 3–25.

Kamenov, B. K., Nedialkov, R., Yanev, Y., & Stoykov, S. (2003): Petrology of Late Cretaceous ore-magmatic centers from Central Srednogorie, Bulgaria. In: Bogdanov, K. and Strashimirov, S. (eds.): *Cretaceous porphyry-epithermal systems of the Srednogorie zone, Bulgaria. Society of Economic Geologists. Guidebook Series* 36, 133 pp.

Moev, M. & Antonov, M. (1978). Stratigraphy of the Upper Cretaceous in the eastern part of Strelcha Chelopech line. *Ann. de l‘École sup. mines et géol.,* 23, Fasc. II Géol., 7–27 (in Bulgarian with English abstract).

Stoykov, S., Yanev, Y., Moritz R., & Fontignié, D. (2002). Late Cretaceous magmatism of the Chelopech region, the Central Srednogorie volcanic-intrusive zone (Bulgaria). - *Geol. Carpat. Special issue /* 2002. *53 (electronic version).*

Stoykov, S. & Pavlishina, P. (2003). New data for Turonian age of the sedimentary and volcanic succession in the southeastern part of the Etropole Stara Planina Mountain, Bulgaria. *C. R. Acad. bulg. Sci. 56*/6, 55 60.

Stoykov, S., Peytcheva, I., Von Quadt, A., Moritz, R., Frank M., & Fontignie, D. (2004). Timing and magma evolution of the Chelopech volcanic complex (Bulgaria). *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology 84* (1), 101-117.

ROMAN ANTI-EARTHQUAKE TECHNIQUES USED IN THE CONSTRUCTION OF THE STRUCTURE IN THE MAL TEPE MOUND NEAR THE VILLAGE OF MANOLE

Todor Todorov

University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“, 1700 Sofia; E-mail: todorov@pentod.com

ABSTRACT. During archaeological excavations in the central part of the Mal Tepe mound near the village of Manole, a stone structure with a trapezoidal shape and a weight of more than 3,000 tons was discovered. It was built in the middle of the 3rd century and served as the foundation of a 300-ton marble building. The mound is located in a risky earthquake zone with a PGA of 0.32g - 0.4g. Several types of Roman anti-earthquake techniques were used during the construction: trapezoidal shape of the construction; stone construction with intermediate brick rows - *Opus vittatum mixtum*; crossed corner stones - *Quoins*; combined masonry - corners built of bricks connected with stone masonry; mound embankment serving to absorb part of the seismic waves. No traces of damage were found on the foundation even after the 1928 earthquake with a magnitude of 7 on the Richter scale and an epicentre of 12 km away. At the time of the earthquake, the total load on the foundation was 10 000 kN and 370 000 kN on the mound embankment.
This is the tallest preserved ancient building in Europe and without an analogue discovered so far in the world, as a method of construction. The purpose of the entire complex is not known at the moment, but the excavations are not completely finished and it is possible that new facts will be discovered.

Key words: Mal Tepe mound, Manole, Roman anti-earthquake techniques.

РИМСКИ АНТИЗЕМЕТРЪСНИ ТЕХНИКИ, ИЗПОЛЗВАНИ ПРИ СТРОИТЕЛСТВОТО НА СЪОРЪЖЕНИЕТО В МОГИЛАТА МАЛ ТЕПЕ ДО СЕЛО МАНОЛЕ

Тодор Тодоров

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

РЕЗЮМЕ. При археологически разкопки в централната част на могилата Мал тепе до село Маноле се открива каменно съоръжение с трапецовидна форма и тегло повече от 3000 тона. Изградено е в средата на III век и е служело за фундамент на 300-тонна мраморна постройка. Могилата е разположена в рискова земетръсна зона с референтното ускорение 0,32g - 0,4g. При строежа са използвани няколко вида римски противоземетръсни техники: трапецовидна форма на градежа; каменен градеж с междини тухлени редове –*Opus vittatum mixtum;* кръстосани ъглови камъни - *Quoins*; комбинирана зидария – ъгли, изградени от тухли, свързани с каменна зидария; могилен насип, служещ да абсорбира част от сеизмичните вълни. По фундамента не са открити никакви следи от повреждане дори след земетресението от 1928 г. с магнитуд 7 по Рихтер и епицентър на 12 km. В момента на труса общото натоварване върху фундамента е било 10 000 kN, а върху могилния насип – 370 000 kN.
Това е най високата запазена антична постройка в Европа и без открит до сега аналог в света като начин на изграждане. Към момента предназначението на целия комплекс не е известно, но разкопките не са приключили напълно и е възможно да се открият нови факти.

Ключови думи: могила Мал тепе Маноле, римски антиземетръсни техники.

Въведение

Могилата Мал тепе се намира до югоизточния край на село Маноле и преди започване на разкопките е с първоначални размери: диаметър изток–запад – 125 m; диаметър север–юг – 130 m; височина – 21 m в профил изток–запад и 18,5 m в профил север–юг и обем на могилния насип 75 000 m^3. На върха е имало изкоп с размери 5x3,5 m като се предполага, че реалната височина преди направата на изкопа е била 26 m.

Археологическите разкопки се провеждат през периода 2016 – 2020 г. под ръководството на доц. д-р К. Кисьов, директор на РАМ Пловдив. Същите не са приключили и са временно спрени поради липса на финансиране.

В централната част на могилния насип се разкрива южната стена на каменно съоръжение с трапецовидна форма, съставена от четири секции, разделени с по три реда тухли. Трите долни сектора са изградени от ломени варовикови камъни, споени с бял хоросан. А най-горната част е с по-сложна форма на градежа и с размери 6,2x6,2 m, като в низходящ ред всяка секция се увеличава средно с 0,35 m във всички посоки. Основата е с размер 8x8 m. От намерените по време на разкопките мраморни квадри и капител, се стига до извода, че на върха е имало изградена постройка с колонада и долната ѝ част е служела за фундамент. Изграждането е станало през средата на III век, като по това време районът е част от провинция Тракия на Римската империя.



Фиг.1. Карта с повърхностните разломявания от земетресенията през 1928 (Бончев и Бакалов 1928) и местоположението на могилата Мал тепе (Тодоров)

Обектът се намира в зона със изключително висок сеизмичен риск (хазарт) с референтно ускорение 0,32-0,4g и е в непосредствена близост до двата разлома Чирпанския и Поповишкия. По самото съоръжение освен повредите от иманярска дейност не се откриват никакви следи от тектонични въздействия. През 1928г. са регистрирани 2 земетресения за кратък период като второто е с епицентър

на 12 км на югоизток до с. Поповица и е със сила М7 по Рихтер. Именно тези факти станаха причина да се направи по задълбочено проучване на начина на изграждане на съоръжението и по-специално на използваните от римляните антиземетръсни техники.

Строителството в Римската империя

Римската държава през различните периоди на своето развитие и разширяване е била ангажирана с изграждането на огромна инфраструктура – пътища, градове, виадукти, стадиони, театри, представителни сгради, защитни съоръжения и др. За качеството на строителството може да се съди по многобройните запазени и до днес археологически обекти, някои от които в почти непроменен вид хиляди години след изграждането им.

Една от причините въобще за просъществуването под една или друга форма на римската цивилизация в продължение на 2000 години е въвеждането и стриктното спазване на правила и норми за всички аспекти на живота, включително и в строителството.

„Дванадесетте таблици“ (Lex Duodecim Tabularum) са първият писмен законов кодекс на Римската република, съставен през V в. пр. н. е. (около 451–450 г. пр. н. е.).Освен всичко останало, той съдържа и основни правила за собственост, граници между имоти, отстояния между сгради и право на строеж.

Градските власти и магистрати като претори и едили (*urban magistrates*) издавали укази и регулации за строеж, пожарна безопасност и ред.

Много норми са били неписани, но строго прилагани от майстори, архитекти и инженери. Имало е професионални гилдии (*collegia fabrorum*), които предавали знания и следели за качеството на градежа.

Най-важният оцелял източник за архитектурна теория и практика в Рим е „De Architectura“ (За архитектурата), написан от Марк Витрувий Полион (I в. пр.н.е.).

Състои се от 10 книги, посветени на архитектура, строителни технологии, пропорции, материали и дори акведукти. Там много подробно са описани изискванията към обществените сгради, храмове, жилища, театри; правилата за ориентация на сгради, устойчивост, вентилация и др.; строителните материали: тухли, бетон, дърво, камък; правила и пропорции за хармония, стабилност, полезност (*firmitas, utilitas, venustas*).

Римски строителни техники

Римските методи на градеж (*Opus*) и използваните строителни материали, дори и когато не са прилагани в земетръсни райони, като качество и изпълнение са осигурявали висока здравина и устойчивост на сградите. Но въпреки това е имало и такива, специално предвидени да издържат на земетресения, като осигурят стабилност на сградите. По надолу са изброени някой от тях:

• *Opus caementicium* (римски бетон) – смес от вулканична пепел (пуцолан), вар и вода (Adam,1994). Изключително здрава строителна смес. Използва се при строителството на всякакъв вид сгради. Втвърдява се и под вода и затова се е използвал и за строеж на пристанища (Brandon, 2014). За разлика от съвременния цимент, не променя якостните си свойства дори и след хиляди години.

+Антиземетръсни свойства: много устойчив при земетресения. Поема вибрации, без да се разрушава, особено в комбинация с тухлени или каменни градежи.

• *Opus latericium* (тухлен градеж) – зидане с плоски римски тухли (lateres). За спойка се използва хоросан или римски цимент.

+Антиземетръсни свойства: добра еластичност и здравина.

• *Opus incertum* – римската строителна техника, при която се използват само камъни и хоросан, като камъните са неоформени или слабо оформени и без подредба.

+Антиземетръсни свойства: добра устойчивост за масивни стени, сравнително стабилна при земетресения.

• *Opus vittatum* (редуване на тухла и камък) – редове от каменни блокчета, редувани с тухлени ивици. Масово използван в провинциите Северна Африка и на Балканите.

+Антиземетръсни свойства: подобрява гъвкавостта и стабилността при хоризонтално напрежение (като при трус).

• *Opus mixtum* (смесен градеж) – комбинация от тухли, бетон и понякога камък. Използван особено в късно римската епоха (John, 1992).

+Антиземетръсни свойства: изключително ефективен – твърд и гъвкав едновременно. Позволява високи и стабилни конструкции.

• Суха зидария (dry stone masonry) – камъните се нареждат без хоросан или цимент между тях. Стабилността се постига чрез тегло, форма и точно прилягане.

+Антиземетръсни свойства: камъните могат леко да се разместят без да се напукат – абсорбират трусове.

• Изодомен и псевдоизодомен градеж (ἰσόδομος) – това са гръцки техники, използвани масово и в римското строителство (Carmelo, 2010). Става въпрос за зидария, при която каменните блокове се редят в абсолютно хоризонтални, равномерни редове, с еднаква височина при изодомния и с различна височина за всеки ред при псевдоизодомния. Камъните са обработени съвсем гладко и прилягат плътно един до друг без да се използва вар или цимент за спойка. Свързването става като върху съседните камъни се издълбават специални жлебове или канали и в тях се поставя метална скоба с форма на „лястовича опашка“, най-често от желязо или бронз. Скобата се залива с разтопено олово, което не позволява корозия и в същото време стабилизира връзката. Свързването става във вертикална и хоризонтална посока.

+Антиземетръсни свойства: Изключителна стабилна връзка, доброто сцепление между камъните не позволява хоризонтално припълзяване. Оловото е пластично при смачкване и позволява известно разместване без да допусне разрушаване на конструкцията.

• Ъглов зидарски градеж (*Quoins*) – специално оформени камъни, използвани в ъглите на сгради, които изпълняват както структурна, така и естетическа функция. Използват се по-големи здрави и добре обработени камъни, като често се редуват вертикално: дълъг – къс – дълъг, за по-добро свързване с останалата зидария.

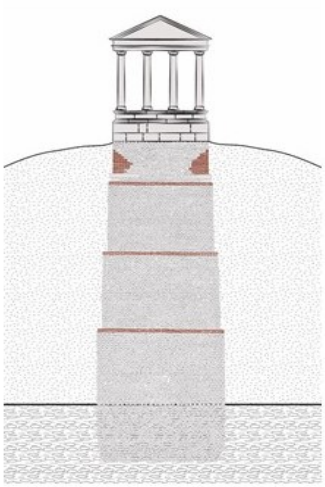
+Антиземетръсни свойства: Осигуряват здравина на ъглите, където напрежението при земетресение е най-голямо. Свързват двете перпендикулярни стени и предотвратяват отваряне при трус. Помагат за абсорбиране на вибрации и предпазват ъглите от разрушаване.

Характеристики на съоръжението в могилата Мал тепе

Откритото при разкопките в могилата Мал тепе съоръжение представлява каменна постройка с форма на пресечена пирамида (Фиг. 2), която по всяка вероятност е служела за фундамент на намиращата се на върха култова постройка (Фиг. 3). Фундаментът е разположен в средата на могилен насип и е изграден от варовикови камъни, добити от антична кариера до близкото село Шишманци, а постройката от мрамори е с частично изяснен произход (Тодоров, 2021).

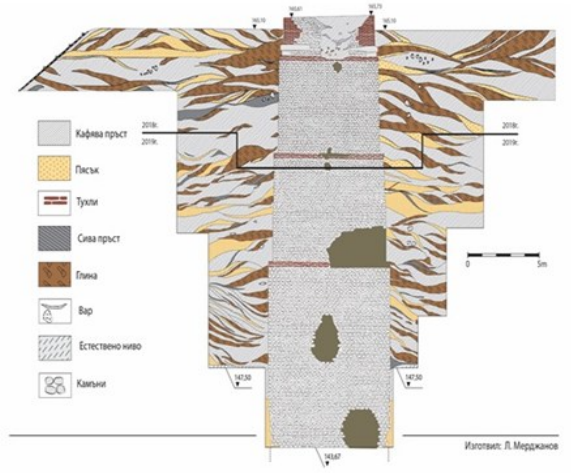


Фиг. 2. Фундаментът в могилата Мал тепе в по време на разкопките (Кисьов и Мерджанов, 2020)

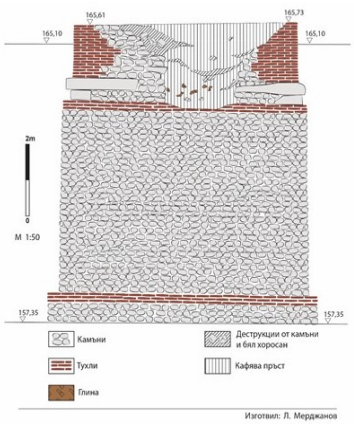


Фиг. 3. Възстановка на първоначалния вид на съоръжението (Кисьов и Мерджанов, 2020)

По време на разкопките се установява, че изграждането е ставало паралелно с издигане и на могилния насип. В близост до съоръжението през около 1,5-2 метра се откриват парчета от обработка на камъните и варници с остатъци от хоросан, а в горната част – въглени и парчета олово (Кисьов и Мерджанов, 2020). Основната част е изградена от хоризонтални редове варовикови камъни, споени с бял хоросан. Част от постройката (около 4,20 метра) е вкопана под нивото на терена. Горните 2 метра са в почвата, която в района е алувиално-пролувиална, а надолу продължава пясъчен слой, по всяка вероятност с дебелина повече от 3 метра, за който не може да се установи дали е естествен за мястото или изкуствено насипан (по-скоро второто). Но и в двата случая той играе роля на пясъчна възглавница. Каменният градеж (*Opus incertum*) е разделен на три почти еднакви части от слоеве с по 3 реда тухли с размери 30x30x6 cm с обща дебелина на слоя 30 cm. След всеки ред тухли размерът на каменния градеж намалява в посока върха от всички страни с 20 cm, което придава на съоръжението форма на пресечена пирамида (Фиг. 4). След най-горния ред тухли градежът променя своя вид (Фиг. 5). В четирите ъгъла има поставени кръстосано по 2 сиенитни камъка с приблизителни размери 2,20x50x30 cm. Върху тях градежът в ъглите е от тухли, споени с бял хоросан, а в средата – с варовикови камъни, споени също с бял хоросан. След този слой е започвала постройката (Фиг. 3), изградена от мраморни квадри, свързани помежду си с метални скоби поставени в изкопани за целта канали, запълнени с олово. Дебелината на основата на постройката е била около 2 метра, плътно запълнена с мраморни блокове и върху тях е имало колони от дорийски тип с височина 4 метра. За покрива няма никакви сведения от какво е бил изработен.



Фиг. 4. Чертежи на фундаментът в могилата Мал тепе (Кисьов и Мерджанов, 2020)



Фиг. 5. Чертежи на горната част на фундаментът (Кисьов и Мерджанов, 2020

Градежът на фундамента е изключително прецизно изпълнен, независимо, че въобще не е можел да се види след засипването му с могилния насип. Това от своя страна говори за строго спазване на строителните стандарти от онова време.

В същото време тук са използвани почти всички римски строителни техники като целта е съоръжението да бъде устойчиво на сеизмично влияние. Едва ли всички тези мерки са взети случайно. Дали фактът, че районът е с повишен сеизмичен риск е бил известен на хората, проектирали и построили съоръжението, не е ясно, но като се има предвид изпълнението, по-скоро това е така.

Подземна част

Причината за изграждането и предназначението на обекта засега още не са установени напълно достоверно. Мястото на изграждането е доста неподходящо от гледна точка на геоложката среда. Плейстоценските алувиално пролувиални наслаги, от които е съставен терена, по принцип не осигуряват добра земна устойчивост. В същото време на около 250 метра на изток тече река Черна и нивото на подпочвените води е високо (по време на разкопките беше нужно отводняване с помпа). А влажните, водонаситени алувиални почви са склонни към втечняване (liquefaction) при земетресение. И дори в съвременното строителство изискват специално фундиране на сградите, като се предпочита използване дълбоки пилоти от 15-20 метра. Другият възможен вариант е използването на фундаментни плочи за разпределяне на натиска.

Този подход е приет и тук. Ширината на основата е 8,20x8,20 m а площта 68 m^2.

В случая натиска върху почвата е (1) :

$$б = \frac{3300000kg}{68m^2} = 48{,}529.4 kg/m^2 \approx 475 kPa \quad (1)$$

Товароносимостта на алувиалните почви е в границите на 150-250 kPa като при специална обработка може да достигне до 300 kPa, но това е доста далече от горе изчисленото и ще предизвика слягане и потъване на съоръжението от собствената маса, дори и без външно въздействие. Но в случая пясъчната възглавница с дебелина 3 и повече метра може да поеме натоварване от 450-500 kPa, което както е видно е било достатъчно.

Това ни дава пълно основание да предположим че използването на пясъчна възглавница е съвсем целенасочено и напълно оправдано.

Каменен градеж

Пирамидалната форма на съоръжението има няколко предимства:

- По-нисък център на тежестта

Формата концентрира повече маса в долната част, което повишава устойчивостта срещу преобръщане и намалява риска от нестабилност при хоризонтални сили.

- По-добро разпределение на напреженията

Натоварването естествено се разпределя надолу по наклона, като намалява хоризонталното натоварване върху основата. В същото време намалява и концентрираните напрежения, което това повишава устойчивостта на материала към напукване

- Значително по-добро поведение при земетресения

По малката маса в горната част намалява големината на инерционните моменти, като формата ѝ „се съпротивлява“ на клатене и има по-нисък собствен период на трептене, което намалява риска от резонанс с сеизмичните вълни.

Поясите от тухли (*Opus latericium*), които разделят градежа на три почти равни сектора в частта му над кота терен също играят съществена роля. Макар и реално да са по леки от камъните, те не отслабват конструкцията, а напротив, те я правят по-гъвкава и устойчива при динамично натоварване, като оказват следното влияние върху сеизмичната устойчивост:

- Работят като хоризонтални диафрагми, които увеличават якостта на срязване и стабилизират зидарията, като прекъсват твърдата каменна маса и създават зони, които ограничават разпространението на пукнатини при динамично натоварване.
- Подобряват гъвкавостта на сградата, като я правят по-малко крехка и по-устойчива на внезапни разместванията. В същото време осигуряват геометрична стабилност чрез каскадно намаляваща се форма, което повишава демпфирането и намалява резонансния риск. И на последно място водят по-равномерно разпределение на напреженията по височината на конструкцията.

Горна част

След последния пояс от тухли преди постройката има изградена секция (Фиг. 3 и Фиг. 6), по всяка вероятност с първоначална височина от 3,5-3,8 метра, служеща за антиземетръсен депмфер.



Фиг. 6 Горната част на фундамента в Мал тепе (сн. Тодор Тодоров, 2020 г.)

В ъглите на долната част на тази структура са поставени кръстосано по два сиенитни камъка с приблизително еднакви размери 220x50x30 cm и маса от около един тон всеки.

Те са поставени в зоната на най високо напрежение и леко излизат навън от равнината на тухления градеж – типично за ъглови укрепващи камъни (*Quoins*) .

Камъните осигуряват стабилна основа, която трудно се разклаща, като укрепват връзката между две перпендикулярни стени и намаляват риска ъгълът да се разтвори при хоризонтално разклащане.

Над тях градежът продължава с тухли в ъглите и камъни в средата (*Opus mixtum*). Същата техника е използвана в Помпей и е била с предназначение да предпазва повреждането на сградите от земетресения (Ruggieri, 2017).

Постройка

По време на разкопките са открити 30 броя мраморни квадри и няколко капителa от дорийски тип. Това позволява да бъде извършена хипотетична възстановка на сградата (Фиг. 3), която е с предполагаемо височина около 6,50 метра.



Фиг. 7. Квадра с фриз и канал за скоба в горната лява част (сн. Тодор Тодоров 2020 г.)

Постройката е била единствената част от съоръжението, която се е виждала и не е била защитена от могилния насип. Долната ѝ част е била изградена от мраморни квадри по псевдоизодомния начин на градеж. В откритите квадри има изработени канали (Фиг. 7), а при разкопките около тях се откриват оловни и железни части, използвани за свързването им (Кисьов и Мерджанов, 2020). Не се открити доказателства как точно постройката е била свързана с фундамента, но по всяка вероятност е било със железни скоби.

Около 80% от цялата маса на сградата (около 300 тона) е била съсредоточена в долната част, което е служело като своеобразна котва и заедно с метода на градеж я е правила устойчива на земетресения. По всяка вероятност на по-висок риск е била изложена колонадата и покрива, но те са несъществена част и лесно биха могли да бъдат ремонтирани при повреда.

Устойчивост на сеизмично въздействие

Съгласно данните от земетресението от 1928 г. до Поповица, могилният насип и съоръжението са били подложени на PGA - 0.3g, а максималното регистрирано за района е PGA - 0.32g. Макар и разрушена през древността, сградата е била част от конструкцията и затова ще се направят изчисления с нея, като целта е да се провери първоначалната устойчивост на целия комплекс.

Инерционно въздействие

В случай на максимално ускорение, върху фундамента със сградата и насипа са действали следните инерционни сили (2):

F=m.a при M7 PGA-0.32g g = 3.14 m/s²
Fсграда =3 300 000·3.14=10362000N (≈10.36MN)
Fнасип =120 000 000·3.14=376800000N (≈376.8MN)
Общо:
387,162,000 N≈ 387.2 MN (2)

Оттук могат да се направят следните заключения:

1. Могилният насип поема около 97.3% от инерционните сили, защото е с много по голяма маса.
2. При земетресение, най-голямата част от хоризонталната сила действа върху насипа, а не директно върху основата на сградата. Това намалява риска от хлъзгане или преобръщане на каменната сграда.

Устойчивост на приплъзване

Тегло на сградата: W=m.g=3 300 000.9,81=32 373 000 N
Сила на триене :
Fтриене = μ·W=0,6.32 373 000=19 423 800 N (≈19,42MN)
Коефициент на триене между камък и сух пясък μ = 0,6
Заключение:
Fсграда < Fтриене =10.36MN<19,42MN
Сградата е устойчива срещу приплъзване.

Устойчивост на преобръщане

Ширина на основата: 8,2 m
Лостово рамо на тежестта: 8,2 / 2 = 4,1 m
Лостово рамо на инерционната сила: 24 / 2 = 12 m
Момент на задържане (от тежестта):
Мтежест=32 373 000.4,1=132 729 300 Nm
Момент на преобръщане (от инерцията):
Минерция=10 362 000.12=124 344 000 Nm
Заключение:
Мтежест> Минерция . 132 729 300 Nm >124 344 000 Nm
Сградата е устойчива срещу преобръщане.

Оценка на собствена честота и резонанс

Емпирична формула: T = C × H, с C ≈ 0.025
Височина на сградата: H = 24 m
T = 0.025 × 24 = 0.6 секунди (период на трептене)
Земетресения от магнитуд 7 обикновено имат периоди между 0.6 – 1.5 s
Частично съвпадение, но не критичен резонанс.

Заключение

Макар и недокрай археологически проучена, могилата Мал тепе до село Маноле е един уникален комплекс без аналог в света. Въпреки, че в исторически план почти нищо не е известно – кой точно кога и защо я е построил, в случая ние разглеждаме съоръжението единствено като технически и архитектурно творение, завещано ни от предците.

Относно периода на изграждане, по всичко личи, че е станало при римското управление на провинция Тракия между края на I и средата на III в. сл. н. е.

Относно мястото – намира се на около 50 метра от трасето на един от най важните римски пътища Via Diagonalis. В близост има следи от антично селище, а на около 3 километра на изток има останки от голямо римско поземлено владение.

По права линия е на около 17 км от античния Филипопол, което при ясно време е позволявало постройката на върха да се вижда от там.

Относно повода, по време на разкопките се смениха няколко предположения без реално доказателства до сега: от гробница на тракийски цар, до такава на император Филип I Арап, храм и т.н. Независимо от истинската причина, изграждането на такова фундаментално съоръжение би могло да е в чест на личност, събитие или божество и по никакъв начин не може да се случи без разрешение от централната римска власт. Странното е, че въпреки мястото му до толкова използван път и размерите му, няма никакви писмени сведения за него, открити до сега.

Относно техническото изпълнение. Изграждането на такова съоръжение би било предизвикателство и днес. Финансирането, проектирането и изпълнението говорят за хора с големи финансови възможности и влияние в тогавашното общество.

Мястото на изграждането е изключително неподходящо от геоложка и сеизмоложка гледни точки. Въпреки това проектирането и изпълнението са перфектни.

Прилагането на почти всички познати антисеизмични римски методи на градеж и особено фундирането на основата с пясъчна възглавница е всичко друго, но не и случайно. От една, страна това говори за познаване на опасностите от силни земетресения в района. А от друга, това е ярко доказателство за възможностите на тогавашните архитекти.

Явно при проектирането целта е била постройката по една или друга причина да се издига на определена височина. Изграждането само на каменна кула при тази височина би било сериозно предизвикателство, за да е стабилна на преобръщане при земетресение, би трябвало да е с доста по масивна и широка основа. Проблем ще е и самото строителство и последващо обслужване на постройката на върха. Поставянето на съоръжението в центъра на могилния насип решава всички тези въпроси по един доста евтин и ефективен начин.

В заключение може да се каже, че е необходимо при продължаване на разкопките да се извършат и друг вид проучвания – геоложки и хидрогеоложки.

Независимо какво ще се открие по нататък, това съоръжение само по себе е без аналог и по-обстойното му изучаване може да даде отговори и на други неизяснени въпроси относно римските строителни практики.

В същото време след проучването и реставрацията на могилния насип и сградата, те заедно с изградения от Община Марица в непосредствена близост „Културно информационен център Мал тепе“ могат да се превърнат в туристическа атракция от световно равнище.

Литература

Бончев, С., Бакалов, П. (1928). Земетресенията в Южна България на 14 и 18 април 1928 год. – Списание на Българското геоложко дружество, 1, 2, 51-63. София.

Кисьов, К., Мерджанов, Л. (2020). Археологически разкопки на могила „Мал тепе” III в. до с. Маноле, общ. Марица, обл. Пловдив АОР през 2019 НАИМ БАН София.

Мардиросян, Г., (2020). Природни бедствия и екологични катастрофи – изучаване, превенция, защита. София, Изд. БАН „Проф. Марин Дринов“.

Рангелов, Б. (2012). Разгневената земя: Природните бедствия. София, Изд. БАН „Проф. Марин Дринов“.

Тодоров, Т. (2021). Минерал-петрографско изследване на мрамори и варовици от могилата Мал тепе в Маноле. Дипломна работа за придобиване на образователно квалификационна степен „Магистър“, ПУ „Паисий Хилендарски“, ФИФ, катедра „История и археология“

ЕВРОКОД 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. EN 1998-1:2004, което е част от БДС EN 1998-1:2004.

НАРЕДБА № РД-02-20-2 от 27 януари 2012 г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони. (Обн., ДВ, бр. 13 от 2012 г).

Adam, J. (1994). Roman building: materials and techniques (trans. Anthony Matthews) (Bloomington: Indiana University Press.

Bonchev S. and P. Bakalov (1928). Les seismes du Sud de Bulgarie, *Revue de Societe geologique de Bulgarie, 1*, No 2, pp. 8- 21, Sofia. (in French and in Bulgarian).

Brandon, C. (2014). Building for eternity: the history and technology of Roman concrete engineering in the sea. Oxford: Oxbow.

Carmelo, G. (2010). Constructing the Ancient world: architectural techniques of the Greeks and Romans (Los Angeles: J. Paul Getty Museum.

John, B. (1992). Roman Imperial Architecture (New Haven: Yale University Press.

Ruggieri, N. (2017). Seismic Protection in Pompeii during the Age of Nero and Vespasian. *Journal of Architectural Engineering Vol. 23*(Issue 4), August 2017.

GEOPHYSICAL EVALUATION OF WATER DRAINAGE AND CONTAINMENT IN A MINE WASTE STORAGE FACILITY: A COMPARATIVE ERT STUDY

Maya Tomova, Atanas Kisyov

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

ABSTRACT. Mine waste storage facilities pose significant environmental challenges due to the potential for water infiltration, contamination, and structural instability. Effective monitoring of these facilities is crucial to prevent environmental degradation, optimise waste management, and ensure regulatory compliance. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is a widely used geophysical technique for assessing the subsurface conditions, as well as those in mine waste storage facilities, providing valuable insights into water movement, waste containment integrity, and potential failure risks. By deploying an array of electrodes along the surface, ERT generates 2D resistivity profiles that reveal subsurface heterogeneities, which is crucial for making informed decisions about drainage efficiency and waste stability.

Key words: electrical resistivity tomography (ERT), mine waste, drainage.

ГЕОФИЗИЧНА ОЦЕНКА НА ДРЕНАЖА И ЗАДЪРЖАНЕТО НА ВОДА В СЪОРЪЖЕНИЕ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА МИННИ ОТПАДЪЦИ: СРАВНИТЕЛНО ПРОУЧВАНЕ ПО МЕТОДА НА ЕЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ

Мая Томова, Атанас Кисьов

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

РЕЗЮМЕ. Съоръженията за съхранение на минни отпадъци могат да поставят значителни екологични предизвикателства поради възможността за дрениране на замърсени води и структурна нестабилност. Ефективното наблюдение на тези съоръжения е от решаващо значение за предотвратяване екологичните рискове, оптимизиране на управлението на отпадъците и осигуряване на съответствие с нормативните изисквания. Електротомографията (ERT) е широко използван геофизичен метод за оценка на подповърхностните условия, а също и на съоръжения за съхранение на минни отпадъци, предоставяща ценна информация за наличието на оводнени участъци, целостта на съоръжението и потенциалните рискове от повреда. Чрез разполагане на електроди по повърхността, методът на електротомографията предоставя 2D профили на разпределението на електричното съпротивление, които разкриват подповърхностни особености на разреза, което е от решаващо значение за вземане на информирани решения относно ефективността и стабилността на съоръженията.

Ключови думи: Електротомография, минни отпадъци, дренаж.

Introduction

At the current stage, complex geophysical surveys are an essential component of the modern mining industry. In open-pit mining conditions, various challenges often arise that, in some cases, can lead to unforeseen delays or even disrupt the effective operation of a mine. In such situations, the prompt and timely resolution of issues is critical for maintaining the work process and ensuring a safe and healthy working environment.

Over the years, many authors have studied the impact, storage methods, types of tailings, and consequences of mining waste. Tailings consolidation is a critical step in mining waste management. Tailings are a byproduct of mining and mineral processing operations, and they are typically composed of finely ground rock particles, water, and reagents used in the mineral processing. The tailings disposal is a significant environmental and safety concern, as unconsolidated or unstable tailings can result in catastrophic failures and environmental damage (Yankova, 2021; Dimitrov et al., 2023a). Potential problems related to tailings facilities stability are a matter of concern, especially where structural failure might endanger nearby communities and the environment (Arcila et al., 2021). Many experts contend that the tailings storage has always been one of the major chalenges, considering that these facilities are difficult to construct and operate (Dimitrov et al., 2023b). A review of the literature on this topic (Lyu et al., 2019) found that there are approximately 3500 tailings storage facilities in the world, of which about 3 fail in a year.

The following research is performed in the Integrated Mine Waste Storage Facility (IMWSF) in the town of Krumovgrad. It is a complex infrastructure designed to safely store waste generated by mining activities. The facility is developed with a focus on minimising the negative environmental impacts associated with the storage and processing of mine waste. One of the key advantages of this type of mining waste storage facility is the ability to carry out parallel reclamation of different sections, even during the ongoing disposal of tailings (Tomova and Kisyov, 2024).

With the growing scientific and regulatory demands for continuous monitoring of geological and geotechnical processes—such as waste storage, deep excavations, and water resources—electrical resistivity tomography is increasingly being utilised for the timely and efficient tracking of subsurface processes and structural changes in the investigated section. As noted by Kisyov (Tomova & Kisyov, 2024, the use of electrical resistivity tomography (ERT) for studying an integrated mine waste disposal facility provides a non-invasive means of imaging the internal structure of the facility's cells. This method relies on the principle of differing electrical conductivity among the materials composing each cell to generate an image of the facility's structure (Kisyov et al., 2024).

For safety issues, it is reasonable to perform regular monitoring of such facilities. To optimise the design, construction, operation, and eventual closure of a facility, it is essential to consider the specific characteristics of each site—such as its location, disposal methods, management strategies, and long-term closure goals. Achieving this requires a comprehensive assessment during the site selection stage, including evaluation of foundation conditions, land use patterns, seismic risks, and hydrological factors.

Many authors state that geophysical techniques are useful, along with non-invasive, inexpensive and fast-working tools to manage a wide range of geological, engineering and

environmental problems (Hanna and Pfeiffer, 2007; Martinez-Pagán, et al., 2009). Geophysical methods are one of the main ways to collect information about the structure of the subsurface.

Electrical resistivity tomography (ERT) is a key geophysical method used to generate high-resolution images of the upper part of the Earth's crust (Xayavong et al., 2022).

Measurements are usually carried out in a strict sequence of instrument operation and along profile lines. The results are often used in mining, geology, and increasingly in engineering. Without a doubt, one of the most frequently used methods is from the group of Electrical Resistance Methods and this is its most popular modification - electrical resistivity tomography (ERT).

Description of technology

This research was conducted to identify possible flux zones in the integrated waste storage facility using DC resistivity and electrical resistivity tomography (ERT). A shallow, non-destructive geophysical technique – the Electrical Resistivity Tomography (ERT) – was used to delineate the facility cell geometry and thickness of the mine waste. This technique is largely used in such investigations.

The IMWSF is designed as a fully self-draining facility. A system of drains is integrated into the bottom of each cell, directing water into one of two tanks located at the facility's end.

In electrical resistivity tomography (ERT), the measured resistivity values reflect the electrical properties of the subsurface directly beneath the survey line. Data on the physical properties of the target objects and their surrounding environment serve as the primary basis for assessing the applicability of various geophysical methods. This makes the method particularly well-suited for monitoring water-bearing formations, which typically exhibit strong electrical contrasts relative to the surrounding materials.

The measurements were performed using a computer-controlled multielectrode system with many electrodes (96) laid out in a profile at constant intervals (Fig. 1).



Fig. 1. Equipment used in the field measurements

The data acquisition consisted of 3 ERT lines with 3 m of spacing between electrodes, using a Schlumberger array. This array is well-known for its high signal-to-noise ratio and good vertical resolution. The ERT technique provides detailed information both laterally and vertically along the profile and is the most frequently applied technique in geological and engineering studies.

The registration was carried out using Australian equipment, specifically *ZZ Universal 96-Channel Resistivity/IP Meter*. The equipment allows measuring the specific electrical resistance of the medium, and is also successfully used for measuring self and induced potentials (Fig. 2).



Fig. 2. ZZ Universal 96-Channel Resistivity/IP Meter

One of the major advantages of the equipment is its ability to display data quality in real time, enabling the operator to filter out any noise – such as background, contact, or instrument-related interference – immediately. This feature allows the operator to assess the data on-site and, if a degraded signal is detected, to take prompt action to eliminate the sources of interference, when possible.

Electrical measurements of the lines were processed in a two-stage process. In the first stage – initial data processing – anomalous values caused by environmental and some technical electrical noises were removed. Then, the corrected data was processed and interpreted by RES2DINV software (Loke, 2000; Loke, 2004). As Griffiths & Barker (1993) stated the program determines the 2D resistivity model automatically for the observed data. The 2D model used by the inversion programme consists of several rectangular blocks arranged around the data points in the pseudosection. The size and position of the blocks is automatically generated by the programme using the distribution of the data points (Edwards 1977). The root-mean-squared (RMS) error for each electrical section was obtained as a parameter showing the accuracy of the match between the measured and predicted apparent resistivity values (Ernstson and Kirsch, 2006; Acosta, et al., 2014).

ERT has allowed us to determine both the general geometry of the pond’s base and the maximum thickness of the mine tailings. In most of the case studies, the resistivity contrast between the infilling (tailings) and the bedrock is high enough to clearly define the bottom pond boundary (Gómez-Ortiz, et al., 2010). As a result, geophysical methods, such as ERT, are widely applied in the investigation of tailings dams, where effective water drainage is crucial for ensuring structural stability.

As noted by Hasan et al. (2021), the fundamental principle of electrical resistivity tomography is based on the differing electrical conductivities of the rocks composing the investigated section. The electrical conductivity of rocks is influenced by numerous factors, including rock type, porosity, permeability, pore connectivity, temperature, salinity, cation exchange capacity, clay content, and the nature of the pore-filling fluid or water (Hasan et al., 2021).

Geophysical methods, and especially electrical resistivity tomography (ERT), are characterised by high efficiency and accuracy, which allows them to be used to delineate the boundaries of highly saturated areas and, respectively, to mark areas where drainage is difficult or compromised (Xu et al., 2022).

The application of geophysical methods at various stages of construction, drainage, consolidation, and dewatering of the cells in the facility enhances the overall understanding of the facility's operations. This enables informed and timely actions to be taken when necessary.

The constructed electrical resistivity model is modified and adapted to reflect the distribution conditions of the subsurface media specific to the study area. This adaptation is based on:

- general information about the lithology, tectonic, and hydrogeological conditions in the study area.
- data on the specific electrical resistivity of different rock types.
- exploratory drilling data, if available.

Field works are performed with 3 ERT lines measured on the North valley. Their length and descriptions are presented in Table 1.

Table 1. *Description and length of the lines*

Number	Name	Length, m
1	ERT - 1	285
2	ERT - 2	285
3	ERT - 3	285

Fig.3 presents terrain view of the measured lines. They extend from the top almost to the bottom of the facility.

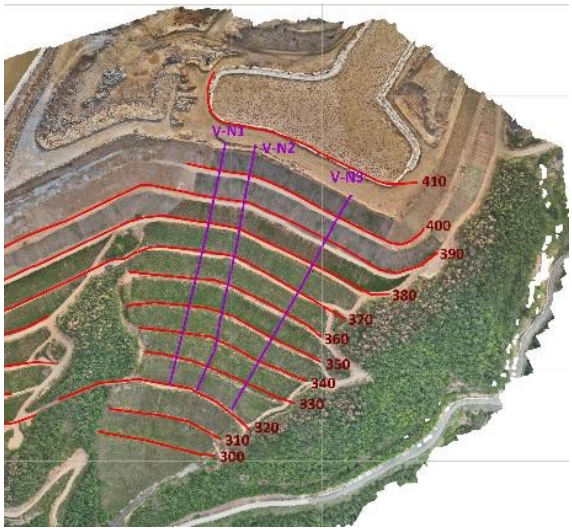


Fig. 3. Terrain distribution of ERT lines

Results and analysis

Results from the terrain measurements are presented as ERT lines which present electrical resistivity distribution along the line.

Variations in electrical resistivity typically correlate with changes in lithology, water saturation, fluid conductivity, porosity, and permeability. These correlations allow the method to be effectively used for mapping geological structures, fractures, groundwater bodies, and features, such as tailings dam walls. The aim of this research is to determine the spatial distribution and delineation of areas with increased water saturation due to incomplete drainage of the deposited tailing material.

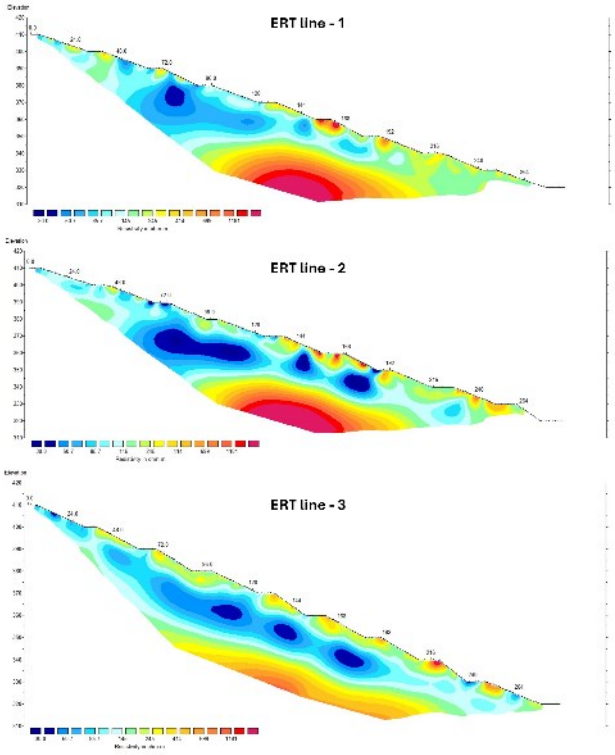


Fig. 4. ERT lines

The obtained ERT profiles (Fig. 4) enabled us to estimate both the vertical variations in the thickness of the mine facility infill and the lateral heterogeneity of the tailing materials, as inferred from the observed changes in resistivity values.

In the majority of the measured geoelectrical sections, the electrical resistivity distribution exhibits a well-defined and smoothly varying character.

The strong resistivity contrast between the tailings and the bedrock is high enough to clearly define the bottom cell boundary. Zones indicating the spatial distribution of environments with increased water saturation — resulting from incomplete drainage of the deposited material — are characterised by relatively low electrical resistivity values across all profiles, typically ranging from 30 to approximately 150 Ωm.

On ERT line - 1, two distinct zones are observed. In the lower part of the profile, near the starting site, significant drying of the terrain is evident, accompanied by relatively high electrical resistivity values. In contrast, the upper part of the profile, exhibits low electrical resistivity values, indicating weak consolidation of the deposited material.

ERT line - 2 is in the central part of the northern slope of the Integrated mine waste facility. As observed, the lower part of the profile, near the starting site, shows significantly higher electrical resistivity values compared to the upper part of the profile, where the newly constructed cells are situated.

ERT line - 3 displays a smooth distribution of the electrical resistivity. The basement is clearly delineated, and the deposited material shows signs of consolidation.

According to the geoelectrical sections obtained in terms of the degree of drainage and respective consolidation of the deposited material, the facility can be divided into 3 main zones: starting areas, middle part, and upper part.

- The *starting areas* of the facility are characterised by distinctly elevated electrical resistivity values, suggesting that the drainage and drying processes in these locations are progressing sufficiently well. The starting site of the North valley currently represents the best-drained areas, where a distinct process of consolidation of the deposited materials has begun.
- The *middle zone* is characterised by effective drainage and a gradual increase in electrical resistivity, which indicates the progressive consolidation of the deposited material.
- The *upper part* of the facility represents the most recently constructed cells, which are typically the most saturated, with the lowest degree of drainage. In this area, the electrical resistivity values are predominantly low, suggesting that the terrain remains poorly consolidated and highly saturated. The bottom and walls of these cells are nearly impossible to trace due to the extent of waterlogging.

Conclusions

The extraction and processing of raw materials inevitably generate significant amounts of waste. Effective and safe storage of mining waste is a critical aspect of the mining industry, forming an essential component of socially responsible practices and a company's commitment to sustainable development. Consequently, the development and implementation of innovative methods for the storage, processing, and monitoring of mining waste are crucial. This process underscores the importance of collaboration with regulators, society, and the scientific community to uphold the highest standards of safety and sustainability. At present, non-invasive and advanced techniques enable monitoring of tailings ponds over time, ensuring the ability to respond promptly, maintain safety, and promote sustainability. These practices are vital for environmental protection, safeguarding human health, and maintaining long-term sustainability in the industry. This kind of studies allows an analysis, long-term monitoring, and assessment of the structural stability and pollution risk.

References

Acosta, J.A., Martínez-Pagán, P., Martínez-Martínez, S., Faz, A., Zornoza, R., Carmona, D.M. (2014). Assessment of environmental risk of reclaimed mining ponds using geophysics and geochemical techniques, *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 147, Part B, 80-90, ISSN 0375-6742, https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.005.

Arcila, E.J.A., Moreira, C.A., Camarero, P.L. (2021). Identification of Flow Zones Inside and at the Base of a Uranium Mine Tailings Dam Using Geophysics. *Mine Water Environ 40*, 308–319. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00746-y

Dimitrov, L., Grigorova, I. (2023a). Improved Tailings Consolidation Using Dewatering Agents: A Step towards Safer and Sustainable Mining Waste Management. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 23, 225-231. https://doi.org/10.55549/epstem.1365798

Dimitrov, L., Grigorova, I., Yankova, T. (2023b). Possibilities to Construct Combined Mine Waste Dump Facility with Better Operational Sequence, Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics, Vol. 23, 6 July 2023 - 9 July 2023, International Conference on Research in Engineering, Technology and Science, Budapest, 42 - 49, https://doi.org/10.55549/epstem.1357604

Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced polarisation. *Geophysics*, *42*, 1020-1036.

Ernstson, K., Kirsch, R. (2006). Geoelectrical methods, Groundwater, Geophysics, Springer, 85-117.

Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., De Ignacio-San José, C., Lillo, J. (2010). Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Near Surf. Geophys*. *8*, 65–74.

Griffiths, D.H., Barker, R.D. (1993). Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modeling in areas of Complex Geology. *Journal of Applied Geophysics, (29)*, 211-226.

Hanna, K., Pfeiffer, J. (2007). Geophysical technologies to image old mine works, SAGEEP, 20 (1), 1527-1537.

Hasan, F., Abuel-Naga, H., Leong, E.-C. (2021). A modified series parallel electrical resistivity model of saturated sand/clay mixture, *Engineering Geology*, *290*, 106193, ISSN 0013-7952, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106193.

Kisyov, A., Tomova, M., Koprev, I. (2025). Geophysical Methods for Optimizing Mining Waste Management. In: Dobrinkova, N., Fidanova, S. (Eds.). Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024). EnviroRISKs 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 883. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74707-6_22

Loke, M.H. (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys, pp.61.

Loke, M.H. (2004). RES2DINV Software Geotomo Software Company.

Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., & Cao, J. (2019). A comprehensive review on reasons for tailings dam failiures based on case history. Advances in Civil Engineering, 1-18. Article ID 4159306, https://doi.org/10.1155/2019/4159306

Martinez-Pagán, P., Cano, A.F., Aracil, E., Arocena, J.M. (2009). Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of southeast Spain, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, *14* (2), pp. 63-76, doi: 10.2113/JEEG14.2.63

Tomova, M. & Kisyov, A. (2024). Geophysical monitoring for stability assessment of integrated mine waste storage facility. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 29, 22-27.

Xayavong, V., Vu, M., Nguyen, D., Tuan, V., Chung, D., Pham, L., Mohammed, A. (2022). Application of the Electrical Resistivity Tomography and Seismic Refraction Methods for Groundwater Investigation in Savannakhet Province, Laos. – *Frontiers in Scientific Research and Technology, 3*, 62-69, https://doi.org/10.21608/fsrt.2021.105000.1052

Xu, Z., Tong, J., Hu, B. X., Yan, Z. (2022). Mapping and monitoring seasonal and tidal effects on the salt-freshwater interface using electrical resistivity tomography techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (276), 108051, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108051

Yankova, T. (2021). Mining damaged landscape reclamation study. XXI International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, 2(1.1), Albena, Bulgaria. 383-390.

GEOPHYSICAL APPROACH FOR GROUNDWATER EXPLORATION IN THE PETRICH REGION: A CASE STUDY

Dimitar Tudzharov, Zuzana Karakasheva

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

ABSTRACT. In regions where access to fresh water is compromised, groundwater exploration is only option for the community. The Petrich region, and specifically the village of Mahalata in the Strumyani Municipality, faces a growing challenge in securing reliable and affordable water for domestic use. As part of a sustainable solution, an electrical resistivity tomography study was conducted to identify potential groundwater deposits. This investigation aims to explore rainwater drainage patterns and identify optimal drilling locations for groundwater wells. The aim of the current study is to identify fracture and fault zones where rainwater infiltration can contribute to aquifers.

Key words: Electrical resistivity tomography (ERT), groundwater, geophysics.

ГЕОФИЗИЧЕН ПОДХОД ЗА ПРОУЧВАНЕ НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ В РАЙОНА НА ПЕТРИЧ: ПРАКТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ

Димитър Туджаров, Зузана Каракашева

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

РЕЗЮМЕ. В региони, където има ограничен достъпът до прясна вода, изследването на подпочвените води е единствената възможност за осигуряване на битовите нужди. Село Махалата в община Струмяни е изправено пред нарастващо предизвикателство за осигуряване на надеждна и достъпна вода за битови нужди. Като част от устойчиво решение беше проведено изследване на електротомография, за да се идентифицират потенциални зони с наличие на подземни води. Настоящето изследване има за цел да проучи зоните на дренаж на дъждовна вода и да идентифицира оптималните места за сондиране на кладенци за подпочвени води. Целта на проучването е да идентифицира зоните с напукване и разломните зони, където е възможно да се задържа подпочвена вода.

Ключови думи: Електросъпротивителна томография, подземни води, геофизика.

Introduction

Due to the absence of an affordable and consistent water supply in the village of Mahalata, residents rely on alternative sources, such as limited surface water and rainwater collection. However, these methods do not provide sufficient quantities of water for daily domestic needs. As Igwebuike and his co-workers stated (Igwebuike, et al., 2024), securing groundwater resources is paramount and required a concentrated effort. Groundwater, therefore, represents a crucial untapped resource that could offer a more sustainable solution. Geophysical methods and especially electrical resistivity tomography (ERT) are used to evaluate in non-invasive manner the best zones for accumulation groundwaters. According to Tomova (2023), electrical resistivity tomography is commonly used to solve mining and engineering issues, because it is efficient and environmentally sound. ERT was selected for this investigation due to its effectiveness in mapping subsurface features and providing actual information for observed geological section based on electrical resistivity (Dimovski, et. al., 2014, 2017a) .As Kisyov and his colleagues mentioned (Kisyov, et al. 2024), Electrical Resistivity Tomography (ERT) is a geophysical technique used to image subsurface structures and variations in electrical resistivity. It is a geophysical imaging method that utilises electrical resistivity measurements to create images of subsurface resistivity variations. The method allows identification of areas with higher likelihood of groundwater accumulation, associated with variations in rock conductivity caused by differences in moisture content and porosity.

Geological Context of the village of Mahalata and the Strumyani Municipality

The occurrence and availability of ground water in the area, is dependent on many different but closely related geologic factors, like rock type, structure, weathering, and topography (Herrick and LeGrand, 1949; Crawford and Kath, 2001, 2003; Kath et al., 2001).

One of the key factors affecting groundwater availability in igneous and metamorphic rocks is the type of rock itself. While this might appear self-evident, it is frequently underestimated in water-resource studies within crystalline rock regions. The rock type plays a crucial role in determining the depth and extent of weathering, as well as influencing the nature of water-bearing fractures and discontinuities that can develop within the bedrock.

The geology of the region is marked by a complex landscape, situated in the southwestern part of Bulgaria. It is characterised by a combination of mountainous terrain and sedimentary basins. The region lies near the Struma River valley, with surrounding mountain ranges, such as the Belasitsa and the Pirin mountains. The geology of the Strumyani Municipality and the broader southwestern Bulgarian region is characterised by a complex interplay of metamorphic rocks, faulting, and alluvial deposits.

The metamorphic rocks, like gneisses, schists, and marbles, dominate the area. These rocks are formed under high pressure and temperature conditions and have been extensively folded and faulted over geological time.

The region can be considered like seismically active due to the presence of significant fault lines. The Struma Fault is one

of the major fault systems running through the valley, contributing to the region's geological complexity and influencing groundwater movement.

Southwestern Bulgaria includes several sedimentary basins, too, formed by the accumulation of alluvial deposits, sands, gravels, and clays. These basins are important for groundwater storage and surface water drainage, making them relevant for rainwater infiltration studies. According to Casas et al. (2007), for unconsolidated sediments, the permeability is strongly related to the clay content, which can be deduced from indirect resistivity methods, like electrical imaging.

The municipality of Strumyani is situated in the Struma River Valley, a key geographical and geological feature of southwestern Bulgaria. The Struma Valley is heavily influenced by fault systems, including the Struma Fault. These faults create zones of fracturing in the underlying bedrock, which can serve as conduits for groundwater movement. The presence of these fractured zones is critical for locating groundwater reserves.

The region, shares many of the geological characteristics of the broader region. However, it also has some unique features that are important for groundwater exploration and rainwater harvesting.

The municipality sits on a basement of metamorphic rocks, including gneisses, shists, and marbles.

Figure 1 shows the exact position of the measured ERT profile. As can be observed, it crosses the main contact between the different rock types – the metamorphic gneiss and the amphibolite gneiss.

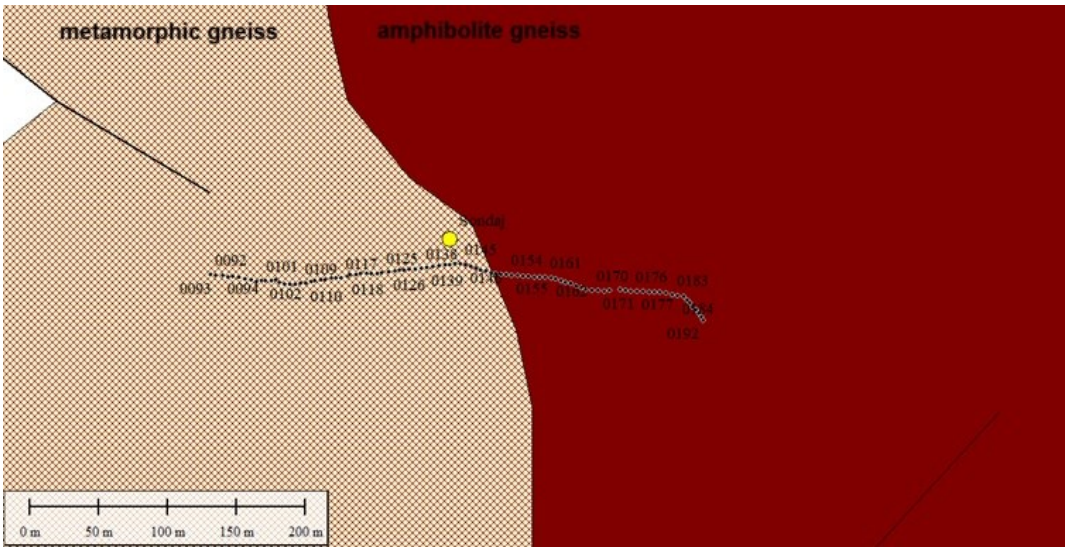


Figure 1. Contact between the different rock types in the area of investigation

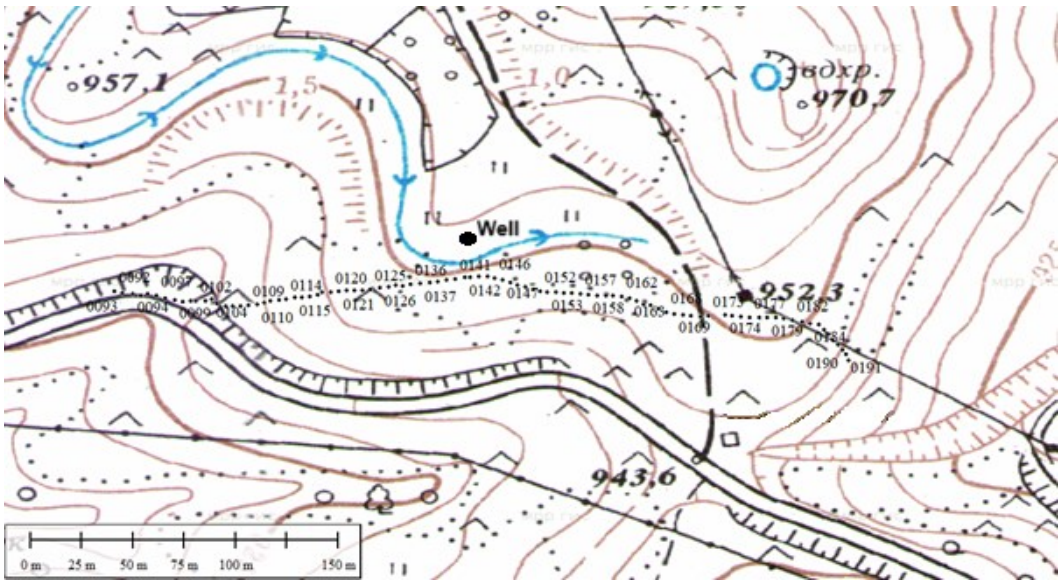


Figure 2. Geological situation around the area of investigation

Gneisses are high-grade metamorphic rocks, often highly folded and deformed due to tectonic pressures. Gneisses tend to be less permeable unless heavily fractured, which can limit groundwater storage in unfractured sections.

Schists are typically foliated and may host minor groundwater along fractures and joints. However, they are generally low in permeability.

Marble formations are particularly important for groundwater because they can develop karst features (dissolution cavities) that enhance permeability and water storage capacity.

The proximity of Strumyani to the Struma Fault means that the region is criss-crossed by fault lines, which have fractured the bedrock. These fault zones are often associated with increased permeability, creating potential conduits for groundwater flow.

In areas where the metamorphic bedrock is highly fractured, groundwater can accumulate in these fractures. However, these aquifers tend to be less productive than alluvial aquifers and may be more localised.

The alluvial deposits along the Struma River are the primary sources of groundwater. These aquifers are generally shallow but can provide significant quantities of water, especially in areas where the deposits are thickest.

Geophysical approach for sustainable groundwater

As Loke and his team (Loke, 2013) correctly stated, the resistivity survey method is one of the oldest and most commonly used geophysical exploration technique. It is currenly used in many different areas: hydrological (Page, 1968; Wilson et al., 2006), environmental and engineering (Chambers et al., 2006; Dahlin, 2001; Rucker et al., 2010), archeological (Griffiths and Barker, 1994; Tsokas et al., 2008), and mineral exploration (Bauman, 2005; Dimovski, et. al., 2017b; Legault et al., 2008; White et al., 2001) surveys.

The subsurface geology of the area is composed of alluvial and colluvial sediments interspersed with older metamorphic rocks, including schists, gneisses, and marbles. The permeability of these rock types is critical for groundwater storage and movement. Schist and gneiss formations tend to have lower permeability, while fractured marbles and alluvial deposits provide better conditions for groundwater accumulation. As Williams and co-workers (Williams, et. al, 2005) stated, the infiltrating water collects in the regolith and then recharges the underlying bedrock aquifer. They also pointed out that bedrock aquifers consist of openings, voids, fractures, and other discontinuities that transmit water through the rock and serve to connect the bedrock system to the overlying regolith. Because regolith has a much higher storage capacity than bedrock, the regolith can be thought of as being a ground-water reservoir or “sponge” that feeds the underlying bedrock discontinuities. This is the case in the village of Mahalata, where the upper position amphibolite gneisses provides good conditions for groundwater accumulation.

Figure 3 shows the exact position of the measured ERT line which is at a close distance from measured area.



Figure 3. Position of the ERT line

As Tomova stated (Tomova and Kisyov, 2024b), geophysical methods are commonly used for rapid data acquisition, allowing for efficient coverage of extensive areas in a cost-effective manner. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is used for this research due to its ability to provide detailed imaging of subsurface structures, which is essential for groundwater exploration. It is non-invasive and detailed subsurface mapping technique that allows for the identification of subsurface layers and structures without the need for drilling or excavation. This is especially important in areas where preserving the landscape is crucial, or where the cost of invasive methods is prohibitive.

ERT measures the electrical resistivity of the subsurface, which varies based on the presence of water, rock types, and porosity. Water-bearing zones (such as aquifers) typically have lower resistivity than dry areas or bedrock, making it easier to identify potential groundwater deposits.

In the Petrich region, which features a mix of metamorphic rocks and sedimentary deposits, ERT can differentiate between various geological formations. It helps detect fractures, faults, or permeable layers where groundwater might accumulate, crucial for areas like Mahalata with its faulted geology.

By mapping resistivity contrasts, ERT can reveal areas where rainwater may infiltrate and accumulate, aiding in the

identification of recharge zones. This is particularly useful for sustainable water management and well-drilling planning.

This geological framework suggests that groundwater in the region is largely dependent on fractures and fault zones, where rainwater infiltration can contribute to aquifers.

Figure 4 presents the measured electrical resistivity line. As can be observed, there is a clear division in the middle of the line. The ERT line crosses a large fracture zone in its first half. This zone is determined by a significant difference in elevation levels and slightly higher values of electrical resistivity on both two sides of the fracture zone.

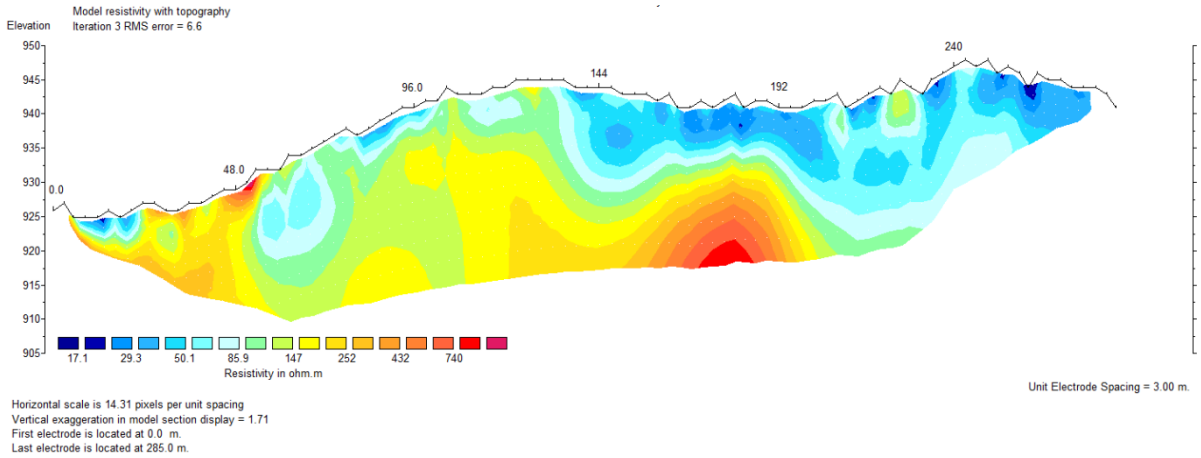


Figure 4. Geophysical ERT profile

The second part of the line is presented by low resistivity values, in the upper part of the line. This part of the profile can be considered as potential groundwater aquifers. It lays down to the contact between the different rock types – metamorphic gneiss and the amphibolite gneiss.

As Tomova stated (Tomova & Kisyov 2024b), ERT is a non-invasive technique, and it can be deployed without disturbing the surface or subsurface. ERT offers a relatively cost-effective way to cover larger areas compared to traditional drilling methods, allowing for a broader survey and minimising the number of test wells needed. ERT's ability to detect variations in subsurface resistivity makes it an invaluable tool for identifying groundwater, characterising geological structures, and understanding the hydrological potential of the region.

Conclusion

The geology of the research region in the vicinity of Strumyani Municipality and the broader southwestern Bulgarian region is characterised by a complex interplay of metamorphic rocks, faulting, and alluvial deposits. These geological features create a variety of hydrogeological settings, including fractured bedrock aquifers and alluvial aquifers. Understanding these geological features is essential for effective groundwater exploration and sustainable water resource management. Additionally, alternative sources, like surface water, thermal springs, and rainwater harvesting could supplement local water supplies, providing a multi-faceted approach to addressing the region’s water challenges. Geophysical techniques, especially Electrical Resistivity Tomography (ERT), offer crucial insights for hydrogeological research by enabling detailed subsurface mapping in a non-invasive manner.

References

Bauman, P. (2005). 2-D resistivity surveying for hydrocarbons — a primer, CSEG Recorder April 2005, pp. 25-33.

Casas, A., Himi, M., Diaz, Y. et al. (2008). Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain. *Environ Geol . 54*, 515–520. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0844-1

Chambers, J. C., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., Hollands, J. (2006). Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site, *Geophysics, 71* (6), pp. B231-B239.

Crawford, T. J. and Kath, R. L. (2001). Ground-water exploration and development in igneous and metamorphic rocks: Part I — Influencing factors and considerations, in Adams, D.B., Burke, Katrina, Hemingway, Bruce, Keay, Jeff, and Yurewicz, Michael, comps., U.S. Geological Survey Appalachian Region Integrated Science Workshop Proceedings, Gatlinburg, Tennessee, October 22 – 26, 2001: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-406, p. 106.

Crawford, T. J. and Kath, R. L. (2003). Ground-water exploration and development in igneous and metamorphic rocks in the southern Piedmont/Blue Ridge, in Williams, L.J., comp., Methods used to assess the occurrence and availability of ground water in fractured-crystalline bedrock: An excursion into areas of Lithonia Gneiss in eastern Metropolitan Atlanta, Georgia: Georgia Geologic Survey Guidebook 23, 58 p.

Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques, *Computers and Geosciences, 27* (9), pp. 1019-1029.

Dimovski, S., Stoyanov, N., Tzankov, H., Kisyov, A. (2014). An integrated geophysical approach for locating water-permeable zones in the embankment wall of a surface water body. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, vol. 57*, part I, Geology and Geophysics, 89-95.

Dimovski, S., Stoyanov, N., Tzankov Ch., Kisyov, A. (2017a). Application of electrical resistivity tomography for studying fissure-karst water-bearing complexes, *Proceedings of the 9th Congress of the Balkan Geophysical Society*, 5-9 November, Antalya, Turkey, Paper 44018, p.5.

Dimovski, S., Stoyanov, N., Tzankov Ch., Kisyov, A. (2017b). A geophysical approach for mapping of abandoned mining workings and unconsolidated zones in coal mining areas. *Journal of Mining and Geological Sciences*, *60*, part I, Geology and Geophysics, 99 – 103.

Griffiths, D. H., Barker, R. D. (1994). Electrical imaging in archaeology, *Journal of Archaeological Science, 21* (2), pp. 153-158.

Herrick, S .M., and LeGrand, H. E. (1949). Geology and groundwater resources of the Atlanta area: Georgia State Division of Conservation Department of Mines, Mining and Geology, Bulletin Number 55, 124 p.

Igwebuike, N., Muchingami, I., Chunga, B., Kanyerere, T. Unveiling subsurface heterogeneity in porous aquifers: Insights from hydrogeophysics and derivative analysis, *Journal of African Earth Sciences*, *214*, 2024, 105275, ISSN 1464-343X, https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105275.

Kath, R. L., Crawford, T. J., and Williams, L. J. (2001). Groundwater exploration and development in igneous and metamorphic rocks: Part II — Case histories from the southeastern Piedmont/Blue Ridge Province, in Adams, D.B., Burke, Katrina, Hemingway, Bruce, Keay, Jeff, and Yurewicz, Michael, comps., U.S. Geological Survey Appalachian Region Integrated Science Workshop Proceedings, Gatlinburg, Tennessee, October 22–26, 2001: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-406, p. 120.

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* (part 3), 293-296, ISSN: 0007-3938, 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. 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.

Legault, J. M., Carriere, D., Petrie, L. (2008). Synthetic model testing and distributed acquisition dc resistivity results over an unconformity uranium target from the Athabasca Basin, northern Saskatchewan, *The Leading Edge, 27* (1), pp. 46-51.

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O. and Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, *Journal of Applied Geophysics, 95*, pp. 135-156, ISSN 0926-9851, https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017.

Page, L. M. (1968). Use of the electrical resistivity method for investigating geologic and hydrogeologic conditions in Santa Clara County, CA, *Ground Water, 6* (5), pp. 31-40.

Rucker, D., Loke, M. H., Levitt, M. T., Noonan, G. E. (2010). Electrical resistivity characterisation of an industrial site using long electrodes, *Geophysics, 75* (4), pp. WA95-WA104.

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for the monitoring of an integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26,* 341-347.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2024a). Applications and advantages of geophysical methods in underground mining, *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 67*, pp. 184-188.

Tomova, M. & Kisyov, A. (2024b). Geophysical monitoring for stability assessment of integrated mine waste storage facility. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics (EPSTEM), 29*, 22-27.

Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., Vargemezis, G., Novack, M. (2008). Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea church in Athens, *Archaeological Prospection, 15* (1), pp. 47-61.

White, R. M. S., Collins, S., Denne, R., Hee, R., Brown, P. (2001). A new survey design for 3D IP modelling at Copper hill. *Exploration Geophysics, 32* (4), pp. 152-155.

Williams, L. J., Kath, R. L., Crawford, T. J., and Chapman, M. J. (2005). Influence of geologic setting on ground-water availability in the Lawrenceville area, Gwinnett County, Georgia: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5136, 50 p.

Wilson, S. R,. Ingham, M., McConchie, J. A. (2006). The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. *Journal of Hydrology, 316* (1–4), pp. 301-312.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE THERMAL CHARACTERISTICS OF THE ENCLOSING STRUCTURES OF BUILDINGS AND BUILDING GROUPS ON THE EXAMPLE OF THE *TRENDAFIL-1* AND *MLADOST* LIVING ESTATES IN THE TOWN OF GABROVO

Christian Tzankov[1], Bogomil Stefanov[2], Miroslav Anchev[1]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: ch.tzankov@mgu.bg; miroslav.anchev@gmail.com
[2]Hexagon-Build Ltd, 1839 Sofia; E-mail: b.stefanov@hexagon-build.com

ABSTRACT. The current study was conducted with the aim of presenting a cost-effective and representative way to determine the thermal characteristics of the enclosing structures of individual buildings or building groups. Aerial thermography provides a convenient technique for qualitative and relatively precise quantitative analysis of the façades and roof structures of buildings that have undergone or are about to undergo a renovation. The ability to capture images from the air allows for data to be obtained from hard-to-reach areas, as well as a generalised picture of the thermal footprint of individual buildings or whole residential areas. Capturing multiple thermograms and merging them into panoramic and 3D spatial-thermal images (models) allows for detailed analysis and calculation of the thermal resistance of the enclosing structures. Aerial thermography is also suitable for preparing a predictive assessment of the potential energy gains from upcoming renovation, as well as for determining the continuity and quality of already installed thermal insulation.
Globally, buildings consume 36% of total energy consumption and generate 39% of carbon dioxide emissions. In this regard, the tested methodology can be summarised as an active method for monitoring the carbon footprint and for planning measures to reduce it.

Key words: aerial thermography, heat load, enclosing structure, thermal resistance, renovation.

МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ТОПЛИННИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОГРАЖДАЩИТЕ КОНСТРУКЦИИ НА СГРАДИ И СГРАДНИ ГРУПИ НА ПРИМЕРА НА КВ. „ТРЕНДАФИЛ-1“ И КВ. „МЛАДОСТ“ В ГР. ГАБРОВО

Християн Цанков[1], Богомил Стефанов[2], Мирослав Анчев[1]
[1]Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
[2]Хексагон-Билд ЕООД, 1839 София

РЕЗЮМЕ. Настоящото проучване е проведено с цел да се представи рентабилен и репрезентативен начин за определяне на топлинните характеристики на ограждащите конструкции на отделни сгради или сградни групи. Аеро термографията предоставя удобна техника за качествен и относително прецизен количествен анализ на фасадите и покривните конструкции на сгради, които са преминали процес на саниране или им предстои такова. Възможността за заснемане от въздуха позволява получаването на данни от трудно достъпни зони, както и генерализирана картина на термичния отпечатък на отделните конструкции или квартали. Заснемането на множество термограми и обединяването им в панорамни и 3D пространствено-термални изображения (модели) дава възможност за подробен анализ и изчисляването на термичното съпротивление на ограждащите конструкции. Аеро термографията е подходяща и за изготвяне на прогнозна оценка на потенциала на енергийните печалби от предстоящо саниране, както и за определяне на непрекъснатостта и качеството на положените вече топлоизолации.
В световен мащаб сградите консумират 36% от общо потребената енергия и генерират 39% от емисиите на въглероден диоксид. В тази връзка изпробваната методика може да се обобщи като активен метод за мониторинг на въглеродния отпечатък и планирането на мерки по снижаването му.

Ключови думи: въздушната термография, топлинен товар, ограждаща конструкция, термично съпротивление, саниране.

Въведение

Въздушната термография, реализирана чрез безпилотни летателни апарати (БЛА), се утвърждава като ефективен метод за дистанционно термографско обследване в редица инженерни и научни области (Lasaponara et al., 2017). Този подход комбинира предимствата на инфрачервената термография (Vollmer & Möllmann, 2018) с високата мобилност и достъпност, които предоставят съвременните дронове (Цанков & Кисьов, 2016; Цанков & Парушев, 2016; Dadrass Javan et al., 2025). За разлика от класическите методи, при които термографската апаратура се използва от наземна позиция, при въздушната термография термокамерата е монтирана на БЛА, което дава възможност за:

- бързо и ефективно заснемане на големи площи;
- обследване на труднодостъпни или опасни зони;
- повишена безопасност и оптимизиране на времевите и човешките ресурси.

Методът е базиран на надеждни физични принципи (Wolfe & Zissis, 1985), свързани с повърхностното инфрачервено излъчване и обемните топлинни характеристики на материалите (Barreira et al., 2021) и се прилага успешно в съчетание със съвременни технологии като GPS навигация, изкуствен интелект и 3D моделиране (Hou et al., 2022).

Основни приложения на въздушната термография

Въз основа на своята гъвкавост и информативност, въздушната термография намира широко приложение в следните области:

- Фотоволтаични системи: инспекция на соларни панели и соларни паркове с цел откриване на дефектни клетки, модули или стрингове чрез анализ на температурни аномалии (Oliveira et al., 2021);
- Енергийна ефективност на сгради: обследване за наличие на топлинни загуби, термични мостове, влага и течове в ограждащи конструкции (Fokaides & Kalogirou, 2011);
- Електропреносни и електроразпределителни мрежи: засичане на локализирани точки на прегряване,

претоварване или дефектни елементи в електрическата инфраструктура (Chatzargyros et al., 2024);

• Пожарна безопасност: мониторинг на горски масиви, индустриални зони и критична инфраструктура за ранно откриване на пожари;

• Търсене и спасяване: локализиране на хора в труднодостъпни терени, особено при ограничена видимост (нощно време, дим, мъгла и др.).

Избор на тестов обект и цели

Екипът, ангажиран с провеждането на експерименталните дейности, представени в настоящия доклад, разполага с дългогодишен опит в прилагането на въздушната фотограметрия за наблюдение, заснемане и картографиране на обекти с различен мащаб и степен на сложност. Паралелно с това е натрупана значителна експертиза в използването на аеротермография чрез безпилотни летателни апарати (БЛА) за локализиране на проблеми, свързани с енергийната ефективност на разнообразни жилищни, обществени и други сгради и съоръжения.

Тези обстоятелства обосновават водещата роля на авторите при реализацията и анализа на експерименталните термографски измервания, насочени към изследване на топлинните характеристики на ограждащите конструкции на сгради и сградни ансамбли. Самото изследване е част от провежданите на терен дейности по изпълнението на един от водещите европейски проекти за трансформация на градовете в климатично неутрални и умни градски среди – NetZeroCities.

Габрово, като част от програмата NetZeroHero

София и Габрово са единствените български градове, участващи в престижната инициатива NetZeroHero, която обединява 112 града от Европейския съюз и асоциирани държави. Проектът „NetZeroHero – климатично неутрално и умно Габрово“ е насочен към намаляване на въглеродните емисии в градска среда чрез пилотни инициативи за обновяване на жилищни и обществени сгради, внедряване на възобновяеми енергийни източници и повишаване на енергийната ефективност.

Обхватът на пилотната зона (фиг. 1) включва 30 многофамилни жилищни сгради, 2 детски градини, 1 ясла, 1 училище и няколко търговски обекта. Проектът има за цел да създаде пример за устойчиво развитие, който да бъде приложен в други квартали на Габрово, както и в други градове на България.

Обща цел на NetZeroHero. Целта на проекта е да подпомогне Община Габрово в постигането на въглеродна неутралност до 2030 г. Това се предвижда да бъде реализирано чрез пилотни инициативи, които повишават енергийната ефективност на жилищни и обществени сгради, интегрират възобновяеми енергийни източници и ангажират местната общност в процеса на устойчиво развитие.

Като част от тези дейности е предвидено събирането на данни за енергийната консумация в пилотната зона, което се осъществява посредством термографски изследвания.



Фиг. 1. Обхват на пилотната зона на проект „NetZeroHero – климатично неутрално и умно Габрово“, респ. границите на обхват на проведените аеротермографски изследвания

Използвана апаратура

Дистанционното заснемане на обекта е извършено с безпилотен, дистанционно управляван професионален летателен апарат DJI Mavic 3T RTK, оборудван с термовизионна камера с резолюция 640×512 pixel. Дронът разполага с RTK модул за кинематични поправки в реално време, осигуряващ сантиметрова точност при позициониране и заснемане.

Кинематичната поправка е реализирана чрез наземен многоканален RTK GNSS приемник Emlid Reach RS3, използван като базова станция. Приемникът е оборудван с интегриран високопрецизен жиростабилизатор, който осигурява корекция с точност ±2 mm и ±0.3 mm/°. Освен това, приемникът разполага с вграден радиомодем с максимален обхват за комуникация.

За допълнително калибриране на данните от дроновото заснемане е предвидено използването на прецизна термовизионна камера FLIR T640 с висока резолюция.

Методика на изследванията

Заснемането на пилотната зона в гр. Габрово бе извършено вечерта на 24.02.2025 г., в периода от 20:30 ч. до 23:30 ч., при външна температура около -3°C. Тези условия осигуряват отлична възможност за регистриране на температурния контраст между околната среда и повърхностната температура на обследваните сгради.

За отправна точка на изследването бе избран покривът на бл. „Катюша“. С височина от 14 етажа, той предоставя добра стартова позиция за планираното изследване, осигурява постоянен и стабилен GPS сигнал, както и възможност за почти пълен обзор на територията на пилотната зона.

В източната част на покрива е монтирана базова GNSS станция. Координатите ѝ бяха изчислени чрез статични измервания с продължителност 20 min, като за референтна бе използвана GPS точка от геодезическата обсерватория „Плана“. Връзката с перманентната станция в „Плана“ беше

осъществена по интернет чрез унифициран протокол за предаване на геодезични данни (NTRIP).

Така бе постигната хоризонтална точност от 3 cm и вертикална точност от 6 cm, което напълно удовлетворява изискванията за по-нататъшното изпълнение на задачата..

Планирана е една полетна мисия за триизмерно заснемане на площта. Височината на полета е 100 m над кота терен, при надлъжно застъпване от 80% и странично застъпване от 70%. Мисията се състои от пет независими подмисии. Всяка подмисия покрива цялата територия на обекта, но се различава от останалите по азимут (табл. 1) и наклон на камерата.

При първата подмисия камерата е насочена вертикално надолу (под ъгъл 90° спрямо хоризонта), съответстващо на ортофотографско заснемане, с проектна пространствена разделителна способност 10.55 cm/pixel. При останалите четири подмисии камерата е с наклон 45°, а проектната разделителна способност е 14.92 cm/pixel. Общият брой планирани термовизионни сцени възлиза на 3773.

Комбинацията от различни ъгли на заснемане и азимути осигурява пълно 360° обследване на площта, с до 180° обзор върху теренните характеристики, което позволява създаване на високоточен триизмерен модел.

Таблица 1. *Параметри на полетната мисия*

Подмисия No	Азимут / посока	Времетраене mm:sec	Брой сцени
1	N/A / верт.	21:36	998
2	0° / N	15:08	674
3	90° / E	16:08	718
4	180° / S	15:38	696
5	270° / W	15:26	687

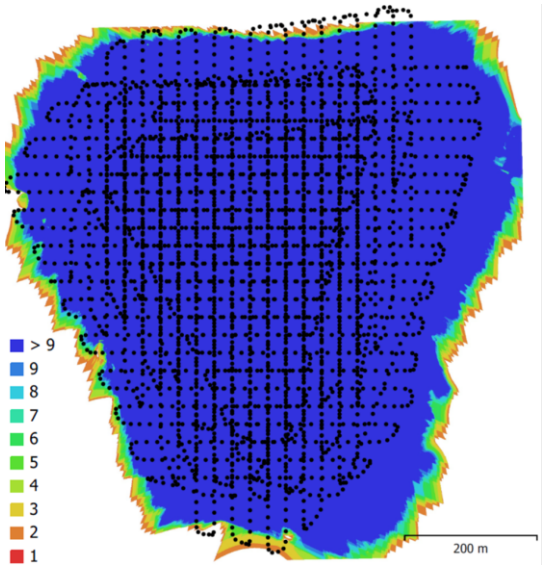
Мисията беше изпълнена автоматизирано чрез връзка с GPS и RTK корекции, осигурени от геодезичната базова станция, монтирана на покрива на жилищния блок. Операторите следяха позицията на дрона, качеството на сигнала и заряда на батериите. По време на изпълнението бяха използвани общо 4 батерии. Поради загуба на сигнал и недостиг на батерии, крайният брой заснети термовизионни сцени е 3636, което представлява намаление от под 4% спрямо планирания обем. Това несъответствие е незначително и не се очаква да окаже съществено влияние върху качеството на получените резултати и генерирания триизмерен модел.

От мястото на наблюдение бяха направени и допълнителни заснемания на околните сгради с помощта на високоточна ръчна термокамера. Заснети са индивидуални и панорамни термограми, целящи прецизно определяне на температурния интервал и калибриране на данните, получени от дрона.

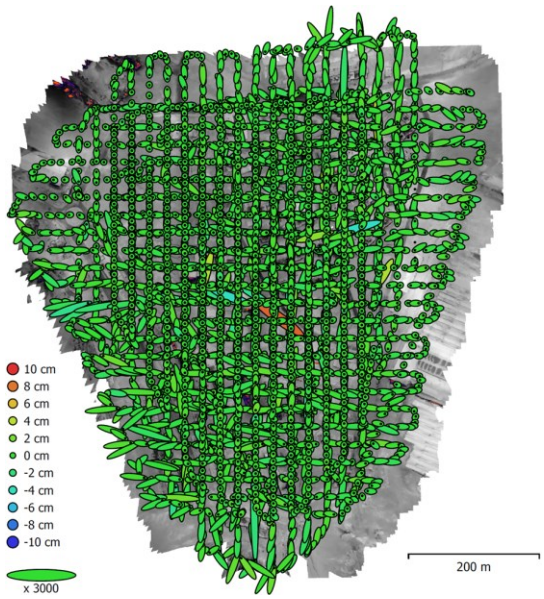
Обработка на данните

Изображенията на сгради, заснети с дрон и/или ръчна термокамера в определен полигон, са обработени допълнително с приложен софтуер с цел извличане на количествени данни.

Термограмите от летателната мисия са конвертирани в GeoTIFF формат, който запазва техните температурни характеристики, нормирайки ги в интервала от 0 до 1. След интегриране на изображенията в стандартен софтуер за триизмерна фотограметрия и прилагане на стандартни процедури на обработка, е извършена автоматизирана аеротриангулация, базирана на позиционните параметри и общи точки между отделните сцени (фиг. 2). Направен е статистически анализ на отклоненията между оптимизираните и изходните позиции на камерата за всяко изображение (фиг. 3). За целия модел са отчетени следните средни стойности: X_{err} = 3.378 mm; Y_{err} = 4.167 mm; Z_{err} = 5.851 mm; XY_{err} = 5.364 mm; сумарна грешка Σ_{err} = 7.937 mm. Получените отклонения са в допустимите норми и осигуряват надеждна основа за последвалия анализ



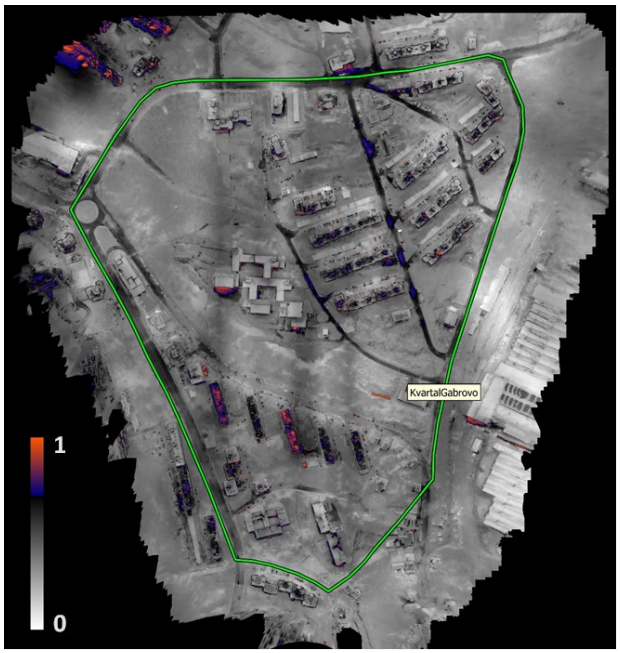
Фиг. 2. Позиция на камерата спрямо площта с оцветяване съгласно броя застъпващи се изображения



Фиг. 3. Позиция на камерата спрямо площта с визуализирани оценки на грешката на позициониране

Като краен резултат е генериран цифров повърхнинен модел (DSM) на изследвания терен с пространствена разделителна способност 12.8 cm/pixel, съответстваща на плътност от 61.5 точки на квадратен метър. Върху този модел е насложено интегрално изображение на повърхностната температурна радиация, регистрирана по време на мисията и извлечена от термограмите. По този

начин е създаден триизмерен модел на повърхностните топлинни характеристики, подходящ за последващ анализ и интерпретация (фиг. 4 и 8).



Фиг. 4. Изглед отгоре към триизмерния модел на повърхностните топлинни характеристики с нормирани стойности на отчетените температури

Термограмите от наземните заснемания са обработени по стандартна процедура, като част от тях са обединени в панорамни изображения (фиг. 5 и 6).



Фиг. 5. Панорамна термограма с точни температури направено от покрива на бл.“Катюша“ с изглед на североизток

Инструменти за анализ и резултати

Получените термографски изображения на сгради в изследвания полигон бяха подложени на последваща обработка с приложен софтуер с цел извличане на количествени данни. Термограмите от летателната мисия са обединени в 3D температурен модел (фиг. 4), а тези от ръчната камера са „съшити“ в панорамни изображения (фиг. 5), като и в двата случая са запазени характеристиките на термографското изображение. Получените данни подлежат на анализ чрез инструменти като хистограми, температурни рамки и температурни профили.

Методиките за оценка на резултатите обикновено се базират на параметри като:

- средна температура на сградата;
- температура на околната среда;
- отразени температури (напр. съседни сгради и небе);
- разстояние до заснемания обект;
- емисионен коефициент на повърхностите;
- влажност на въздуха;
- степен на изолация на ограждащата конструкция (изразена чрез коефициент в интервала 0–1).

В повечето държави съществуват утвърдени математически модели, чрез които се изчисляват стойности, съответстващи на действащата нормативна уредба, свързана с коефициента на топлопреминаване (*U*) или температурното съпротивление (*R*). Един емпиричен начин за изразяване на *U* е (Spohn, 2012):

$$U = \alpha \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}, \quad (1)$$

където α = 7.69 W/m²K е зададен съгласно ISO 6946 коефициент на топлопреминаване, $\Delta T_1 = T_i - T_w$ – разлика между вътрешната (T_i – интериорна) температура и температурата на вътрешната повърхност (T_w – стенна), $\Delta T_1 = T_i - T_e$ – разлика между вътрешната и външната (T_e – екстериорна) температура.

Съществуват и допълнителни методи за оценка, като този, разработен от Building Research Establishment (BRE), използван на територията на Обединеното кралство:

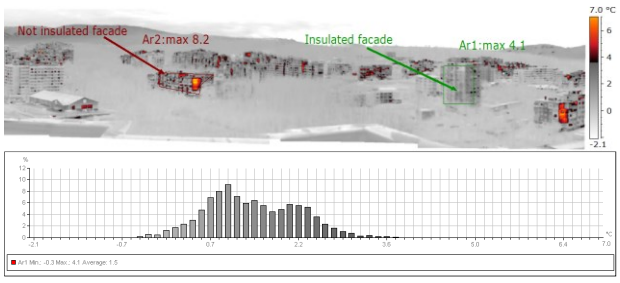
$$T_{Cso} = F_{si}(T_{so} - T_{si}) + T_{si}, \quad (2)$$

където T_{Cso} е прагова външна температура, F_{si} = 0.75 – критичен температурен фактор, дефиниран в доклад на BRE (2006), T_{so} – външна повърхностна температура, T_{si} – вътрешна повърхностна температура.

Използването на критичния температурен фактор F_{si} позволява при нормални условия да се идентифицират термични аномалии в ограждащата конструкция. Стойността F_{si} = 0.75 е приемлива за жилищни и офис сгради.

В изследването е приложен екстериорен подход — заснети са всички фасади на сградата при подходящи климатични условия. Данните за вътрешната и външната температура са събрани по време на термовизионното обследване и са използвани за изчисляване на критичната температурна граница T_{Cso}, чрез която се определят зони с потенциални топлинни загуби.

Прагът на допустимата външна температура на фасадите е определен съгласно формула (2) при средни стойности за T_{so} = -3°C и T_{si} = 23°C. Получената стойност на T_{Cso} е 3.5°C. Този праг е използван като долна граница на температурната изотерма при обработката на термограмите. Всички повърхности с температура над тази стойност се визуализират в цветен спектър, докато повърхностите, отговарящи на нормативните изисквания, се представят в сива палитра (фиг. 6).

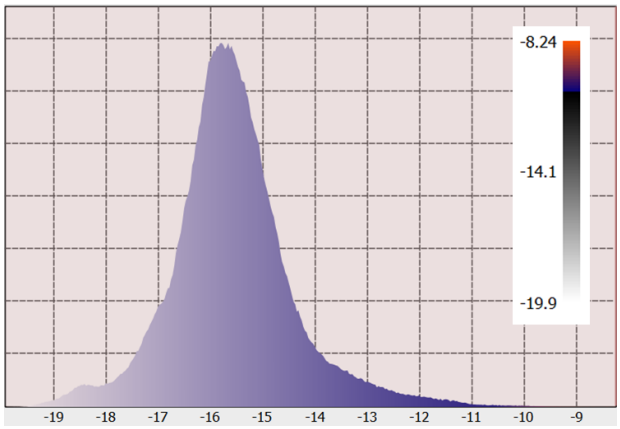


Фиг. 6. Панорамна термограма с изглед на север с оценка на изолационните характеристики и хистограма на повърхностната температура с цветове

На термограмата на фиг. 6, обозначената със зелена стрелка сграда е единствената напълно санирана жилищна сграда в изследвания полигон. Така се визуализира постигнатият изолационен ефект. В контраст с нея, останалите сгради са санирани „на парче“, което се отразява в неравномерната им температурна сигнатура.

Качествената оценка на триизмерния модел показва много добра корелация с изображенията от наземната термокамера. При количественото сравнение обаче, след обратно преобразуване на нормализирания модел (фиг. 4), се наблюдават съществени отклонения между цифровите стойности на повърхностната температура (фиг. 7) и прецизно определените температури (фиг. 6). Основните разлики се изразяват в по-широк температурен диапазон и отчетливо отместване към по-ниски стойности.

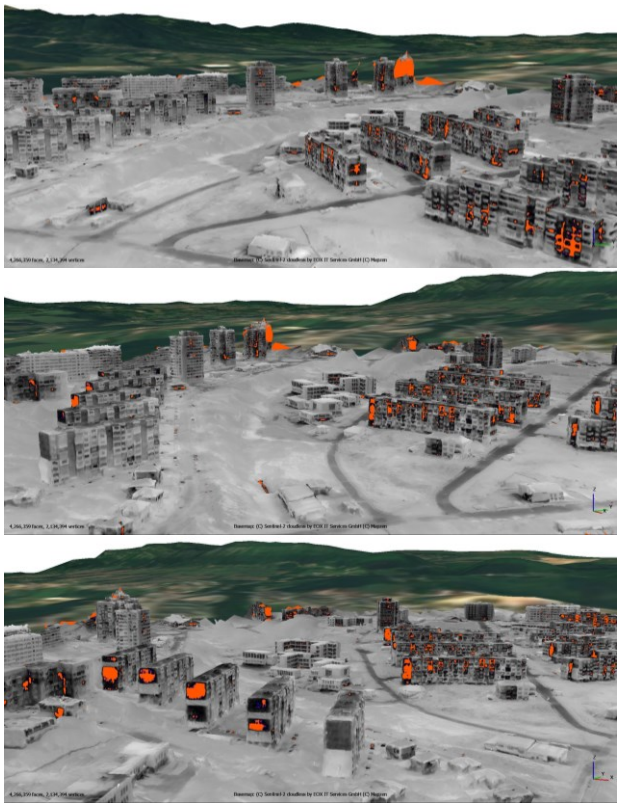
С оглед избягване на интерпретации, основани на физически некоректни температурни стойности, цифровият модел е разглеждан в нормализиран вид и използван единствено за визуална качествена оценка на топлоизолационните характеристики на конструкциите.



Фиг. 7. Хистограма на повърхностната температура на триизмерния модел

Въпреки посочените ограничения и недостатъци при количественото възприемане, цифровият модел осигурява солидна основа за качествена интерпретация и извеждане на обосновани изводи. Анализът на данните, предоставени от модела при различни ъгли на визуализация (фиг. 8), позволява идентифицирането на ключови зони с повишени топлинни загуби и отклонения в изолационните свойства на конструкциите. Тези наблюдения са особено ценни, тъй като дават възможност за приоритизиране и насочване на последващи, по-прецизни изследвания, насочени към оценка на качеството и ефективността на термоизолацията. В редица случаи, на база тези резултати, могат да бъдат формулирани конкретни препоръки и предприети целенасочени мерки за саниране и реновиране на засегнатите сгради, което от своя страна допринася за повишаване на енергийната им ефективност и намаляване на топлинните загуби.

Получените резултати могат да се представят таблично или графично в зависимост от нуждите на обследването като визуализацията на проблемните зони или участъци по ограждащата конструкция може да се направи и с помощта на изотерма – температурен интервал определен от стойността на предварително получената аномална (нежелана) температура на покривите и фасадите.



Фиг. 8. Примерни изгледи към повърхностния топлинен модел на пилотната зона на проект NetZeroHero в Габрово при различни ъгли на завъртане

Дискусия

Представената методика демонстрира висока приложимост при бърза и ефективна оценка на топлинните характеристики на ограждащи конструкции в реална среда. Тя успешно отговаря на основната цел на изследването – да се предложи достъпен, визуално разбираем и практически приложим инструмент за идентифициране на термични загуби и дефекти в изолацията на сгради в градски условия.

Сред основните предимства на подхода са:

Висока мобилност и обхват – използването на БЛА с термовизионна камера позволява едновременно и безопасно заснемане на множество сгради, включително труднодостъпни зони;

• Качествена визуализация – генерираните 3D термални модели предоставят добра основа за сравнителен анализ и визуална интерпретация;

• Възможност за ранна диагностика – локализирането на термични аномалии дава възможност за навременни мерки по саниране и поддръжка;

• Интеграция в общински политики – резултатите от изследването могат да бъдат директно използвани от местните власти при планиране на енергийно ефективни интервенции.

От друга страна, методиката има и определени ограничения:

• Ограничена количествена точност – въпреки усилията за нормализация и калибриране, цифровите температурни стойности се отклоняват от реалните, което не позволява надеждно изчисляване на топлинни коефициенти без допълнителни измервания. Този недостатък обаче може да

бъде преодолян чрез прецизиране на параметрите на летателната мисия (височина и скорост на полета, степен на припокриване на изображенията), използване на термовизионна камера с по-висока термична и пространствена резолюция, както и чрез оптимизиране на алгоритмите за постпроцесинг и нормализация на термограмите.

• Зависимост от външни условия – точността на резултатите е чувствителна към метеорологичните условия по време на заснемането;

• Необходимост от експертна интерпретация – качественият анализ, макар визуално достъпен, изисква специалисти с опит, за да се направят коректни изводи.

Въпреки тези ограничения, методиката се доказва като ценен инструмент за първоначален скрининг на състоянието на термоизолацията в жилищни райони. Получените резултати са достатъчни за формулиране на препоръки, насочване на последващи технически обследвания и приоритизиране на сгради за саниране в контекста на общински програми за енергийна ефективност.

Заключение

Заснемането на цели квартали с помощта на термографски дрон предоставя възможност за определяне на така наречения топлинен отпечатък на градската среда. Това създава реална основа за планиране на ефективни мерки за цялостно саниране с оглед намаляване на енергийните загуби, ограничаване на емисиите на CO_2 и повишаване на енергийната ефективност както през отоплителния, така и през летния сезон.

Проведеното изследване в пилотната зона на проект „NetZeroHero – климатично неутрално и умно Габрово“, обхващаща кварталите „Трендафил-1“ и „Младост“ в гр. Габрово, представлява първи по рода си пилотен проект за България. То демонстрира на практика как чрез ареално термографско обследване могат да бъдат идентифицирани реалните ефекти от вече реализирани мерки за саниране, както и да се очертаят приоритетни зони за бъдещи интервенции. Разработената методика показва висока приложимост за визуална оценка и сравнителен анализ на енергийните характеристики на сградния фонд, като същевременно предоставя ефективен инструмент за интегрирано градско планиране и вземане на информирани решения на местно и национално ниво.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на Община Габрово и Фондация „Център за енергийна ефективност ЕнЕфект“ за предоставената възможност за участие в проект NetZeroHero чрез провеждането на настоящите експериментални изследвания.

Литература

Building Research Establishment. (2006). *Assessing the effects of thermal bridging at junctions and around openings* (Information Paper IP 1/06). BRE Press.

Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Simões, M. L. (2021). Emissivity of building materials for infrared measurements. *Applied Sciences*, *11*(3), 1101. https://doi.org/10.3390/app11031101

Chatzargyros, G., Papakonstantinou, A., Kotoula, V., Stimoniaris, D., & Tsiamitros, D. (2024). UAV inspections of power transmission networks with AI technology: A case study of Lesvos Island in Greece. *Energies*, *17*(14), 3518. https://doi.org/10.3390/en17143518

Dadrass Javan, F., Samadzadegan, F., Toosi, A., & van der Meijde, M. (2025). Unmanned Aerial Geophysical Remote Sensing: A Systematic Review. *Remote Sensing*, *17*(1), 110. https://doi.org/10.3390/rs17010110

Fokaides, P. A., & Kalogirou, S. A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes. *Applied Energy*, *88*(12), 4358–4365. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014

Hou, Y., Chen, M., Volk, R., & Soibelman, L. (2022). Investigation on performance of RGB point cloud and thermal information data fusion for 3D building thermal map modeling using aerial images under different experimental conditions. *Journal of Building Engineering*, *45*, 103380. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103380

Lasaponara, R., Masini, N., Coluzzi, R., & Gizzi, F. T. (2017). Archaeological aerial thermography in theory and practice. *Antiquity*, *91*(359), 1361–1373. https://doi.org/10.15184/aqy.2017.160

Oliveira, A. K. V. de, Aghaei, M., & Rüther, R. (2021). Automatic inspection of photovoltaic power plants using aerial infrared thermography: A review. *Sensors*, *21*(11), 3884. https://doi.org/10.3390/s21113884

Spohn, B. (2012). *In field determination of installed R-value* [PowerPoint presentation]. Testo, Inc. https://trutechguy.com/wp-content/uploads/2012/10/u-value-probe-presentation1.pdf

Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2018). *Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications* (2nd ed.). Wiley-VCH. https://doi.org/10.1002/9783527693306

Wolfe, W. L., & Zissis, G. J. (Eds.). (1985). *The infrared handbook*. Environmental Research Institute of Michigan (ERIM) / Office of Naval Research.

Цанков, Х., & Кисьов, А. (2016). Приложение на дистанционно управляеми летателни системи (ДУЛС) за дистанционни изследвания. В *Доклади от XIV-та Национална младежка научно-практическа конференция* (19–20 април 2016 г.), София, България.

Цанков, Х., & Парушев, И. (2016). Приложимост на любителски дистанционно управляеми летателни системи (ДУЛС) за решаване на приложни задачи. *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“*, *59*(I), 183–187.

СЕКЦИЯ

ДОБИВ НА ЕНЕРГИЙНИ РЕСУРСИ

SECTION

EXTRACTION OF ENERGY RESOURCES

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDROGEN AND METHANE MIXTURES IN DETERMINING PRESSURE LOSS IN GAS DISTRIBUTION NETWORKS

Martin Boyadzhiev, Evgeni Kraychev, Stefan Vuchev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: martinb@mgu.bg, evgeni.kraychev@mgu.bg, stefcho_vuchev@abv.bg

ABSTRACT. The topic of the study is the determination of the pressure loss during the transport of a combined mixture of methane and hydrogen in a linear section of a continuous gas pipeline. The behaviour of the gas mixture in different concentrations, under standard conditions, taking into account the climatic conditions and operating parameters of gas infrastructure in the Republic of Bulgaria is examined. The object of study is a continuous and operating gas pipeline, from the city gas distribution network, made of a PE-HD Ø63x5.8mm pipe, with a working pressure of Pp=0.4MPa, and length of the section L=5000m. The results of the study aim to depict the behaviour of the gas dynamic mixture in the studied area, at concentrations at which the gas mixture will be supplied through the urban gas distribution network in future. The results obtained can be useful in the design and determining of the technical characteristics of gas pipelines for mixtures of methane and hydrogen.

Key words: hydrogen, methane, pressure loss, pipelines.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА СМЕСИ ОТ ВОДОРОД И МЕТАН ПРИ ОПРЕДЕЛЯНЕ ЗАГУБИ НА НАЛЯГАНЕ В ГАЗОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ

Мартин Бояджиев, Евгени Крайчев, Стефан Вучев

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

РЕЗЮМЕ В доклада е представена методика за определяне на загубите на налягане при транспорт на комбинирана смес от метан и водород в линеен участък на непрекъснат газопровод. Разглежда се поведението на газовата смес в различна концентрация, при условия, съобразени с работните условия на действащата газова инфраструктура в Република България. Обектът на изследване е действащ газопровод при стационарен режим на движение от градска разпределителна мрежа, изработен от тръба PE-HD Ø63x5.8mm, с работно налягане Pp=0.4 MPa и дължина на участъка L=5000m. Резултатите от изследването представят поведението на газодинамичната смес в изследвания участък, при концентрации, в които газовата смес ще бъде подавана през градската газоразпределителна мрежа в бъдеще. Получените резултати могат да бъдат използвани при проектирането и определянето на техническите характеристики на газова инфраструктура за метано-водородни смеси.

Ключови думи: водород, метан, загуби на налягане, газопроводи.

Въведение

Развитието на водородната енергетика и постигането на целите, указани в „Зелената сделка“, поставят нови технологични предизвикателства по пътя към въглеродната неутралност. За постигане на заложените норми на въглеродни емисии към 2030 г., се предлага решение за постепенно преминаване към въглеродно по-разтоварени горива. Такова гориво е смес от метан и водород в отношение 10-30% съдържание на водород спрямо метана. Изследването разглежда и анализира резултатите от транспортирането на такава смес от газове с различни физико-химични свойства в действащ участък на градска газоразпределителна мрежа. Основната задача на изследването е да изследва поведението на газовата смес в участъка от газопровода, като се даде модел за определяне на загубите на налягане по дължина на трасето.

За обект на изследването се взема условен линеен участък от действащата градска газоразпределителна мрежа, изпълнен от тръба PE-HD PE100 (EN1555 / ISO4437), с диаметър Ø63 и дебелина на стената 5.8mm. Условното работно налягане на газопрпвода е Pp=0.4MPa, при дебит на потока Q=25m³/ден и нормални температурни условия T=20°C. Такива работни условия отговарят на действителните работни параметри на градските газоразпределителни мрежи в Република България. Материалите, температурата и налягането са съобразени с проектните решения и условия при конфигурирането на газопроводни системи, като отговарят на изискванията на наредбите: НУБЕПРГСИУПГ (в сила от 03.09.2004, приета с ПМС № 171 от 16.07.2004), Наредба №6 от 25.11.2004г. за техническите правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ, „Български Институт по Стандартизация“ (БДС) и „Международна Организация по Стандартизация“ (ISO) към материалите.

Характеристика на газовата смес

Двукомпонентната газова смес на метана и водорода се предвижда да бъде транспортирана в различно процентно съотношение една към друга. Концентрацията на метан и водород е в 10-30% процентно съотношение на водорода към метана, като се разглеждат три варианта на концентрация 10%, 20%, 30% водород в сместа. Това е необходимо с цел правилното и реално проследяване на процеса, вземайки предвид различните коефициенти на свръхсвиваемост на двата газа. Това обстоятелство се дължи на разликата в плътността на газовете в сместа, която е 0.09kg/m³ при водорода и 0.72 kg/m³ за метана. Разликата е осем пъти по-ниска плътност на водорода спрямо метана. Наред с коефициента на свиваемост при избора на концентрация в разглежданите газови смеси в потока, е взето предвид и различното теглово съотношение на двата едновременно транспортирани газа. Молекулната маса на метана е 16.04 kg/kmol, а на водорода 2.06 kg/kmol.

При отчитане на гореизброените свойства на газовете в потока се приема, че така избрана газовата смес, в предвидените за пренос концентрации, няма значително да

повлияе върху работата на газовите съоръжения или да предизвика съществени разлики в проектно зададените експлоатационни параметри на газопровода от градската разпределителна мрежа.

Методи за определяне на загубите на налягане

Налягането, температурата, скоростта на потока, коефициентът на свръхсвиваемост и коефициентът на триене са в постоянна зависимост. Поведението на газовите смеси в потока е подобно на поведението на флуидите при транспортиране през тръби; по тази причина трябва да бъдат зачитани същите закономерности, оказващи влияние на протичането на процеса и отчитането на загубите на налягане по дължина на трасето на изследвания участък.

При намаляване на налягането се увеличава скоростта на потока в газопровода, вследствие на увеличаване на обема на газа, което се отразява върху плътността на газовата смес. Начален и фундаментален фактор при определяне на поведението на газовата смес в потока е изчисляването на „критерия на Рейнолдс“ “*Re”*, който характеризира отношението на инерционните към вискозните сили, влияещи на потока движението на сместа в потока.

$$\mathrm{Re} = \frac{vD\rho}{\mu} \qquad (1)$$

където:

Re - Число на Рейнолдс, (без дименсия)
v - Скорост на потока, *m/s*
D - Диаметър вътрешен на тръбопровода, *m*
μ - Кинематичен вискозитет, kg/*m*.s
ρ - Плътност на газа, kg/m^3

Получените данни и изчислени стойности на „критерия на Рейнолдс“ “*Re”*, са изложени в (таблица 1) заедно с данните за скоростта на потока при начално налягане P, при диаметър на трасето Ø63mm и дължина на участъка L=5000m.

Таблица 1. *Изчислено Re и скорост на потока при различни концентрации на газовата смес.*

Концентрация CH4 / H2	Re	Начално налягане P1 / mbar	Скорост на потока v m/s
100 / 0	34152.045	4000	2.228
90 / 10	31264.19	4000	2.228
80 / 20	28375.331	4000	2.228
70 /30	25486.182	4000	2.228

Получените стойности на “Re” показват, че потокът на газовата смес в изследвания участък при различна концентрация метан към водород преминава от преходно към турбулентно движение. За долна граница на преминаване на потока от преходно към турбулентно движение в тръби с кръгло сечение се счита Re > 2600 (Menon and Shashi). С увеличаване на съдържанието на метан в сместа критерият на Рейндолс се увеличава, като в случая потокът успява да запази скоростта си.

За SI система е прието критерия (число) на Рейнолдс “*Re”*, да се определя:

$$\mathrm{Re} = 0.05134\left(\frac{Pb}{Tb}\right)\left(\frac{GQ}{\mu D}\right) \qquad (2)$$

където:

Pb- Начално налягане, кРа
Tb- Температура, К (273+℃)
D - Диаметър вътрешен на тръбопровода, *m*
G - Специфично тегло на газа (въздух=1.0)
μ - Динамичен вискозитет, kg/*m*.s
Q - Дебит, m^3/ ден

Следващ важен критерий при пресмятането на спада на налягането по дължина на участъка от газоразпределителната мрежа е определянето на коефициента на триене. Този коефициент характеризира взаимодействието на граничния слой на газовата смес със стените на газопреносното трасе, има пряко отношение към числото на Рейнолдс на газовата смес и вътрешния диаметър на газопреносното трасе. Тази величина се означава с „f“ и е правопропорционална на числото на Рейндолс при движение на потока.

$$f = \frac{0{,}034}{\mathrm{Re}^{0{,}25}} \qquad (3)$$

При изчисляване на спада на налягането на газа, по време на движението му в газовата тръба при постоянна температура на потока от (T=20°C) е важно да се вземе предвид коефициентът му на свръхсвиваемост “*Z”*. Тогава, отчитайки гореизложените фактори, получаваме следния израз за загуба на дебит на потока:

$$Q = 1.1494x10^{-3}\left(\frac{Tb}{Pb}\right)\left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{GT_f LZ_f}\right]D^{2.5} \qquad (4)$$

където:

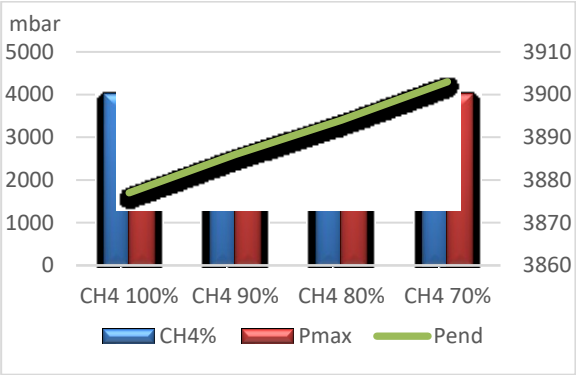
Pb- Начално налягане, кРа
Tb- Температура, К (273+℃)
D - Диаметър вътрешен на тръбопровода, *m*
G - Специфично тегло на газа (въздух=1.0)
Q - Дебит на потока, m^3/ ден
Z - Коефициент на свръхсвиваемост, (без дименсия)
L - Дължина на газопровода, m
P_1- Налягане в начален участък на отчитане, kPa
P_2- Налягане в краен участък на отчитане, kPa

Таблично анализът на поведението на газовата неоднородна смес, отчитайки коефициентите на съпротивление и силите, които действат върху нея по време на движение в участъка от градската газоразпредителна мрежа, може да бъде представен в следния вид (табл. 2).

Таблица 2. *Отчетени разлики на P_1 и P_2*

Концентрация CH4 / H2	Z	Начално налягане P1 / mbar	Пад на налягане P1-P2 / mbar
100 / 0	0.99817	4000	122.187
90 / 10	0.99857	4000	113.883
80 / 20	0.99893	4000	105.46
70 /30	0.99926	4000	96.797

Разликите в наляганията в двата контролни края на експерименталния участък са изразени в mbar, поради ниските им стойности и с цел по-точно отчитане на данните. Изследването на получените резултати показва промяна в наляганията и поведението на газовете спрямо различната концентрация на метан-водородната смес. Отчита се намаляване на спада на налягане в края на участъка при увеличение на концентрацията на водород в общия състав на газа. Това се дължи да увеличаване на коефициента на свръхсвиваемост „Z“, а съответно и на силите на противодействие на движението на газовата смес. Поведението на газовия нееднороден поток се променя и загубите на налягане в контролния участък намаляват с увеличение на концентрацията на водород. Резултатите са представени графично на (фиг. 1), където са изложени отчетените крайни и начални стойности на P_1 и P_2 в mbar, за всяка концентрация метан/водород на изследвана газова смес.



Фиг. 1. Графика на промяна на налягането при различно съдържание на водород към метан в газовата смес.

Заключение

Изследването на спада на налягането в участъка от градската разпределителна мрежа показва очакваните прогнозируеми параметри на спад в налягането по време на транспорт на смес от метан и водород в различна концентрация. За да бъде процесът отразен обективно, посочените данни в изследването са сравнени с тези на транспорт на 100% газ CH_4, като постепенно се добавя процентно съотношение H_2. Приведените в изследването данни могат да бъдат използвани при изчисляване на проектните стойности и параметри на градските газоразпределителни мрежи при бъдещ пренос на комбинирани смеси от метан и водород. Изследването показва модела и очакваните стойности на спад на налягането в реални условия. Такъв анализ може да бъде прилаган успешно при проектирането на бъдещи участъци от градската газоразпределителна мрежа за пренос на комбинирана газова смес от метан и водород. С тенденциите на ЕС към въглеродна неутралност и поставените цели в „Зелената сделка“ се предвижда внедряването на водорода в градските газопреносни мрежи съвместно с метана. Тези обстоятелства правят получените резултати приложими в практически задачи при проектиране на газоразпределителни мрежи.

Литература

Бояджиев, М., Л. Георгиев. *Управление на газовата инфраструктура*. МГУ София,190 р., ISBN 9128-7892. TN880.5.M455 2005 665.7'44--dc22

Георгиев, Л., Н. Лаков. (2011). Анализ на възможностите за производство на електрическа енергия от различни енергийни източници, *Девета научно -практическа сесия*, София, 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. ISBN 2682-952.

Karadjov, M. (2022). Design, construction, maintenance and service of domestic hybrid systems using natural gas. *Mining and Geology 9*.

Karadjov, M. (2021). Problems, opportunities and solutions for the gas supply of households in Bulgaria. *Min. and Geo. Sci. 2*.

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.

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.)

Министерски съвет. (2019). Национална стратегия за адаптация към изменението на климата и План за действие до 2030 г., София: Министерски съвет.

НАРЕДБА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ (в сила от 03.09.2004, приета с ПМС № 171 от 16.07.2004).

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.).

MODERN TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS FOR THE DEVELOPMENT AND EXPLOITATION OF SHALE GAS FIELDS

Lachezar Georgiev, Martin Boyadzhiev

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

ABSTRACT. The report analyses the modern technologies and technical means for the development and exploitation of shale gas fields. The development of shale gas fields is carried out by drilling several wells with horizontal sections from one working site and applying the hydraulic fracturing technology. , In world practice, complex hydromechanical impact in combination with physicochemical impact is widely applied as a highly efficient method in gas extraction from shale gas fields. For each specific shale gas field, the technologies and technical means of development and exploitation must take into account the specific characteristics of the shale formation and the geological conditions.

Key words: shale gas, development, exploitation.

СЪВРЕМЕННИ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА РАЗРАБОТКА И ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА НАХОДИЩА НА ШИСТОВ ГАЗ

Лъчезар Георгиев, Мартин Бояджиев

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

РЕЗЮМЕ. В доклада е направен анализ на съвременните технологии и технически средства за разработка и експлоатация на находища на шистов газ. Разработването на находища на шистов газ се осъществява чрез прокарването на няколко сондажа с хоризонтални участъци от една работна площадка и прилагането на технологията хидравлично разкъсване. В световната практика като високоефективен метод широко приложение при добива на газ от находища на шистов газ се прилага комплексно хидромеханично и съчетаното с него физикохимично въздействие. При всяко конкретно находище на шистов газ технологиите и техническите средства за разработка и експлоатация трябва да се съобразяват със специфичните характеристики на шистовата формация и геоложките условия.

Ключови думи: шистов газ, разработка, експлоатация.

Introduction

Shale gas is natural gas extracted from deposits composed of clay-rich, low-permeability rocks that either contain gas in a free state or absorb it on clay surfaces. The development of gas deposits containing argillite layers involves the drilling of multiple wells with horizontal sections from a single working site, utilising hydraulic fracturing technology or techniques aimed at enhancing the permeability of the argillite layer. The design of the wells ensures reliable isolation of aquifers and geological layers during the stimulation of the shale formation and the operation of the wells. All casing strings installed within the well are cemented to the surface.

The selected steel grade and diameter of the production casing string must satisfy the requirements necessary for conducting perforation operations within the well and for executing hydraulic fracturing of the layer. Throughout the development of the argillite formation, observation wells are also drilled across the area to the depth of the first aquifer. The primary objective of the observation wells is to monitor and prevent contamination of the aquifer.

Technologies for shale gas extraction

Current technologies used include:

1. Hydraulic fracturing;
   - 1.1. With water;
   - 1.2. With liquefied gases;
   - 1.3 With inert gases;
2. Hydromechanical impact;
3. Multilateral drilling with horizontal sections and subsequent deep perforation.

The hydraulic fracturing method is fundamentally rooted in a process wherein a fluid is injected into the bottomhole zone of a well at high velocity, a quantity of which exceeds the absorption capacity of the geological formation. This results in an increase in bottomhole pressure, which, upon reaching a critical threshold, surpasses the pressure at which the rock maintains its structural integrity (Gerov, 2019). Consequently, the rock is fractured along planes characterised by minimal strength, leading to the formation of various crack types, including vertical and horizontal orientations. Figure 1 illustrates the hydraulic fracturing of the geological formation.

The initial implementation of hydraulic fracturing was recorded in 1947, executed in a gas well at the Hugoton gas field in the United States at a depth of 740 metres. To date, there have been over 400,000 gas wells in the United States where hydraulic fracturing has been performed. This milestone marked the beginning of extensive scientific, experimental, and industrial investigations aimed at the enhancement of hydraulic fracturing technologies.

In the context of domestic advancements, between 1967 and 1970, three experimental-industrial operations for hydraulic fracturing were conducted. The targeted formation was the Lower Triassic horizon, identified in the E-24 and E-26 wells located within the Chiren gas condensate field. Gas condensate served as the fracturing fluid, while a condensate-water emulsion was employed as the transporting fluid (Gerov, 2019).

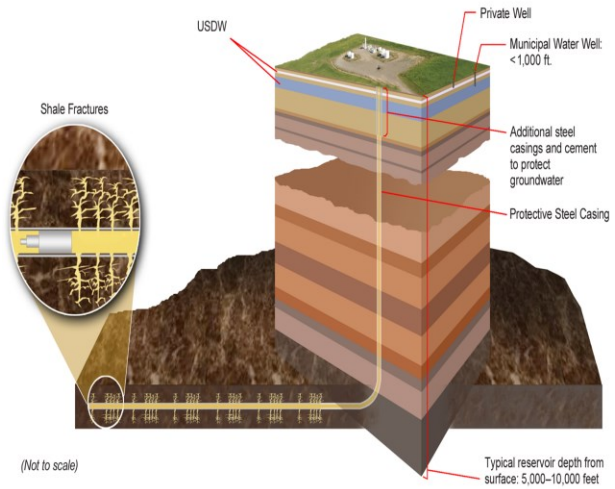


Fig 1: Hydraulic fracturing illustration.

The fluids employed in hydraulic fracturing operations may include water-based liquids, hydrocarbon-based fluids, gas-liquid systems, and gaseous agents, such as liquefied hydrocarbon gas, nitrogen, and carbon dioxide. The utilisation of liquefied hydrocarbon gas, nitrogen, or carbon dioxide significantly reduces the reliance on large volumes of water and the need for subsequent wastewater treatment. Typically, over 1300 cubic meters of water are required for the hydraulic fracturing of a single well.

Figure 2 illustrates the composition of a water-based fracturing fluid. As indicated, the fluid comprises 99.2% water, with the remaining 0.79% consisting of chemical additives designed to reduce hydraulic resistance and regulate the pH of the fracturing environment.

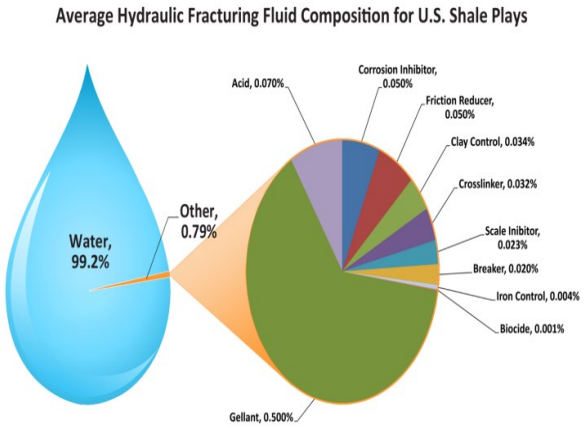


Fig. 2. Composition of a water-based fluid used in hydraulic fracturing

To ensure that the induced fractures remain open after the bottom-hole pressure declines to pre-treatment levels, a proppant material is introduced. This reinforcing agent serves to stabilise the fractures and is generally composed of:

- Quartz sand fractions;
- Synthetic ceramic proppants;
- Medium-strength ceramic proppants.

Key Requirements for Hydraulic Fracturing Fluids:

1. They must be environmentally safe and should not contaminate the natural environment upon their return from the formation.
2. They should exhibit high thermal stability and retain their structural integrity during flow.
3. They must possess low corrosive activity.
4. They should be easily degradable after the completion of the operation, facilitating their recovery during well exploitation.
5. They must enable efficient transport of the proppant material throughout the fracture propagation process.
6. They should exhibit the required viscosity to ensure the creation of fractures with the designed length, height, and aperture.
7. They must be easily and reliably prepared during on-site operations.
8. They should have a relatively low cost of production.

Factors Determining the Appropriate Type of Fracturing Fluid (Gerov, 2019):

1. Type of hydraulic fracturing: local, conventional, deep, massive, or selective;
2. Type of reservoir;
3. Reservoir characteristics: permeability, porosity, and natural fracturing;
4. Physicomechanical properties of the reservoir rock;
5. Thermobaric (temperature and pressure) conditions.

Multilateral drilling with horizontal sections followed by gas-mechanical stimulation is expected to find extensive application in shale gas extraction.

Figure 3 illustrates multilateral drilling with horizontal sections from a single well pad, followed by gas-mechanical stimulation. This approach provides an expanded drainage area and enables large-scale stimulation through the application of multistage gas-mechanical treatments.

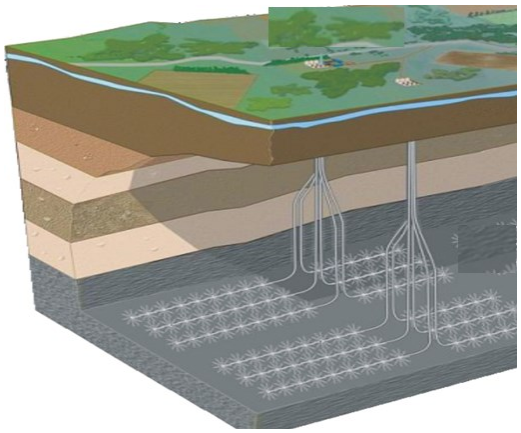


Fig. 3. Multilateral drilling with horizontal sections and subsequent deep perforation.

In this fracturing technique, the impact caused by the secondary high-pressure gas wave typically extends only a few meters from the wellbore. Gas-mechanical stimulation is primarily conducted in wells with horizontal sections.

For the development of shale gas fields, multilateral drilling can be applied using various well completion configurations, including stacked, dual, fishbone-type, radial, or hybrid designs (Georgiev, 2023).

Figure 4 presents a schematic diagram of the fishbone configuration.



Fig. 4. Schematic diagram of the fishbone configuration.

Modelling the initiation, control, and propagation of fractures in each specific case determines the optimal technology for developing gas fields that intersect argillite formations by enhancing the permeability of the argillite layer. To this end, modelling approaches are employed to solve two-dimensional problems for defining and controlling the spread and length of the induced fractures. The pressure at which formation fracturing occurs is primarily influenced by the following factors:

- the physicomechanical properties of the rocks,
- the filtration characteristics of the reservoir rock,
- the distribution of geostatic pressure.

To evaluate the effectiveness of a hydraulic fracturing operation, it is essential to conduct a comprehensive set of well logging, geophysical, and hydro-gasodynamic tests.

The primary modern technical equipment used in implementing hydraulic fracturing technology includes high-pressure pumping units, mixers, a reservoir for the working fluid, a reservoir for wastewater generated after the operation, and a flare line. These components are connected to the wellhead via a manifold system. In contemporary setups, the entire process is managed and monitored through automated control systems.

In Northern Bulgaria, geological exploration studies have identified several areas suitable for shale gas exploration, associated with various lithostratigraphic units (Zaneva-Dobranova, 2012).

Conclusion

In addition to the technical and technological aspects of this issue, environmental risk assessment plays a critical role in the implementation of hydraulic fracturing technologies. The high level of advancement in technical and technological solutions in recent years enables the risk to be predicted, controlled, managed, and ultimately avoided. For each specific shale gas deposit, the technologies and technical means for development and exploitation must be adapted to the unique characteristics of the shale formation and the prevailing geological conditions.

In Bulgaria and its maritime zone in the Black Sea, it is essential to resume the exploration and investigation of unconventional energy resources, including shale gas. A reconsideration of the moratorium banning the application of hydraulic fracturing ("fracking") technologies in Bulgaria – adopted by the National Assembly on the grounds of presumed severe environmental harm – is necessary.

The adoption of this moratorium is counterproductive, particularly considering that the existing Subsurface Resources Act already prohibits the use of technologies that harm the environment, provided such harm is substantiated through environmental impact assessments and compatibility evaluations conducted by qualified experts.

References

Gerov, L. (2019). *Natural gas production and storage*. MGU "St. Iv. Rilski", Sofia, MGU, Sofia (in Bulgarian)

Georgiev L. (2023). *Integrated forecasting model of gas field development with horizontal wells*, BMGC Commerce Ltd (in Bulgarian)

Zaneva-Dobranova, E., Lyomov, Sht., Angelov, A. (2012). *Unconventional sources of hydrocarbon resources, technologies and environmental challenges*. MGU, Sofia. (in Bulgarian)

https://www.energy.gov/fecm/hydraulic-fracturing-technology

https://www.energy.gov/fecm/articles/shale-gas-development-challenges-fracture-fluids

ANALYSIS AND CHARACTERISTICS OF MECHANICAL STIRRERS USED IN BIOTECHNOLOGICAL PRODUCTION

Svetlozar Grozdanov, Evgeni Kraychev

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

Abstract: Mechanical stirrers are a fundamental component in numerous industrial processes, ensuring effective mixing, heat and mass transfer, and the suspending of various substances. This article presents an in-depth analysis of the design characteristics and operating principles of the main types of mechanical stirring devices. Their application and specific requirements are examined across four key sectors: the food, chemical, pharmaceutical, and biotechnological industries. Emphasis is put on the impact of impeller blade geometry on the process efficiency, final product quality, and energy consumption. Practical examples are provided, and current trends in the development of mixing technologies are discussed.

Keywords: mechanical stirrers, mixing, stirrer geometry, mixing efficiency, energy consumption.

АНАЛИЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МЕХАНИЧНИ БЪРКАЧКИ С ПРИЛОЖЕНИЕ В БИОТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПРОИЗВОДСТВА

Светлозар Грозданов, Евгени Крайчев

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

Резюме: Механичните бъркачки са фундаментален елемент в множество индустриални процеси, осигурявайки ефективно смесване, топло- и масопренос и суспендиране на различни вещества. Тази статия представя задълбочен анализ на конструктивните характеристики и принципите на действие на основните типове механични разбъркващи устройства. Разгледано е тяхното приложение и специфичните изисквания в четири ключови сектора: хранително-вкусовата, химическата, фармацевтичната и биотехнологичната промишленост. Акцент е поставен върху влиянието на геометрията на лопатките на бъркачката, върху ефективността на процесите, качеството на крайния продукт и енергийната консумация. Представени са примери от практиката и са дискутирани съвременни тенденции в развитието на технологиите на разбъркване.

Ключови думи: механични бъркачки, разбъркване, геометрия на бъркачки, ефективност на разбъркване, енергийна консумация.

Introduction

Biotechnological production relies significantly on effective mixing and agitation to ensure optimal conditions for a variety of processes. Mechanical stirrers are devices used to create controlled motion in liquid or semi-liquid media with the aim of achieving homogenisation, dissolution, and suspending of solid particles, dispersion of liquids, and enhancement of heat and mass transfer processes. Their importance is undeniable across a wide range of industrial applications, including the production of food and beverages, pharmaceuticals, polymers, paints, cosmetics, as well as in biotechnological processes, such as fermentation and cell cultures. The proper selection and design of a stirrer is a critical factor in optimising production processes, ensuring product quality, and minimising energy consumption. The specific requirements of different biotechnological applications necessitate a careful analysis of stirrer characteristics and their interaction with biological systems (Asenov, 1990).

This article aims to provide a comprehensive analysis of the main types of mechanical stirrers, to examine their structural features and principles of operation, and to explore the specific requirements and applications in the food, chemical, and biotechnological industries (Kolarov, 2003).

Liquid Flow in Vessels with Agitators

The agitator, positioned within the vessel containing the liquid, transfers the inertia from the motor to the liquid, thereby inducing its movement and enabling mixing. This transfer of inertia is due to the pressure exerted by the agitator blades on the liquid. As a result of this motion, a portion of the liquid flows around the edge of the impeller and mixes with the surrounding fluid, which begins to rotate in the direction of the agitator’s rotation. A low-pressure zone forms behind the blade, causing liquid from the surrounding area to be drawn in. Due to the flow and suction effects, turbulent vortices appear near the blades.

As the liquid rotates, centrifugal forces arise, causing the fluid to move radially from the impeller periphery toward the vessel walls, while simultaneously being drawn toward the centre of the impeller. The fluid flow within the vessel, induced by the agitator, is characterised by streamlining (Panev et al., 1966). Depending on the direction of the currents, there are three main types of flow: tangential, radial, and axial (Fig. 1).

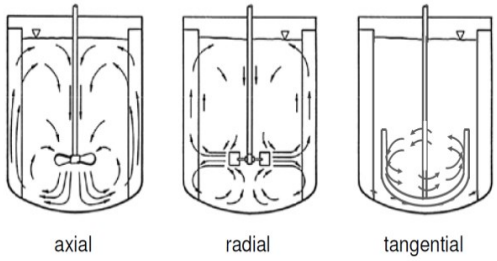


Fig. 1. Main types of flow

- **Axial Flow**

-The liquid moves parallel to the axis of rotation of the agitator (either downward or upward).
-Typical for propeller-shaped, helical, and other energy-efficient impeller designs.
-Provides effective displacement of large fluid volumes and is often used for homogenisation and heat exchange.

● **Radial Flow**

-The liquid is expelled perpendicular to the axis of rotation.
-Common in turbine agitators.
-Produces high shear forces, suitable for gas dispersion or solid particle suspending.

● **Tangential Flow**

-The liquid moves in a circular trajectory around the axis of rotation.
-Predominates when there are insufficient guiding elements (baffles), or in low-viscosity fluids.
-May lead to the formation of a vortex effect, which is undesirable in certain processes.

The mechanical agitator, placed in the centre of the vessel, induces the rotational movement of the entire liquid volume, which results in a centrifugal force. In this case, the free surface of the liquid takes the shape of a paraboloid of revolution. At low rotational speeds, a slight depression of the liquid level near the shaft is observed. As the rotational speed increases, the resulting vortex gradually deepens and can reach the stirring device. To prevent vortex formation, or to reduce its depth, vertical baffles (1) are installed in the vessel (Fig. 2). In this figure, the solid line represents the vortex formed in the absence of baffles, while the dashed line shows the reduced vortex depth when baffles are present (Nevenkin et al.,1995).

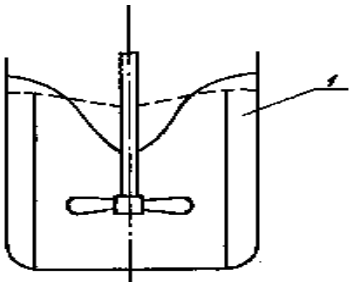


Fig. 2. Formation of a vortex in a vessel with an agitator

Flow Regime (Reynolds Number, Re)

The Reynolds number (Re) is a dimensionless quantity used in fluid mechanics to determine the type of fluid flow: laminar, transitional, or turbulent. It represents the ratio of inertial forces to viscous forces within the fluid. Inertial forces are related to the motion of the fluid, while viscous forces arise from internal friction within the fluid. It is defined by the following formula:

$$Re = \frac{N \cdot \rho \cdot D^2}{\mu} \quad (1)$$

where:

N is the rotational speed of the agitator (s^{-1}),
ρ – fluid density (kg/m^3),
D – diameter of the agitator (m),
μ – dynamic viscosity (Pa.s).

The Reynolds number (or criterion) is essential for determining the flow regime of the fluid (Fig. 3):

● **Laminar Flow (Re < 2300)**
-The movement is orderly, without intermixing of layers.
-Occurs with viscous fluids and at low velocities.
-Mixing is primarily based on molecular diffusion.

● **Transitional Flow (2300 < Re < 10,000)**
-Partially developed turbulence.
-Mixing improves due to the disruption of laminar layers.

● **Turbulent Flow (Re > 10,000)**
-The flow is chaotic, with rapid and efficient mixing.
-Main mixing mechanism: energetic breakup of fluid volumes.

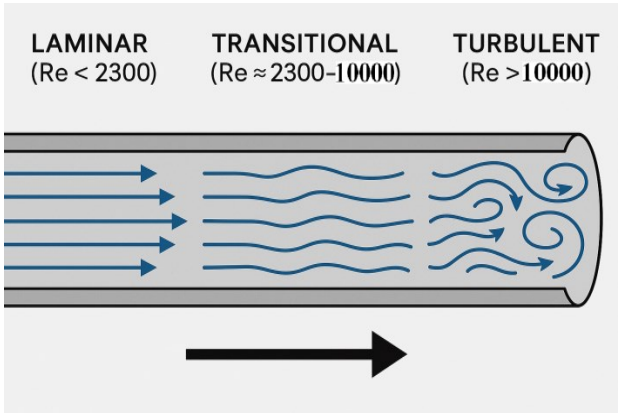


Fig. 3. Fluid flow regimes

Main Types of Mechanical Agitators for Biotechnological Applications and Their Characteristics

Various types of mechanical mixing device are used in biotechnological reactors, differing in their geometry, flow generation method, and application. Some of the most commonly used types include:

Propeller Agitators: These consist of one or more blades mounted on a shaft. They primarily generate axial flow, directed parallel to the shaft. They are effective for mixing low-viscosity liquids and for suspending solid particles at low concentrations. Propeller agitators are often used in smaller bioreactors. This type of agitator (Fig. 4) is efficient in situations where significant liquid circulation is required within the vessel, while keeping mechanical energy consumption to a minimum (Decheva et al., 2013).

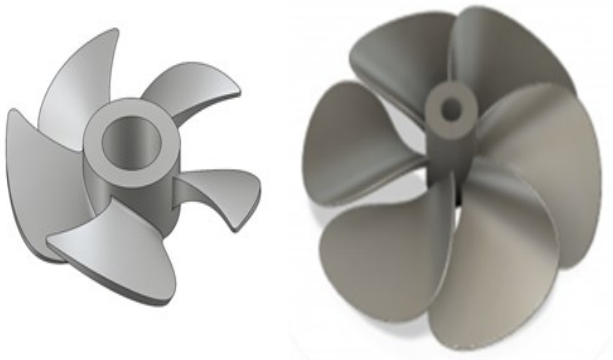


Fig. 4. Propeller agitators

Turbine Agitators: These are characterised by flat or curved blades mounted radially on the shaft (Fig. 5). They generate a strong radial flow that is directed toward the vessel walls and then returns to the center. Turbine agitators are suitable for mixing higher-viscosity liquids, liquid–liquid dispersion, and intensive heat transfer. Variants include flat-blade turbines (Rushton turbine), pitched-blade turbines, and others (Kraychev & Yordanov, 2003).

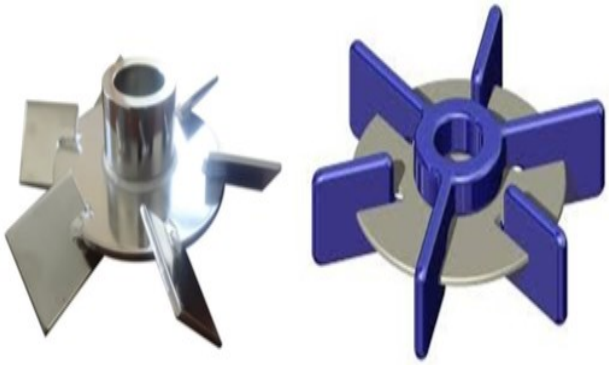


Fig. 5. Turbine agitators

Anchor and Frame Agitators: The shape of these agitators matches the contour of the vessel bottom and walls, with minimal clearance. This type primarily generates tangential flow and is effective for mixing high-viscosity liquids and preventing material buildup on the vessel walls (Fig. 6).

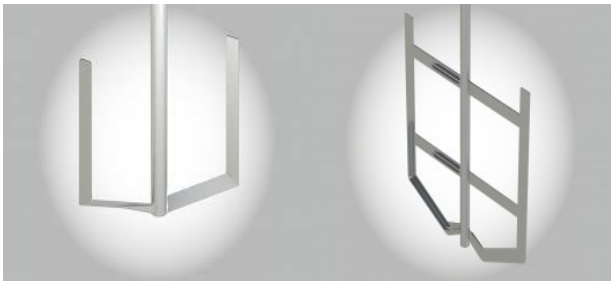


Fig. 6. Anchor and frame agitators

Spiral (Helical) Agitators: These consist of a helical ribbon mounted on a shaft. They generate axial flow with minimal turbulence, making them suitable for mixing very high-viscosity liquids and sensitive materials (Kraychev & Yordanov, 2003).

Specialised Agitators: This category includes various designs optimised for specific applications, such as agitators for emulsification, aeration, or operation under high pressure and temperature (Zhelyazkov, 1975).

The main characteristics determining the effectiveness of mechanical agitators include:

● **Agitator geometry:** Diameter, number, and shape of blades, blade pitch angle.
● **Rotational speed:** Determines mixing intensity and power consumption.
● **Agitator positioning in the vessel:** Height from the bottom, number of agitators on the shaft.
● **Presence of baffles:** Improves turbulence and prevents vortex formation, especially with turbine agitators.
● **Fluid viscosity:** Significantly affects the flow regime (laminar or turbulent) and the required power input.
● **Density of the fluid and the suspended particles:** Influences the efficiency of suspending and mixing.
● **Energy efficiency:** Minimisation of power consumption.
● **Use of empirical correlations, numerical simulations** (Computational Fluid Dynamics – CFD Fluent 6.0), **and experimental studies** for optimising the design and operating parameters of the mixing system (Sendov et al., 1994).

Application of Mechanical Agitators in Industry

In the food and beverage industry, mechanical agitators are used in a wide range of processes, including the mixing of ingredients, heat transfer, suspending, emulsification, aeration, and more.

The chemical and pharmaceutical industries are also major users of mechanical agitators, which are employed in various processes, such as reaction operations, dissolution, suspending, dispersion, heat and mass transfer.

Biotechnological production represents a specific area where mechanical agitators play a key role in processes, such as fermentation, cell cultures, and biocatalysts (Chisti, 1999).

Several key characteristics and operating parameters determine the efficiency of mechanical agitators:

● **Mixing efficiency:** The ability of the stirring device to create a homogeneous environment in the reactor within a certain period and with specific energy consumption.
● **Mass transfer:** Particularly important in aerobic processes, where the agitator facilitates the dissolution of oxygen in the liquid phase and its transfer to the microorganisms or cells. The mass transfer coefficient (k_La) is a key parameter.
● **Heat transfer:** Maintaining an optimal temperature is critical for biological processes. The agitator contributes to the uniform distribution of heat within the reactor.
● **Shear rate:** The mechanical shear created by the rotation of the agitator can be both beneficial (e.g. for cell disruption) and detrimental (e.g. to sensitive cells). The shear level must be carefully controlled.
● **Energy consumption:** Energy efficiency is an important factor for the cost-effectiveness of biotechnological processes. Different types of agitators have varying energy demands to achieve a pre-set level of mixing.
● **Construction materials:** Agitators are typically made of stainless steel or other biocompatible materials that do not interact with the culture medium or the products (Kolarov, 2003).

Energy Consumption during Mixing

The process of liquid mixing depends on the shape and dimensions of the vessel and the stirrer, the rotation speed of the stirrer, and the physical properties of the liquid. The power required to drive a mechanical stirrer is a key parameter in the design and operation of processes involving the mixing of liquids, suspensions, or emulsions. It directly affects the

efficiency of mixing, homogenisation, dispersion, heat transfer, and other related processes (Nienow, 1997).

The main factors affecting mixing power are:

● **Fluid viscosity:** For low-viscosity liquids (such as water or low-concentration solutions), power is mainly determined by inertial forces and is proportional to the square or cube of the stirrer's rotational speed.

With high-viscosity liquids (such as polymer solutions or suspensions), viscous forces become dominant, and the power is linearly proportional to the stirrer speed.

● **Fluid density:** Fluid density influences inertial forces and, therefore, the power requirement, especially under turbulent operating conditions.

● **Stirrer geometry:**

-Type of stirrer: Different types of stirrers (e.g., anchor, turbine, propeller, helical) generate different hydrodynamic fields and require varying amounts of power to achieve a specific level of mixing.
-Stirrer diameter: Power is generally proportional to the fifth power of the stirrer diameter in turbulent regimes. Larger stirrers require significantly more power to operate at the same speed.
-Number and shape of blades: The number and shape of the blades influence the generated turbulence and shear forces, which in turn affect the required power.

● **Vessel geometry:**

-Vessel diameter: The ratio between the stirrer diameter and the vessel diameter is an important factor. Larger vessels require more power to ensure adequate mixing.
-Liquid height: The height of the liquid affects hydrostatic pressure and fluid circulation.
-Presence of baffles: Baffles in the vessel prevent the formation of a rotating vortex and improve vertical mixing; however, they may also increase the required power.

● **Stirrer rotational speed:** Power is highly dependent on the stirrer speed. Under turbulent flow conditions, power is proportional to the cube of the rotational speed, while under laminar flow, it is proportional to the square of the speed (Joshi et al., 2004).

To characterise the mixing regime and determine the required power, dimensionless numbers and coefficients are used (Kraychev, 2014):
-Reynolds number for mixing (Re): This determines the flow regime (laminar, transitional, turbulent)

-Power coefficient (N_P or K_N): A dimensionless coefficient that depends on the geometry of the stirrer and vessel, as well as on the Reynolds number. It is determined experimentally or through empirical correlations (Hosseini et al., 2016).

● **Calculation of mixing power (P):**

$$P = K_N \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (2)$$

where:

P is the power (W),
K_N – power coefficient,
ρ – fluid density (kg/m³),
N – stirrer rotational speed (s^{-1}),
D – stirrer diameter (m).

● **Power coefficient (K_N) in mixing:** A dimensionless quantity that relates the power consumed by the stirrer to the fluid density, stirrer speed, and stirrer diameter, as well as the flow regime defined by the Reynolds number (Kraychev et al., 2004). It is a key parameter in the design and analysis of processes involving mechanical mixing (Kraychev, 2020). It is calculated using the formula:

$$K_N = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad (3)$$

where:

P is the power (W),
ρ – fluid density (kg/m³),
N – stirrer rotational speed (s^{-1}),
D – stirrer diameter (m).

Conclusion

Mechanical agitators are an indispensable component in a wide range of industrial processes in the food, chemical, pharmaceutical, and biotechnological industries, providing the necessary conditions for the efficient progress of processes. The variety of stirring devices and their specific characteristics allow for adaptation to different process requirements and fluid properties. The effective selection and design of the mixing system is crucial for optimising production processes, ensuring product quality, and minimising energy consumption. Current trends are focused on increasing energy efficiency, improving hygiene, and developing specialised and intelligent mixing technologies.

References

Asenov A., Encheva M., Panev P., (1990). Protsesi i aparati v khimichnite i biotehnologichnite proizvodstva. Zemizdat-Sofiya str.158–164.

Chisti, Y. (1999). Hydrodynamic behaviour of airlift bioreactors. Chemical Engineering Journal, 73(3), pp 171-183.

Decheva S., Hinkov I., Karsheva M., Dyankov S., (18-19.10.2013). Modelirane na hidrodinamikata v tsilindrichni sadove s razbarkvane, Hranitelna nauka, tehnika i tehnologii, Plovdiv.

Garcia-Ochoa, F., & Gomez, E. (2009). Bioreactor scale-up and operation. Biotechnology Advances, 27(6),pp 851-876.

Hosseini, S. S., Khajehpour, M., & Rahimzadeh, A. (2016). A review on mixing in bioreactors. *Chemical Engineering & Technology, 39*(6), pp 967-978

Joshi, J. B., Pandit, A. B., & Sharma, M. M. (2004). Mechanically agitated gas-liquid reactors. Chemical Engineering Science, 59(19), pp 5893-5933.

Kolarov, K., (2003). Protsesi i aparati v hranitelno-vkusovata promishlenost. Matkom str.121–127.

Kraychev, E. (2014). Generalised Criterion for the Efficiency of a New Stirring and Gas-Supply Device “NRE-KM”.

Kraychev, E. (2020). Research and Experimental Determination of the Power Coefficient of a New Type Mixing Device “KS–3.1 PM”.

Kraychev, E., Yordanov, V. (2003). Heat Exchange during Stirring in a Liquid Medium in a Laboratory Reactor with a New Type of Axial Impeller, Faculty of Electronic Engineering and Technology, Technical University of Sofia.

Kraychev, E., Yordanov, V., Popova, I. (2004). Experimental Determination of the Power Number of a New Type of Mechanical Stirring Device – Axial Impeller, Faculty of Electronic Engineering and Technology, Technical University of Sofia.

Nevenkin S., Demirev D., Mihaylova E., Kraychev S., (1995). Mashini i aparati v himicheskata promishlenost. Tehnika-Sofiya str.3–26.

Nienow, A. W. (1997). Reactor agitation. *Chemical Engineering Science, 52*(14), pp 2571-2603.

Panev P., Bogdev A., Mitev D., Kasabov I., (1966). Narachnik na inzhener-himika. Tekhnika-Sofiya str. 907–1008.

Sendov S., Kraychev S., (1994). Mashini, aparati i instalatsii v biotehnologiyata. TU-Sofiya str.148–179.

Zhelyazkov I., Kraychev S., (1975). Mashini, aparati i saoryazheniya v himicheskata promishlenost. Tehnika-Sofiya str.191–200.

ANALYSIS OF THE CURRENT REGULATORY FRAMEWORK IN THE FIELD OF DISTRIBUTION AND SUPPLY OF NATURAL GAS, ELECTRICITY, AND WATER FOR HOUSEHOLD CONSUMERS. PROPOSALS FOR UPDATING

Mario Karadjov

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

ABSTRACT: The article analyses the main standards in force in the field of natural gas, electricity and water supply to household consumers and the related activities for design*ing*, construction, commissioning, and maintenance of these installations along with proposals for update. The necessary administrative approaches and changes in the current legislation are proposed for clearer regulation of the described activities in order to ensure reliability and safe operation and protection of the consumers' rights.

Key words: natural gas, electricity, water for households, regulation framework, standards.

АНАЛИЗ НА ДЕЙСТВАЩАТА НОРМАТИВНА УРЕДБА В ОБЛАСТТА НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО И ДОСТАВКИТЕ НА ПРИРОДЕН ГАЗ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ И ВОДА ЗА БИТОВИ ПОТРЕБИТЕЛИ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА АКТУАЛИЗАЦИЯ

Марио Караджов

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

РЕЗЮМЕ. В статията са анализирани основните действащи норми в областта на газоснабдяването, електроснабдяването и водоснабдяването на битови потребители и свързаните с това дейности по проектиране, изграждане, въвеждане в експлоатация и поддръжка на тези инсталации и предложения за актуализация. Предложени са необходимите административни подходи и промени в действащото законодателство за по-ясно регламентиране на описаните дейности за гарантиране на надеждност и безопасна експлоатация и защита на интересите и правата на ползвателите.

Ключови думи: природен газ, електрическа енергия, вода за битови нужди, нормативна уредба, стандарти.

Въведение

Настоящата статия е провокирана от генералното несъответствие между действащата нормативна уредба в Р. България и защитата на интересите на битовите потребители относно доставките на природен газ, електрическа енергия и вода за тях. Това несъответствие много ясно започна да личи в последните няколко години, основно в резултат на мащабното строителство на многофамилни жилищни сгради и затворени комплекси. Проявлението в различните сектори (природен газ, електрическа енергия или вода) е различно, което също е парадокс. Малка част от проблемите, чрез конкретни казуси, са показани в следващите части, посветени на отделните енергоносители.

Общото при доставките на природен газ, електрическа енергия или вода е, че се регулират от специален държавен орган КЕВР (Комисия за енергийно и водно регулиране) с милионен годишен бюджет. Този орган обаче не работи в полза на потребителите, които „де факто“ го издържат, а работи единствено и само в полза на разпределителните компании. Доказателствата са много, но най-очевадното е това, че КЕВР (от създаването си до днес) не е инициирала нито един проект на нормативен акт, които да регламентира правата и задълженията както на доставчиците на енергоносители, така и на потребителите (домакинства).

Газоснабдяване на битови потребители

Анализ на нормативната уредба

Към настоящия момент дейностите по пренос, разпределение и използване на природен газ са регламентирани в Закона за енергетика и издадените на база на чл. 200 от него, по ал.1: НАРЕДБА за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ и по ал. 2: НАРЕДБА № 6 за технически правила и нормативи за проектиране, изграждане и ползване на обектите и съоръженията за пренос, съхранение, разпределение и доставка на природен газ.

Равноправно приложими са и:

- Закон за устройство на територията /ЗУТ/;
- Закон за техническите изисквания към продуктите и техните подзаконови нормативни актове;
- Закон за КИИП (камара на инженерите в инвестиционното проектиране);
- Наредба № Із-1971 - за строително - технически норми за осигуряване на безопасност при пожар.

Странното е, че при тази сравнително малка нормативна база винаги се появяват несъответствия между нормативите. Анализирани са само няколко фрапиращи примери:

1. За гарантиране на безопасност на съоръженията и газовите инсталации в общи части на еднофамилни и многофамилни жилищни сгради, най-важното е да се осигури естествена вентилация на обема, в които тези съоръжения и инсталации са монтирани. След редакцията на ЗУТ в 2015 г., (чл.151, ал.(1), т.10) общините и строителният надзор решиха, че проектите за сградни газови инсталации /СГИ/ няма да се внасят за разрешение за строеж с останалите части на инвестиционните проекти за строеж на еднофамилни или многофамилни жилищни сгради. Това автоматично доведе до непредставяне на тези проекти (за СГИ) и за съгласуване в съответните Пожарни

служби.

Съгласно ЗУТ след изграждане на строителен обект (сграда) се пристъпва към неговото приемане за въвеждане в експлоатация. Едва на този етап представителите на ГД ПБЗН за първи път виждат газовите съоръжения и инсталации и много често предписват мерки за тяхната промяна. Същевременно от ГД ПБЗН отказват да изготвят точни писмени предписания за проектиране на СГИ (аргументират се , че в тяхната Наредба № Із-1971 е казано да се спазват наредбите по чл. 200 от ЗЕ).

Как да се излезе от тази ситуация – само чрез адекватни промени на горепосочените нормативи.

2. Проектиране на СГИ – съгласно ЗУТ и ЗКИИП, проектите е задължително да се извършват от проектанти с ППП (пълна проектантска правоспособност) за съответната част. Тук идва безхаберието на ръководството на КИИП. Те създават собствени правила за издаване на ППП, които в много случаи противоречат на закона за Висшето образование и самият закон за КИИП. (Доказателствата са на сайта на КИИП в издадените от ръководството на КИИП професионални изисквания за ППП, създадени на база на учебни планове на определени Висши училища и естествено пренебрегващи останалите.) Явен пример е това, че проектът на СГИ на газифицирана къща в гр. Банкя, която се взриви през февруари 2025 г., е изготвен от проектант с ППП по част Водно строителство!

3. Проектите за СГИ се “заверяват“ от лицензирани лица за независим технически надзор на СПО. На практика повечето от тези лица са професионално некомпетентни и одобряват проекти, които рядко съответстват на нормативните изисквания (може да се докаже чрез произволно избрана проверка на заверени проекти).

4. На база на проектите по т. 2. и т. 3. изпълнителите на СГИ “изготвят“ изискуемата от нормите изпълнителска документация, която също рядко съответства на нормативните изисквания (може да се докаже, като се изиска от едно газоразпределително предприятие произволна изпълнителна документация на обект и се сравни с нормативните изисквания).

5. Газоразпределителните предприятия /ГРПр/ не прилагат еднозначно действащата нормативна уредба по въвеждане в експлоатация на СГИ. Има се предвид, че самопроизволно си определят правила спрямо клиентите си относно това какви документи да изискват за присъединяването им към ГРМ. А работа на КЕВР и на ГД ИДТН (Главна дирекция Инспекция за държавен технически надзор) е да сложат ред в тази работа, защото тяхното бездействие позволява на ГРПр да злоупотребяват с естествения си монопол за разпределение на природен газ на съответната територия като монополизират и останалите дейности по проектиране, изграждане, технически надзор и поддръжка на СГИ.

6. Технически надзор на СГИ – тема, която беше повдигната и при последния взрив на газифицирана къща в гр. Банкя през февруари 2025 г. За мен лично техническият надзор на СГИ в сегашният му вид е най-вредното звено в битовата газификация. Той създава изкуствено чувство за безопасност у потребителите, като “извършва“ платени ежегодни проверки на СГИ. Предложенията за промяна виж в т. I. 2.

Предложения за промяна/актуализация на действащата нормативна уредба

1. Промяната на съотносимата нормативна уредба трябва да се реализира чрез участието на широк кръг специалисти (а не, както досега, да се привличат само представители на пряко заинтересованите ГРПр, маскирани през Асоциации).

2. Необходима е нова структура и актуализация на действащата нормативна уредба в областта на газоснабдяването, като например:

2.1. Да се разделят отделните дейности на сектори:
- Сектор: Пренос и съхранение на природен газ;
- Сектор: Разпределение на природен газ;
- Сектор: Промишлени газови уреди и инсталации;
- Сектор: Обществено-административни газови уреди и инсталации;
- Сектор: Битови газови уреди и инсталации.

2.2. За всеки сектор по т. 2.1. да има отделен документ (например наредба), която да се състои от отделни раздели:
- Раздел I: Проектиране;
- Раздел II: Материали (уреди, фитинги, тръби и др.), допустими за влагане в конкретните газови съоръжения и инсталации;
- Раздел III: Изисквания към персонала за изграждане, поддръжка, ремонт или преустройство на съответните газови уреди, мрежи или инсталации:

В този раздел е изключително важно за всеки сектор да има конкретни изисквания и за юридическото лице /ЮЛ/, чрез което сертифицираният персонал ще извършва съответната дейност. Да се излезе от стереотипа, че само юридически лица могат да извършват дейности по изграждане, поддръжка и ремонт на газови съоръжения и инсталации (съобразно сектора)!

Това е особено важно за битовата газификация. Така или иначе всеки специалист-физическо лице /ФЛ/ е необходимо да е сертифициран за съответния тип дейност. Тези сертификати са пожизнени. Съставът на ЮЛ, което има право на поддръжка и ремонт на газови съоръжения и инсталации е именно от сертифицирани ФЛ. Ако ЮЛ бъде заличено по някаква причина, ФЛ остава. Така битовият потребител /БП/ ще може да избира между различни сертифицирани ФЛ или ЮЛ.

Този подход ще намали финансовата тежест върху БП и ще направи техническия надзор излишен. Въпросът е, защо е необходимо ползвателите на природен газ да плащат за формални проверки, след които отново те (ползвателите) остават отговорни за своите газови инсталации. Предложението ми в областта с Техническия надзор е за генерална промяна, както следва:

1. Съответната газова инсталация се изгражда от сертифициран персонал съгласно Радел III от (т. 2.2.);
2. Този изпълнител изготвя изпълнителска документация с чертежи, сертификати, протоколи от изпитания и т.н.;
3. Копие от така изготвената документация се представя в съответното Газоразпределително предприятие на база, на която то присъединява съответния потребител. Задължително Изпълнителят провежда инструктаж на Ползвателя за работа с монтираните му газови

уреди и инсталации и за действия при пропуск на газ или аварии. Инструктажът се удостоверява с подписи на страните.

4. Ежегодно Ползвателят е длъжен да осигури сертифицирана фирма (може и да е различна от изградилата газовата инсталация), която да провери неговите газови уреди и инсталация за пропуски на газ и като цяло дали съответства на изпълнителската документация.
   Ако е битов потребител, да може да се извършва от ЮЛ или от ФЛ.
   Проверката се вписва в експлоатационен дневник на газовата инсталация. Копие от този протокол Ползвателят предава на газоразпределителното предприятие, към чиято ГРМ е свързан. (тази схема на работа ще освободи ползвателите от бремето технически надзор, който ежегодно само взема такса, без да гарантира качество на услугата, като същевременно Изпълнителят, който е сертифициран да изгражда газови инсталации, гарантира качествен годишен преглед.

Отново наблягам на факта, че Ползвателят е отговорен за изправността и безопасността на своята газова инсталация, затова трябва да му се осигури адекватна поддръжка, която в момента не се реализира чрез така нар. Технически надзор.

При такова решение ГД ИДТН трябва да адаптира начина си на проверка на лицата (ЮЛ и ФЛ), които изграждат, поддържат и ремонтират газови съоръжения и инсталации

Този подход ще осигури яснота и проследимост на изградените и ползвани газови инсталации и ще намали административно-финансовата тежест както за фирмите-изпълнители и/или физическите лица, така и за ползвателите на природен газ.

Електроснабдяване на битови потребители

Анализ на нормативната уредба

Битовите потребители използват електрическа енергия от десетилетия. По тази причина процесът е ясно регламентиран. За съжаление през последните години, електроразпределителните предприятия /ЕРП/ самопроизволно започнаха да въвеждат свои правила, които противоречат на основните принципи за безопасност и ефективност на електроснабдяването, залегнали в теорията а и практиката, в т.ч. и преподавани във висшите технически учебни заведения.

Какво се има предвид? Когато се проектира електроинсталация на сграда, винаги се започва от единичният ел. консуматор в съответното жилище. Нека да приемем, че в една многофамилна жилищна сграда има десет апартамента. Нека да предположим, че във всеки апартамент има инсталирани: печка 3 kW/220V, хладилник 1.5 kW/220V, съдомиялна 1.5 kW/220V, климатик 3 x 1.5 kW/220V), газов котел 0.25 kW/220V, осветление, общи контакти и др. 4 kW/220V. Масово, при многофамилните жилищни сгради, дължините на захранващите кабели (от електромерно табло до апартаментно ел. табло) са доста дълги и за да се удовлетвори изискването за допустим пад на напрежение, се преминава към трифазно захранване. И тук идва проблемът. Ако общата изчислителна мощност например е Ризч = 11 kW, то Iизч = 18,6 A. Следователно ЕРП изисква главният предпазител след електромер да е 20 A. Същевременно изисква от потребителя да плати такса за предоставена мощност от 15 kW, което съответства на предпазител 25 A.

Има случаи, когато Ризч = 9.4 kW и Iизч = 15.9 A. При това положение ЕРП изисква главният предпазител след електромер да е 16 A. Същевременно отново изисква от потребителя да плати такса за предоставена мощност от 15 kW, което съответства на предпазител 25 A.

При тези случаи, които напоследък са масови, са нарушени някои основни принципи. Напр. нарушено е правилото за селективност на предпазителите. Само печка с Ринс = 3 kW е с ток I = 15.15 A. На тази фаза има поне още два уреда и фазовият ток ще надхвърли 16 A, а ЕРП изисква главният предпазител да е 16 A или 20 A. Следователно, поради липса на селективност на предпазителите, при една нормална консумация, главният предпазител за съответния апартамент доста често ще изключва.

Друг проблем са изискуемите от ЕРП коефициенти на едновременност /Ке/, които не отчитат че Ке при комбинирано отопление (например с природен газ или топлофикация) са занижени без да се има предвид, че газовите котли са с Ринст едва около 200 до 300 W. И този подход пренебрегва климатизацията през лятото, където средно в едно жилище има по три климатици, всеки с Ринст = 1 kW електрическа мощност. При сега действащите изисквания, където се отчита само алтернативно отопление, всички климатизатори в сградата ще останат необезпечени. Същевременно, собствениците си инсталират климатици, без да се интересуват от изчисленията на електроинсталациите – последните работят претоварени.

Предложения за промяна/актуализация на действащата нормативна уредба

Тук основна роля за промяна и актуализация на действащата нормативна уредба има КЕВР. Те трябва да разработят и предложат за приемане на адекватни мерки за избягване на горепосочените проблеми и да защитят правата на потребителите, които към момента имат “правото“ само да плащат такси и сметки, а когато получават лошо качество на ел. енергия, да не получават адекватни обезщетения.

Водоснабдяване на битови потребители

Анализ на нормативната уредба

Нормативната база в Р. България относно водоснабдяването на битовите потребители е остаряла и противоречива.

Към момента единствено проблеми нямат еднофамилните къщи, които са водозахранени самостоятелно.

Всички останали (което е масовият случай) многофамилни жилищни сгради и комплекси са жертви на нежеланието на законодателя да създаде ясни правила за индивидуално водоотчитане. Има се предвид следното:

В момента във всяка многофамилна жилищна сграда или жилищен комплекс (изградени в общо УПИ) се водоснабдяват през един общ водомер. След което

съответното ВиК отчита индивидуалните водомери (в къщи и апартаменти) и върху тези индивидуални показания пропорционално начислява разликата от сумата на индивидуалните водомери и общия водомер. Само че отчетът на индивидуалните водомери не се прави едновременно. Не е ясно при самоотчетите колко са верни подадените данни и затова някои потребители плащат безумни сметки за вода.

Предложения за промяна/актуализация на действащата нормативна уредба

Въпросът е лесен за решаване, но отново е в компетенциите на КЕВР. Необходимо е да се създаде нова нормативна уредба, която да разглежда и дава решения за всички установени досега варианти.

Например, в сграда до определено количество апартаменти, да има общо помещение, където да се монтират всички водомери и до всеки апартамент (през инсталационни ниши/шахти) да се изтеглят водопроводите. Така всеки апартамент няма да зависи от останалите. ВиК ще са сигурни, че няма кражби и ще могат да спират индивидуално всеки, при неплащане. Но това ще изисква ВиК да поемат ангажимента да си вършат работата за която им се плаща, а сега са оставили проблемите на главите на потребителите.

Аналогично е решението в комплекси с къщи и т.н.

Също да остане и сега действащата практика с общ водомер, ако Инвеститорът не желае да инвестира в повече водопроводи.

В крайна сметка Клиентът ще прецени къде да си купи жилище спрямо вида на инсталациите.

Да се узакони задължението всички индивидуални потребители в сграда с общ водомер да си поставят водомери с дистанционно отчитане.

Заключение

Като общо заключение се налага изводът, че КЕВР трябва да си влезе в ролята на регулатор и да вземе инициативата (заедно с конкретно отговорните институции) за изготвяне на актуална нормативна уредба в областите газоснабдяване, електроснабдяване и водоснабдяване на битови абонати/потребители.

Литература

Закон за устройство на територията /ЗУТ/ - в сила от 31.03.2001 г., последно изм. ДВ. бр. 92 от 27 октомври 2020 г.

Закон за енергетиката /ЗЕ/; Обн. ДВ. бр.107 от 9 Декември 2003 г., изм. и доп. ДВ. бр.41 от 21 май 2019 г.

Закон за техническите изисквания към продуктите /ЗТИП/; Обн., ДВ, бр. 86 от 1.10.1999 г. - последно изм. и доп. ДВ бр. 105 от 11.12.2020 г.

Наредба за устройството и безопасната експлоатация на преносните и разпределителните газопроводи и на съоръженията, инсталациите и уредите за природен газ /НУБЕПРГСИУПГ/ - приета с ПМС № 171 от 16.07.2004 г. – изм. ДВ бр. 60 от 20.07.2018 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. – изм. ДВ бр.30 от 01.04.2014 г.

OPTIMAL OPERATION OF A GAS BOILER DEPENDING ON THE QUALITY OF THE HEATED WATER

Alexander Kustelev

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

ABSTRACT. The article presents the influence of water quality on the efficiency and reliability of gas heating systems. Problems such as scale, corrosion, bacterial contamination, and installation debris can reduce efficiency and increase maintenance costs. The main causes are hard water, poor system tightness, and pH imbalance. Preventive measures, such as water treatment, pH stabilisation, thermal disinfection, and system flushing, are essential for optimal performance and extended service life.

Key words: water treatment, gas heating installations.

ОПТИМАЛНА РАБОТА НА ГАЗОВ КОТЕЛ В ЗАВИСИМОСТ ОТ КАЧЕСТВОТО НА ПОДГРЯВАНАТА ВОДА

Александър Кюстелев

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

РЕЗЮМЕ. В статията е представено влиянието на качеството на водата върху ефективността и надеждността на газовите отоплителни системи. Проблеми като котлен камък, корозия, бактериално замърсяване и монтажни отпадъци могат да намалят ефективността и да увеличат разходите за поддръжка. Основни причини са твърдата вода, лошата херметичност на системата и дисбаланса на pH. Превантивни мерки като третиране на водата, стабилизиране на pH, термична дезинфекция и промиване на системата са от съществено значение за оптимална работа и удължаване на експлоатационния живот.

Ключови думи: третиране на вода, газови отоплителни инсталации.

Въведение

Чистата инсталация позволява ефективно, лесно и безпроблемно отопление на домовете с използване на възможно най-малко енергия, което води до намаляване на разходите на газ. Правилната поддръжка и почистването удължават живота на отоплителната система. По този начин намалява риска от повреди и необходимостта от скъпи ремонти на отоплителния уред и други важни компоненти от инсталацията. Много хора поставят на преден план икономичността на отоплителните уреди и често не се колебаят да дадат значителна сума повече за минимално по-добра енергийна ефективност на газов котел. В същото време обаче пренебрегват факта, че липсата на поддръжка и защита на водната инсталация може да доведе до загуба на 10–15% от общата ефективност на системата още през първата година.



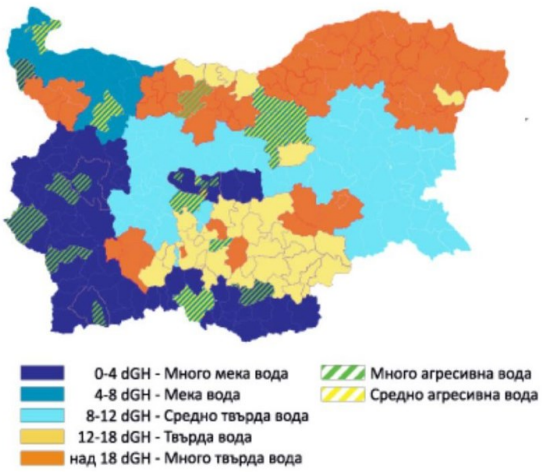
Фиг. 1. Често срещани замърсители

Надеждната и ефективна работа на газов котел е тясно свързана с физико-химичните характеристики на водата, циркулираща в отоплителната система. Влошеното качество на водата, най-често изразяващо се в твърдост (високи концентрации на калциеви йони), корозия (наличие на железни отлагания), бактериално замърсяване, монтажни отпадъци, остатъци от материали и заварки, представлява сериозен рисков фактор за натрупване на котлен камък, развитие на електрокорозионни процеси и понижаване на топлообменната мощност. Настоящият доклад разглежда качеството на водата и въздействието върху работата на котела, както и приложими мерки за осигуряване на оптимални работни условия.

Влияние на лошото качество на водата върху експлоатацията на газови котли

Котлен камък

Проблемите, свързани с отлаганията на калциев карбонат се срещат най-често в районите с висока твърдост на водата.



Фиг. 2. Карта с твърдостта на водата в България

При повишаване на температурата до стойности над 50°C се наблюдава интензивно отлагане на калциев карбонат от твърдата вода върху компонентите, изграждащи водната инсталация.

Натрупването на котлен камък по топлообменника, дори и на малка дебелина от 1 mm, може да доведе до значителен спад в ефективността на котела с над 10%. Това води до:

- Повишен разход на гориво – заради намалената топлопроводимост на накип, котелът изисква повече енергия за постигане на желаната температура;
- Удължено време за загряване – натрупаните отлагания затрудняват преноса на топлина, което води до по-бавно нагряване на водата;
- Невъзможност за постигане на желаната температура на водата за отопление и БГВ (битова гореща вода);
- Пълно запушване след намаляването на сечението на тръбите

Корозия

Високото съдържание на кислород и/или наличие на агресивни киселинни или алкални съединения във водата могат да доведат до сериозни корозионни процеси. Водородният показател pH измерва киселинността или алкалността на водата. Стойностите варират от 0 до 14, като стойностите под 7 представляват киселинна среда, а тези над 7 – алкална среда. Целта е водата в отоплителната инсталация да е възможно най-близка до pH = 7 или така наречената неутрална стойност.

Наличието на кислород във отоплителната система е признак на проблем с херметичността, който също създава условия за корозия. Най-често при наличие на теч попада въздух във водната инсталация и започва електрохимичен процес на корозия.

Всяка отоплителна инсталация съдържа няколко вида метали като например: мед или неръждаема стомана в топлообменниците, месингови фитинги, алуминий, стомана или чугун в радиаторите. При наличието на повече метали се наблюдава по-агресивна и бърза химична реакция.

- Анодна реакция (окисляване).

Това е процесът, при който металът отдава електрони и се разтваря като метални йони;

- Катодна реакция (редукция):

Това е процесът, при който електроните се приемат от други вещества като кислород.

Така, чрез комбинацията на тези реакции, се формира корозия, като най-често образуваните продукти са хидроксиди ($\overline{OH}$) на металите.

Неблагородните метали са първите, чиято цялост се нарушава при анодната реакция.

Бактериално замърсяване

Бактериално замърсяване е сравнително нов проблем срещан в отоплителните инсталации, тъй като той се наблюдава само при нискотемпературните системи като подово, стенно или таванно отопление. Нискотемпературното отопление може да работи ефективно при по-ниски температури на водата отколкото радиаторите. Това означава, че газовият котел, който захранва системата, не трябва да работи на максимална температура, което води до по-ниски разходи на енергия. Например, подовото отопление може да функционира при температура на водата в диапазон от 30 до 40°C, докато радиаторите изискват температура от 55°C или по-висока.

В случаите, в които не достигаме температура от 55°C или по-високи има предпоставка за живот на бактерии във водата в инсталацията. Бактериите най-често се съдържат във водопроводната вода в почвата, във водата от кладенец или сондаж. За тях температурите от 30°C са благоприятни за размножаване и бързо могат да причинят проблеми в механични елементи като циркулационни помпи, двупътни и трипътни вентили, електрически задвижки, така и да се отделят в топлоотдаващи тела като тръбите за подово отопление, топлообменници и радиатори.



Фиг. 3. Бактериално замърсяване

Монтажни отпадъци, остатъци от материали и заварки

Най-пренебрегвания и рядко споменаваният проблем с водните инсталации е наличието на външни твърди частици от складирането, транспортирането и монтажа на различните части и елементи като тръби, фитинги, радиатори и други. След изграждането на нова инсталация от нови продукти, никой не обръща внимание, че вече са налични дребни замърсявания, които могат да доведат до запушвания, полепяне върху топлообменни продукти или до ерозия.

Ерозията представлява механично износване на материали в резултат от различни фактори като висока скорост на потока и наличие на замърсители във водата. Това износване може да повлияе на ефективността на отоплителната система, да съкрати живота на компонентите и да доведе до по-чести ремонти и подмяна на части.

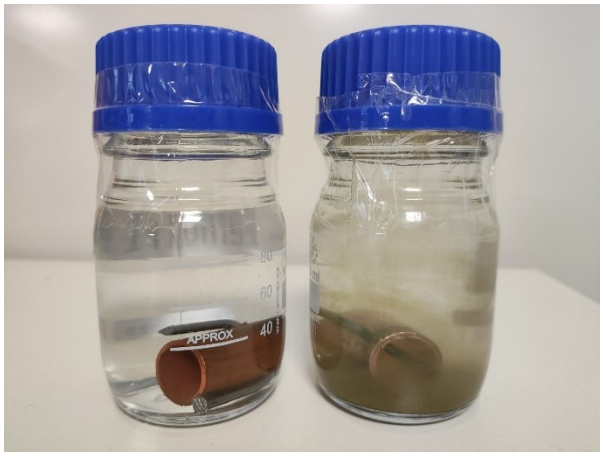
Решения на основните проблеми

1. **Котленият камък** и варовиковите отлагания могат да бъдат предотвратени по различни начини. При нискотемпературните инсталации (30-35°C) се наблюдава слабо отлагане на калциев карбонат. При среднотвърда до твърда вода дозирането на полифосфатни кристали е бюджетно и лесно решение. При много твърда вода единственото решение е монтаж на омекотителна станция, която да третира навлизащата вода от водопровода в жилището. Всяко от гореизброените решения може да се комбинира и с добавянето на препарат, който би предотвратил отлаганията на котлен камък в отоплителната инсталация. Пример за такъв препарат е Fernox F1 Protector.

2. **Корозията** може лесно да се избегне като се изпълнят две изисквания:

a. Херметичност на водната система. При наличие на теч той да бъде отстранен възможно най-бързо преди да се е обогатила водата с кислород и преди да е започнал корозионния процес;

b. Балансирана стойност на pH на водата около 7. Решение за това е добавяне на препарат с инхибиращи функции Fernox F1 Protector (фиг. 4);



Фиг. 4. Разлика между третирана с препарат вода и нетретирана вода

3. Бактериално замърсяване може да бъде избегнато ако веднъж седмично се подгрява водата в инсталацията над 55°C. В случай, че това е невъзможно заради нискотемпературно отопление, трябва да се добави химикал, който да предотврати образуването на бактерии. Пример за такъв препарат е Fernox AF10 Biocide.

4. Монтажни отпадъци, остатъци от материали и заварки. Това е единственият проблем, който не може да бъде предотвратен, но може много лесно да бъде решен.

След изграждане на нова инстация, след профилактична или ремонтна намеса в инсталацията е необходимо веднъж да се изплакне системата, като най-добре е да се ползва почистващ препарат. В западни държави като Англия инсталаторите не могат да валидират гаранционна карта на нов отоплителен уред (газов котел) докато клиента не представи протокол, доказващ почистването на отоплителната система без значение дали тя е нова или стара. Новоизградена отоплителна инсталация не се приема за чиста докато не се третира с почистващ препарат (Fernox Power Cleaner F8) и не се монтира филтър, който да събира всички останали замърсявания и отлагания.

Заключение

Превенцията на потенциални проблеми е стратегия, която доказано води до по-ефективно управление на ресурси и по-малко разходи в дългосрочен план. Когато се предприемат проактивни мерки за предотвратяване на възможни трудности, вместо да се чака тяхното възникване, се постига значително намаляване на неочаквани разходи и неудобства. Този принцип е приложим в поддръжката и качеството на подгряваната вода в отоплителната система. Редовният контрол на параметрите на водата (като pH, твърдост, съдържание на кислород и други примеси) позволява предотвратяване проблеми, които могат да доведат до намаляване на ефективността или до повреди на оборудването.

Използването на подходящи химикали за третиране на водата (антикорозионни добавки, омекотители, биоциди и др.), както и редовното почистване и техническо обслужване на системата, гарантират оптимална работа на инсталацията.

Литература

Бояджиев, М., Георгиев, Л. (2020). *Управление на газовата инфраструктура*. - Изд. къща МГУ “Св. Ив. Рилски“.

Караджов, М. (2022). Проектиране, изграждане, поддръжка и сервиз на битови хибридни системи с използване на природен газ. *Списание ”Минно дело и геология”, бр. 9 , София, ISSN 0861 – 5713 (Print), ISSN 2603 – 4549 (Online), стр. 42-46* (in Bulgarian).

https://fernox.com/articles/energy-efficient-heating-why-water-treatment-shouldnt-be-forgotten/ (29.12.2017)

https://fernox.com/articles/energy-efficient-heating-why-water-treatment-shouldnt-be-forgotten/

https://www.heatgeek.com/heating-water-treatment-explained-vdi-2035/ (26.05.2022).

https://www.heatgeek.com/heating-water-treatment-explained-vdi-2035/

CONTEMPORARY TECHNOLOGIES AND TECHNOLOGICAL RESOURCES FOR THE ORIENTATION OF EXPLORATORY-CORE DRILLING

Boris Patchejieff

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

ABSTRACT. In the current paper, the subject of analysis are the current technologies and technical resources used in orientation, spatial position of exploration boreholes. Controlling and directing the trajectory of the process of drilling exploration holes is crucial for successfully reaching of the exploration target. The exact control and determination of trajectory of a borehole is the correct planning and measurement of its direction and the inclination. In the process of drilling, depending on the intensity of borehole deviation, a measurement interval is set. For optimal precision, measurements are done each 30-50 meters with the advancement of the hole. The information processing is done by the Minimum Curvature method and the results are presented in a tabular form and graphically. The focus is on the gyroscopic and magnetic methods of borehole orientation, along with their advantages and disadvantages.

Key words: directional, exploratory-core drilling, orientation, survey.

СЪВРЕМЕННИ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА ОРИЕНТАЦИЯ НА ПРОУЧВАТЕЛНО-ЯДКОВИ СОНДАЖИ

Борис Пачеджиев

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

РЕЗЮМЕ. В настоящия доклад са анализирани съвременните технологии и технически средства за ориентиране и измерване на пространственото положение на проучвателни сондажи Контролирането и насочването на траекторията в процеса на прокарване на проучвателни сондажи е изключително важно за успешното достигане до основния хоризонт на проучване. Точното контролиране и определяне траекторията на сондажа е правилното измерване на инклинацията и азимута. В процеса на сондиране, в зависимост от интензитета на изкривяване на сондажа се задава честотата на измерването. За точно измерване в практиката се извършва на всеки 30-50 метра. За обработка на измерените параметри се използва методът на минималната крива, като резултатите се представят таблично и графично. Обърнато е внимание на използваните методи за ориентиране, които са жироскопичен и магнитен метод и техните предимства и недостатъци.

Ключови думи: насочено, проучвателно-ядково сондиране, ориентация, измерване.

Introduction

The technology of diamond core drilling differs from other drilling methods, since during its passage along the entire profile of the well, a cylindrical core sample (core) is extracted to the surface. The main rock-breaking tool is the diamond bit shown in Fig. 1. It consists of industrial diamonds impregnated in a tungsten-carbide matrix which, depending on the geological conditions, has different hardness and chemical content. The diamonds are fixed, according to a certain scheme, throughout the matrix, as in the drilling process, the entire matrix is subjected to wear. In case of improper operation of the crown, it can wear out in a very short time if the recommended drilling parameters are not followed (axial pressure, RPM, flow rate of the drilling fluid) or very difficult rock conditions were encountered.



Fig. 1. Diamond core bit (https://epiroc.scene7.com/is/image/epiroc/image-matrix-background-1902x1365?$landscape1600$)

The diamond bit Fig.1. is put into the lower (front) part of the outer core tube shown in Fig.2.

Description of Fig.2 elements are as it follows:

1. Head assembly
2. Inner tube
3. Stop-ring
4. Core lifter
5. Core case
6. Bronze centralizer
7. Landing ring
8. Core barrel (outer tube)
9. Reamer (blank)

The drilling fluid is pumped into the drilling tool, by a pump, through a swivel, mounted to the upper part of the drilling rod, in order to clean the drilling cuttings, cool the bit, (which leads to less friction, wear, and deformation of the diamonds and the matrix), stabilise the drill rods, and maintain an optimal percentage of extracted core, according to the requirements of the client. For each specific site, it is necessary to prepare a hydraulic program. In diamond drilling, it is advisable to use polymer solutions, even though in some regions bentonite disperse systems are preferred. (Todorov et al., 2009).

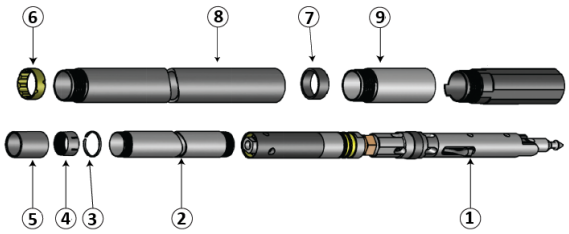


Fig. 2. Core barrel and inner tube (https://timeltd.ca/products/drilling-and-exploration/)

The drilling rig creates the necessary axial load and rotation frequency on the diamond bit during the drilling process. Subsequently, part of the rock formation (the so-called core), depending on the internal diameter of the diamond core according to the IADC standard, enters the core inner tube (Fig. 2[2]). It is brought to the surface by means of an overshot, which engages the bearing body, which is wound in the upper part of the inner core tube shown in Fig. 2[1]. The bearing body has the function of holding the core tube in a locked position from its lower part during drilling, and from its upper part (above the bearings) to rotate together with the drilling rod shown in Fig. 2[1]. The core case (Fig. 2[5]), spring (Fig. 2[4]), and stop-ring (Fig. 2[3]) serve to grip and break the core sample. The outer core tube (Fig. 2[8]) consists of a bronze centraliser, centering the inner tube (Fig. 2[9]), a stop ring, where the bearing body stops (Fig. 2[7]), an adapter or reamer (Fig. 2[6]) and a locking coupling, where the latches of the bearing body are engaged.

Borehole surveying

Inclinometry is a method for determining the spatial position of boreholes at depth and graphically displaying its trajectory. It is also used to accurately determine the location and orientation of other tools used in the drilling process (positioning of wedges, orientation of directional drilling tools, etc.).

During drilling, it is necessary to survey the borehole in order to determine and control its spatial position. For this purpose, specialised measurement systems have been created and have been used for many years, the main improvement and refinement being the accuracy of the instruments employed and their simplification for use.

One of these instruments is a multishot survey tool, which is relatively cheap and simple to operate, taking into account that the magnetism of the layers and the surrounding equipment is low enough not to disturb it.

On the other hand, gyroscopic instruments are widely used in drilling, being significantly more expensive, but not affected by magnetic environments. Another advantage of the gyroscope is that it can perform a continuous survey. This reduces the overlap of stations in the magnetic survey, which better describes the trajectory of the borehole.

Magnetic EMS			**North-finding gyroscope**	
Magnetic field X	*B*x	↔	Earth rate X	Ωx
Magnetic field Y	*B*y	↔	Earth rate Y	Ωy
Magnetic field Z	*B*z	↔	Earth rate Z	Ωz
Magnetic field total	*B*	↔	Earth rate total	Ω
Magnetic dip	*D*m	↔	Latitude	-φ
Inclination from vertical	*I*	↔	Inclination from vertical	*I*
Highside	*H*	↔	Highside	*H*

Fig. 3. Variables included in the mathematical model of gyroscopic and magnetic survey tools (Billger, 2019)

These are divided into two main groups using physical measurements, the Earth's magnetic field, and its rotation speed, as their principle of operation is mathematically identical (shown in Fig. 3).

Therefore, the limitations of magnetic survey tools are also found in non-magnetic (gyroscopes).

Inclinometry measures elements of the curvature of the borehole at certain depths. These elements include:

- angle of inclination (borehole inclination) - the angle between the vertical and the borehole axis. In this regard, in exploratory drilling, a vertical borehole is assumed to be -90 degrees, and a horizontal borehole has a slope value of 0 degrees;
- magnetic azimuth (Magnetic North) - the angle between the horizontal projection of the borehole axis and magnetic north;
- geographic azimuth (True North) - the angle between the horizontal projection of the borehole axis and geographic north.

It is also important to mention the Grid North – the convergent angle between true True North and Grid North, for aligning the instrument's north when using the UTM system shown in Fig. 4.

.

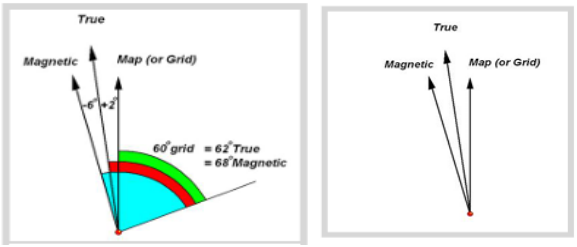


Fig. 4. Types of north (Jamieson, 2017)

Data on the deviation rate are necessary for:

- controlling the preservation of the trajectory set in the project;
- controlling the avoidance of sharp deviations of the well, which can cause complications during drilling;
- obtaining the necessary initial data for the compilation of geological and geophysical sections, diagrams and maps (determining the position and depth of the elements in the section of the well - layers, face, etc.).

The main geological reasons that cause the deviation of the well are the different hardness of the rocks being drilled and their layering, as well as the significant angle of inclination of the layers.

The main technological reason is non-compliance with the operating parameters.

Surveying interval

The deviation rate of the borehole is measured by DLS (DogLeg Severity), and the minimum curvature method is used for its calculation. The minimum curvature method assumes that the borehole path between two consecutive geodetic stations can be approximated by a segment of a circular arc shown in Fig. 5.

For a specific average deviation intensity, it follows that the optimal borehole measurement interval for trajectory control is between 30 and 50 meters. As a good practice, this measurement is multishot, which is a technique for determining the deflection of a borehole shaft. The Continuous measurement technique is also popular. The multishot tool provides greater accuracy than the singleshot one. In practice, the Continuous measurement technique is used, as measured in borehole 2. To perform a continuous gyroscopic

measurement, the depth of the tool must be measured continuously and integrated with the gyroscope measurements. (Billger, 2020).

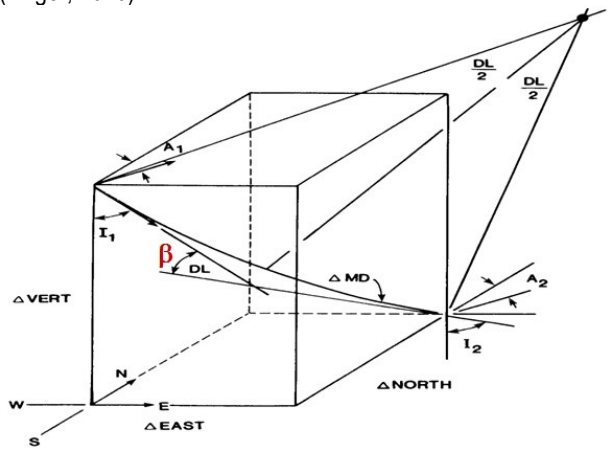


Fig. 5. Graphic illustration of the minimum curvature method (https://www.drillingformulas.com/minimum-curvature-method/)

With an average natural deviation of 0.8 degrees per 30 meters and a set target radius of 15 meters, in order to avoid long corrections and generally trajectory corrections, the interval of 30-50 meters provides optimal information. In addition to avoiding longer and time-consuming corrections, deviation control is of utmost importance to avoid entering old mining developments, galleries, old drill holes. An example is specifically presented with two boreholes with a design depth of 1172 meters and 1200 meters. With a natural deviation of 0.8 and linear extrapolation to the geological target from the following depths, the distance is as follows:

Borehole 1 has a specification: 1172 meters design depth, -87.4 degrees inclination and 135 degrees azimuth, thus a vein with a presumed deposit of the sought ore, satisfying the geological survey, should be reached. In this case, Multishot measurement is used, at an interval of 30 meters.

.

Table 1. *Survey data from hole 1*

Depth (m)	3D distance with linear extrapolation (m)
200	11
400	18
600	36
800	45

Borehole 2 has specifications: 1200 meters design depth, -60.5 degrees dip and 152.8 degrees heading and average natural curvature of 0.8 degrees per 30 meters. In this case, Continuous measurement is used, at an interval between 30 and 50 meters.

Table 2. *Survey data from hole 2*

Depth (m)	3D distance with linear extrapolation (m)
200	48
400	52
600	84
800	81

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/):

$$North = \frac{MD}{2} \times \left[\sin(I_1) \times \cos(A_{z1}) + \sin(I_2) \times \cos(A_{z2})\right] \times RF$$

$$East = \frac{MD}{2} \times \left[\sin(I_1) \times \sin(A_{z1}) + \sin(I_2) \times \sin(A_{z2})\right] \times RF$$

$$TVD = \frac{MD}{2} \times \left[\cos(I_1) + \cos(I_2)\right] \times RF$$

$$\beta = \cos^{-1}\left[\cos(I_2 - I_1) - (\sin(I_1) \times \sin(I_2) \times (1 - \cos(A_2 - A_1))\right]$$

$$RF = \frac{2}{\beta} \times \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

where:

MD is measured depth (ft)
I1 – inclination upper station
I2 – inclination lower station
Az1 – azimuth upper station
Az2 – azimuth lower station
RF – Ratio Factor
ß – intensity/dogleg angle (rad).

The construction of the boreholes is telescopic, drilled with bit diameters - PQ/HQ/NQ. The smaller the diameter is, the more likely it is for the hole to deflect.

In borehole 1, a magnetic survey tool was used, which is a time-calibrated instrument. Accordingly, in order to start the device, a device (phone or tablet) with Bluetooth is required, which connects to the instrument and puts it into operating mode, by setting an approximate working time (for example, 3 hours), in which the instrument will be active. After starting and adjusting the instrument, it is lowered into the borehole, using a non-magnetic extension tube in order to bring the tool more than 5 meters outside the bit, which is considered a sufficient distance for the instrument not to be disturbed by the drilling rod, as the distance also depends on the diameter of the drilling rod. The adapter or extension of the tip of this non-magnetic tube is placed on the matrix of the drill bit and then the instrument is ready for operation. The “shot” command is given, which means that the instrument performs a spatial measurement. Then the information is taken out and downloaded again via "Bluetooth". The information is transmitted via a timer, which records that at, for example, 03:01:53 the device was in the corresponding spatial position, and this information is transferred to the device (phone).

In borehole 2, measurements were made at an interval of 30 meters, but with a gyroscope and the continuous survey, as the specific measurement provides information for every 5 meters, along the depth of the borehole. If measured at a depth of 600 meters, we will receive information for every 5 meters from the face to the mouth of the borehole. The principle of operation is analogous to the magnetic inclinometer, the difference being that the instrument is inside the rods, not outside them as in the magnetic inclinometer.

The design direction of both boreholes is set gyroscopically (north-seeking). Therefore, when measuring the magnetic azimuth, it must be corrected with the magnetic declination which is determined by the longtitude and latitude of the explored field. In the specific borehole it is with -87.4 degrees of inclination and 135 degrees of azimuth.

Another important factor in this type of measurements is the value of the magnetic field, measured in nanoteslas, as a difference of over 1000nT means that the measurement is compromised by magnetic interference. (Billger, 2021)

In borehole 2, where the measurement is made with a gyroscope, to avoid errors and compromising measurements, the gyroscope must be kept in oscillation mode (amplification) and the measurement speed set by the manufacturer (m/min) must be observed, in order to achieve optimal oscillation of the device.

Conclusion

Proper setting and surveying in the borehole during the drilling process are the conditions for a correct trajectory and falling within the radius of the set target. It is necessary that the measurement interval be every 30-50 meters to monitor the trajectory. The correct technology for measuring and setting the direction when drilling exploration boreholes must be known and followed.

Literature

Billger, Dag. (2019). Similarities between magnetic and north-finding survey tools. *Coring Magazine*, Issue 9.

Billger, Dag. (2020). Comparing multishot & continuous surveys using the TwinGyro™”. Coring Magazine, Issue 12.

Billger, Dag. (2021). Technical interview with Dag Billger and Duncan McLeod. Coring Magazine, Issue 15.

Dimovski, S. (2007). Rakovodstvo za prakticheski zanyatiya po sondazhna geofizika. Sofia.

Jamieson, Angus. (2017). Introduction to wellbore positioning. V06.02.2017

Todorov, I., Harizanov, M., Stoykov. S. (2009). Drilling technology and usage of polymer drilling fluids for mineral exploration diamond core drilling applications in the Chelopech Cu-Au deposit (Bulgaria). *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 52*, Part I, Geology and Geophysics, pp. 189-193. ISSN 1312-1820.

https://epiroc.scene7.com/is/image/epiroc/image-matrix-background-1902x1365?$landscape1600$

https://glossary.slb.com/terms/m/multishot_survey#:~:text=1.%20n.%20%5BReservoir%20Characterization,used%20in%20highly%20deviated%20wells.

https://timeltd.ca/products/drilling-and-exploration/

https://unacademy.com/content/nda/study-material/mathematics/analytical-geometry-three-dimensions-distance-between-two-points/

https://www.drillingformulas.com/minimum-curvature-method/

IMPACT OF THE EUROPEAN ENERGY POLICY ON THE GAS SECTOR

Anna Preshelkova, Denislava Damyanova

“Overgas Mrezhi” AD, 1407 Sofia; E-mail: anna_preshelkova@overgas.bg

ABSTRACT. The development of the energy sector in the period after 2022 is associated with fundamental changes in the world due to military action, climate change, and the need to manage them within limits that are acceptable for humanity and its future. The EU, the USA, Japan, China and other countries have developed programs to reduce greenhouse gas emissions. The Green Deal, published by the European Commission in December 2019, is a large-scale plan to “make the EU economy green”. The document envisages the achievement of EU climate neutrality in 2050 through decarbonisation of the energy sector as well. As a result of Mario Draghi's analysis, the US withdrawal from the Paris Agreement, and geopolitical changes, a review of the existing EU Regulations and Directives has begun. In 2024, a number of key EU Regulations and Directives related to the gas sector were adopted and updated, including methane emissions reduction, internal markets for biomethane, hydrogen and natural gas, net zero emissions, nature restoration, etc. The report analyses the impact of these documents on the management of gas infrastructure and on the key indicators of gas companies. Methods have been proposed for making investment decisions in the conditions of uncertainty of the source information, as well as for risk management in the current turbulent conditions of the environment.

Key words: Green Deal, decarbonisation, natural gas.

ВЛИЯНИЕ НА ЕВРОПЕЙСКАТА ЕНЕРГИЙНА ПОЛИТИКА ВЪРХУ ГАЗОВИЯ СЕКТОР

Анна Прешелкова, Денислава Дамянова

„Овергаз Мрежи“ АД, 1407 гр. София

РЕЗЮМЕ. Развитието на енергийния сектор в периода след 2022 година е свързано с коренни промени в света, поради военни действия, климатични промени и необходимостта от тяхното управление в допустими граници за човечеството и бъдещето му. ЕС, САЩ, Япония, Китай и др. страни разработиха програми за намаляване на емисиите на парникови газове. „Зелената сделка“ е публикувана от Европейската комисия през м. декември 2019 г. и представлява мащабен план за “озеленяване” на икономиката на ЕС. Документът предвижда постигане на неутралност на ЕС по отношение на климата през 2050 г. чрез декарбонизация и на енергийния сектор. В резултат на анализа на Марио Драги, оттеглянето на САЩ от Парижкото споразумение, геополитическите промени, започна преразглеждане на съществуващите Регламенти и Директиви на ЕС. През 2024 г. бяха приети и актуализирани редица ключови Регламенти и Директиви на ЕС, свързани с газовия сектор, в т.ч. намаляване на емисиите на метан, вътрешните пазари на биометан, водород и природен газ, нулеви нетни емисии, възстановяване на природата и др. В доклада е анализирано влиянието на тези документи върху управлението на газовата инфраструктура и върху ключовите показатели на газовите компании. Предложени са методи за приемане на инвестиционни решения в условията на неопределеност на изходната информация, както и за управление на риска при наличните турбулентни условия на външната среда.

Ключови думи: Зелената сделка, декарбонизация, природен газ.

Въведение

През последното десетилетие Европейският съюз (ЕС) предприема решителни стъпки към изграждане на устойчива и климатично неутрална енергийна система. В основата на тази трансформация стои „Зелената сделка“ (ЗС), която задава посока за намаляване на въглеродните емисии и преход към чисти технологии. Енергийната криза след 2022 г. ускори промените в газовия сектор, като постави акцент върху декарбонизацията, иновациите и възобновяемите източници като биометан и водород.

Политическите промени в ЕС

Зелената сделка, представена от Европейската комисия през 2019 г., поставя амбициозната цел ЕС да постигне климатична неутралност до 2050 г. Основната цел е превръщането на ЕС в справедливо и благоденстващо общество с модерна, ресурсно ефективна и конкурентоспособна икономика, в която до 2050 г. няма да има нетни емисии на парникови газове, а икономическият растеж няма да зависи от използването на изкопаеми ресурси.

Основният фокус е върху декарбонизацията на енергийния сектор като отговор на климатичните промени, които вече имат измерими социални, икономически и екологични последици – от екстремни метеорологични явления до загуба на биоразнообразие и заплахи за човешкото здраве. В основата на ЗС е концепцията за „справедлив преход“ – социално отговорен процес, който не оставя нито един регион или работник извън зелената трансформация.

ЗС включва амбициозни цели, насочени към преход към чиста и сигурна енергия, насърчаване на устойчив транспорт, развитие на кръгова икономика и устойчиви хранителни системи, опазване на природните екосистеми и биоразнообразието, както и въвеждане на екологични критерии във всички секторни политики на ЕС. Особено значение се отдава на устойчивите инвестиции и зеленото финансиране, които да подкрепят този преход, като същевременно се осигурят социална справедливост и икономическа стабилност в целия Съюз.

Зелената сделка не съществува изолирано, а е тясно свързана с редица ключови политики и стратегически документи на ЕС, които допълват и конкретизират нейните цели.

През 2020 г. беше приет Регламент (ЕС) 2020/852, известен като „Регламент за таксономията“, който създава рамка за улесняване на устойчивите инвестиции чрез единни критерии за класифициране на дейности като екологично устойчиви. Този регламент изключва финансиране от европейски фондове за проекти, свързани с изкопаеми горива, включително газификация, и такива по схемата на ЕС за търговия с емисии.

Таксономията се отразява и в националните документи на България като Интегрирания план в областта на енергетиката и климата (2024), Националния план за възстановяване и устойчивост (2022) и други, които

ограничават финансирането на мерки с изкопаеми газообразни горива. Въпреки това, природният газ не се счита за значително вреден за екологичните цели според определени критерии на таксономията.

Ролята на енергетиката в промените на климата

Енергийният сектор е в основата на глобалната икономика, но също така е и основен източник на парникови газове (ПГ), допринасящи за климатичните промени. Постигането на климатична неутралност до 2050 – 2100 г. изисква дълбока трансформация на енергийния сектор, особено по отношение на използваните горива, енергийната ефективност и развитието на възобновяеми източници като водород, биогаз и биометан.

На 14 октомври 2020 г. Европейската комисия публикува Стратегия за намаляване на емисиите от метан. Парниковият ефект на един тон метан се равнява на 36 тона CO_2.eqv. Селското стопанство генерира 53% от емисиите на метан, 26% от отпадъци и 19% от енергетиката. В Стратегията се планират по-ефикасни мерки за намаляване емисиите на метан, като на първо място е „Предоставяне на целенасочена подкрепа за ускоряване на развитието на пазара на биогаз от устойчиви източници, включително пилотни проекти за селски и земеделски общности.“

Стратегиите за намаляване на емисиите на метан се фокусират върху различни сектори, включително енергетика, селско стопанство и отпадъци. Оптимизирането на производството и транспорта на изкопаеми горива, подобряването на практиките в селското стопанство и ефективното управление на отпадъците са ключови елементи в тези стратегии.

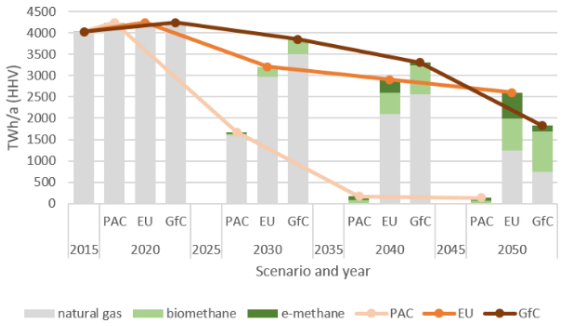
През 2024 г. ЕК представи на COP29 „Пътна карта за партньорство за намаляване на метана“, с която ЕС цели да засили сътрудничеството със страни, вносители и износители на горива, като подкрепя съвместни действия за мониторинг и ограничаване на емисиите, включително от съществуващи съоръжения.

В подкрепа на намаляването на метана бяха осигурени и 175 милиона евро под формата на международна помощ, насочена основно към развиващите се страни. Комисията продължава да насърчава и развитието на пазара на биогаз и биометан от устойчиви източници, особено в селските и земеделските райони, с амбицията да се достигне производство от 35 милиарда кубични метра годишно до 2030 г.

През 2024 г. беше приет Регламент ЕС 2024/1787, който въвежда задължителни изисквания за откриване и отстраняване на метанови течове в енергийния сектор, забрана на изгарянето на метан и стриктно докладване на емисиите от операторите на активи.

Метанът има роля за изменението на климата, която отстъпва единствено на тази на въглеродния диоксид (CO_2) и е отговорен за приблизително една трета от затоплянето в настоящия момент. Количеството на метан в атмосферата през последното десетилетие се е увеличило рязко в световен мащаб.

Трансформацията на енергийния сектор и ускореното внедряване на устойчиви алтернативи като биометан и е-метан са от ключово значение за намаляване на емисиите на метан и постигане на климатичните цели на ЕС. Различни сценарии очертават възможни пътища за развитие на газовия сектор до 2050 г., включително сценарии, съвместими с Парижкото споразумение и с амбициите на Европейския съюз за климатична неутралност. На следващата графика е представена проекция за потреблението на природен газ, биометан и е-метан в ЕС в периода 2015–2050 г. по три основни сценария — PAC (Paris Agreement Compatible) — сценарий, съобразен с целите на Парижкото споразумение за климатичен неутралитет, EU - сценарий, отразяващ настоящите политики на ЕС, и GfC (Gas for Climate) - сценарий, фокусиран върху максимално използване на устойчиви газове с акцент върху постепенната замяна на изкопаемите горива с възобновяеми газове.



Фиг. 1 Проекция за потреблението на природен газ, биометан и е-метан в ЕС по различни сценарии до 2050 г.

Трите сценария показват различни скорости на преход от природен газ към възобновяеми алтернативи, като PAC сценарият предвижда почти пълно елиминиране на природния газ до 2040 г., докато EU и GfC запазват известен дял и след 2045 г.

Природният газ, в съчетание с възобновяеми газове като биометан, синтетичен метан и водород, ще продължи да играе съществена роля в енергийния микс на Европейския съюз, САЩ и др. страни до 2050 г., като съществуват основания да се приеме, че той ще остане необходим компонент на енергийната система и през втората половина на XXI век.

Анализ на „Зелената сделка“ върху ефективността на инвестициите в газова инфраструктура (ГРМ) и върху оперативните разходи

ЗС оказва съществено влияние върху инвестиционния климат в сектора на газовата инфраструктура, особено в газоразпределителните мрежи (ГРМ). С ясно поставената цел за постигане на климатична неутралност до 2050 г., политиките на ЕС ограничават ролята на изкопаемите горива, включително природния газ като преходно гориво. В резултат на това се очаква след 2030 г. търсенето на природен газ в Европа да започне да намалява. Тази тенденция създава съществена несигурност относно дългосрочната възвръщаемост на нови инвестиции в ГРМ и поставя под риск ефективното използване на съществуващата инфраструктура. Това поражда опасност от т.нар. „заключване на активи“ (stranded assets), при което инфраструктурни обекти губят икономическата си стойност преди края на техния експлоатационен живот.

В отговор на натиска за декарбонизация, инвестиционният фокус в сектора започва да се

преструктурира към нисковъглеродни алтернативи като водород и биометан. За да запазят своята релевантност, газовите мрежи ще трябва да се адаптират към новите горива, което предполага допълнителни капиталови разходи. Част от мрежите ще трябва да бъдат рехабилитирани, за да позволят пренос на смеси от природен газ и водород (например до 20% H_2), а в по-дългосрочен план – дори на 100% водород. Това създава нови технически и финансови предизвикателства, но и възможности за модернизация на системата в контекста на енергийния преход.

Освен техническите аспекти, регулаторната и финансова рамка допълнително влияе върху инвестиционната привлекателност на газовите проекти. Европейската таксономия за устойчиво финансиране ограничава достъпа до „зелени“ инвестиционни потоци за проекти, базирани единствено на природен газ, освен ако те не демонстрират ясен принос към декарбонизацията – например чрез замяна на въглищни мощности или чрез интегриране на възобновяеми газове. Това води до по-ниска склонност сред инвеститорите да се ангажират с дългосрочни проекти, базирани на изкопаеми горива, поради високия риск от технологична и регулаторна обходимост.

ЗС трансформира не само политиките и пазарната логика, но и самите принципи на инвестиционно планиране в ГРМ сектора. Успешните инвестиции ще бъдат тези, които интегрират гъвкавост, технологична съвместимост с бъдещи горива и съответствие с европейските критерии за устойчивост.

Решенията за инвестиране в газова инфраструктура (ГРМ) в контекста на европейската Зелена сделка се вземат в условия на изключителна динамика и често при непълна или несигурна информация. Един от основните фактори, които влияят негативно върху инвестиционната активност, е неопределеността на изходната информация. Липсата на яснота относно бъдещото търсене на природен газ, както и отсъствието на единен сценарий за прехода към алтернативни енергийни носители като водород и биометан, затрудняват прогнозите за възвращаемост на капиталовложенията. В допълнение, честите промени в регулаторната рамка, както на европейско, така и на национално ниво, увеличават несигурността при дългосрочното стратегическо планиране.

Не по-малко значим е и проблемът с ценообразуването, който играе решаваща роля в анализа на оперативните разходи и рентабилността на ГРМ. Цената на природния газ в Европейския съюз е силно волатилна и зависи както от борсови индекси (като TTF и NBP), така и от геополитически събития, климатични условия и пазарна спекулация. В този контекст ценообразуването може да бъде изразено със следната зависимост:

P_{{газ}} = C_{{внос}} + C_{{транспорт}} + C_{{въглеродни\ емисии}} + C_{ {такси}}

Тази формула показва, че цената на газа не е самостоятелен параметър, а зависи от множество променливи, включително и от стойността на въглеродните емисии (ETS), която се увеличава в условията на „въглеродно“ регулиране. Когато обемите на пренос намаляват вследствие на високи цени и ограничено търсене, нарастват и единичните оперативни разходи на инфраструктурните оператори, което води до влошаване на общата ефективност на мрежите.

Третият съществен фактор е свързан с измененията в цените на енергийните носители. В условията на Зелената сделка, природният газ все по-често се разглежда като преходен източник, който постепенно трябва да бъде заменен от устойчиви алтернативи. Цената на водорода към момента е в пъти по-висока от тази на природния газ, като пазарната стойност често достига между 4 и 6 пъти над стандартната борсова цена на природен газ. Това създава икономическо напрежение за операторите на ГРМ, които трябва да инвестират в адаптация на инфраструктурата без да имат сигурност относно бъдещото търсене на новите горива. От друга страна, електроенергията от възобновяеми източници става все по-конкурентна, но остава нестабилна поради своята зависимост от природни условия.

Четвъртият и най-всеобхватен фактор са енергийните политики на Европейския съюз и държавите членки. Европейската Зелена сделка поставя строги цели за декарбонизация до 2050 г., като насърчава преминаване към възобновяеми източници и ограничаване на инвестиции в изкопаеми горива. Инициативи като REPowerEU, Европейската таксономия за устойчиви инвестиции и плановете за развитие на водородна инфраструктура (European Hydrogen Backbone) формират силен нормативен натиск върху сектора. Наред с това обаче, националните енергийни и климатични планове (НЕКП) често се различават по амбиция и изпълнение. Някои държави вече планират постепенно изтегляне от употребата на природен газ в битовия сектор, докато други, като България, продължават да разчитат на разширяване на газовата мрежа като инструмент за диверсификация и намаляване на въглеродните емисии.

Всички тези фактори – несигурната изходна информация, волатилното ценообразуване, нестабилните цени на горивата и различията в енергийните политики влизат в сложни зависимости, които оказват пряко влияние върху възвръщаемостта на инвестициите. Тя може да бъде представена чрез следната формула:

ROI = {{Годишни нетни приходи} - {Оперативни разходи}}/{{Инвестиционни разходи}} \x100

Таблица 1. *Фактори, влияещи върху инвестициите в газовия сектор*

Фактор	**Влияние върху инвестиции**	**Зависимост/ефект**
Неопределеност на данни	Повишава риска	Неясна прогноза за търсене и възвръщаемост
Ценообразуване	Висока волатилност	Затруднява дългосрочно планиране
Цени на горива	Нестабилност	Повишава оперативните разходи
ЕС политики	Ограничения за изкопаеми	Изисква трансформация на мрежите
Национални политики	Възможни противоречия	Създават регулаторна несигурност

При увеличение на оперативните разходи или спад в търсенето, вследствие на политически ограничения или пазарни промени, ROI може да падне под критичния праг, при който инвестициите стават икономически нецелесъобразни. Това създава реален риск от т.нар. „заключени активи“ (stranded assets), при които вече изградени мрежи и съоръжения остават неизползвани.

В този контекст бъдещето на газовия сектор в ЕС ще зависи в голяма степен от това доколко регулаторите и инвеститорите ще успеят да изградят гъвкави модели, отчитащи променящите се условия и комбиниращи традиционната инфраструктура с иновации като смесване на газ с водород, цифровизация и гъвкави тарифи.

Управление на риска при планиране, изграждане и експлоатация на газовата инфраструктура

Управлението на риска е основополагащ компонент от жизнения цикъл на всяка инвестиция в газова инфраструктура – от етапа на първоначално планиране до фазите на строителство, въвеждане в експлоатация и дългосрочна поддръжка. В условията на бързо променяща се енергийна среда, технологична несигурност и политически натиск за декарбонизация, способността на организациите да идентифицират, оценят и управляват рисковете придобива ключово значение за устойчивостта и ефективността на проектите.

Един от най-съществените рискове при инвестиционното планиране е свързан с наличието на неопределена и често противоречива изходна информация. Липсата на ясни дългосрочни прогнози за потреблението на газ, непоследователност в политиките на ЕС и националните правителства, както и неяснотата около бъдещата роля на инфраструктурата (дали ще пренася природен газ, водород или смес) водят до затруднения при формулиране на инвестиционна стратегия. Това се отразява на избора на технологии, мащаба на инвестицията и нейния времеви хоризонт.

Технологичните рискове възникват най-вече поради необходимостта от адаптиране на съществуващата газова инфраструктура към нови енергийни носители, като зелен водород или биометан. Много от тези технологии все още са в пилотна фаза и не са доказани в мащабна експлоатация. Освен това, липсва стандартизация на оборудване и оперативни режими при смесване на газ с водород. Това повишава вероятността от технически неизправности, неочаквани разходи за преоборудване и трудности при експлоатацията.

Наред с технологичните, пазарните рискове също имат съществено значение. Те се проявяват както в непредвидими колебания на цените на енергийните ресурси, така и в променящото се търсене на услугите, предоставяни от газовата мрежа. Например, навлизането на електрификацията в отоплението и транспорта, съчетано със субсидиране на ВЕИ, може рязко да намали търсенето на газови услуги, което би поставило под съмнение рентабилността на нови и съществуващи мрежи. В тази връзка може да се използва чувствителност на нетните приходи спрямо търсенето:

{ROI}{ D} < 0, {(където D = търсене на газ)}

Този израз показва, че спад в търсенето директно намалява възвръщаемостта на инвестицията.

Политическите рискове произтичат както от променливите регулации в рамките на Европейския съюз, така и от националната енергийна политика, която често зависи от правителствени приоритети, обществени нагласи или външнополитически фактори. Пример за това е резкият завой в енергийната политика на много държави след 2022 г., в отговор на прекъсване на газовите доставки от Русия. Подобни събития налагат бързи промени в стратегиите за сигурност на доставките, в които дългосрочните инфраструктурни проекти трудно могат да се адаптират навреме.

В допълнение, организационните рискове са свързани с вътрешната способност на компаниите или институциите, управляващи газовата мрежа, да реализират ефективно проектите си. Те включват управлението на бюджетите, сроковете, комуникацията между заинтересовани страни, както и качеството на процедурите за обществено възлагане и технически надзор. Неуспешното управление на тези елементи може да доведе до значителни закъснения, увеличаване на разходите и дори до правни или репутационни последици.

И не на последно място, човешкият фактор представлява хоризонтален риск, който засяга всички етапи от жизнения цикъл на газовата инфраструктура. Недостигът на квалифицирани инженери, неправилно изпълнение на процедурите по безопасност, недостатъчна експертиза в новите технологии (като например пренос на смесен газ с водород) или слабости в управлението на проекти, увеличават вероятността от грешки и аварии. Особено в преходни периоди, когато се въвеждат нови норми и технически изисквания, недостатъчната подготовка на персонала може да компрометира цялостната сигурност и функционалност на системата.

Управление на газова компания в условия на неопределеност – интегритет, стратегия и индикатори за ефективност

Съвременната газова компания функционира в среда на силна регулаторна, пазарна и технологична турбулентност, предизвикана най-вече от климатичните политики на Европейския съюз, геополитическите промени и бързото развитие на нисковъглеродни технологии. В този контекст управлението на една газова компания изисква стратегическа адаптивност, високо ниво на организационен интегритет и способност за динамично балансиране между устойчивост, рентабилност и сигурност на доставките.

Управление на интегритета с отчитане на климатичните политики

Интегритетът в управлението означава съответствие между дългосрочната визия на компанията, нейните инвестиционни и оперативни действия, и изискванията на външната среда – в случая европейските климатични регулации. С нарастващия натиск за декарбонизация и пълно климатично неутрализиране до 2050 г., газовите компании са изправени пред предизвикателството да се трансформират в мултиенергийни оператори. Това изисква не само адаптация на мрежите за смесени газове (напр. 20% водород + 80% метан), но и активно включване в проекти по въглеродно улавяне, съхранение и цифрово управление на потоци. Компания, която не отчита тези политики, рискува да загуби достъп до финансиране – особено от „зелени“ инвестиционни инструменти като

Европейската таксономия. Следователно, корпоративната стратегия трябва да е съвместима с цели като: нетни нулеви емисии до 2050 г.; драстично намаляване на CH_4 (метан) емисии по цялата верига; дигитализация за енергийна ефективност и прогнозируемост.

Управление на стратегията и оперативните действия в условия на турбулентност

В условията на висока волатилност – както на цени, така и на регулаторни изисквания – традиционният линеен подход към стратегическото планиране вече не е приложим. Вместо това компаниите трябва да прилагат сценарийно планиране и гъвкаво стратегическо управление, базирано на хибриден микс между дългосрочна визия и краткосрочна оперативна адаптация.

Управлението на оперативните действия включва: гъвкаво бюджетиране, позволяващо преразпределение при резки пазарни промени; динамично управление на натоварването на мрежата в условия на променливо търсене; реакция при дисбаланси на борсови цени и спот доставки и внедряване на KPI-базирани системи за контрол в реално време.

Ключов момент тук е изграждането на оперативна устойчивост чрез **интегрирани дигитални системи** (IoT, SCADA, GIS), които позволяват мониторинг и бърза реакция при извънредни ситуации.

Ключови показатели за управление и сравнителен анализ

За да бъде ефективно управлението в условия на несигурност, компанията трябва да измерва и анализира стратегически ключови показатели за ефективност (KPI), които отчитат не само техническите резултати, но и адаптивността спрямо климатичните и пазарни предизвикателства. Ето някои от най-важните:

Таблица 2. *Ключови показатели за управление*

Индикатор	Описание	Цел
ROI (възвръщаемост на инвестициите)	{Нетна печалба}}/{{Инвестирани средства}}	Оптимизиране на капиталовложенията
CAPEX/OPEX съотношение	{Капиталови разходи}}/{{Оперативни разходи}}	Устойчив баланс между растеж и поддръжка
CH_4 Emissions Intensity	{Обеми метанови емисии}}/{ {Обем пренесен газ}}	Намаляване на въглеродния отпечатък
Надеждност на мрежата (SAIDI/SAIFI)	Средно време на прекъсване на доставка	Поддържане на качество на услугата
Индекс на адаптивност към климатични политики	Интернализиран въглероден риск и водородна готовност	Съвместимост със „Зелената сделка“

В условията на глобална трансформация и декарбонизация, този набор от индикатори позволява не просто мониторинг, а прогнозен контрол и бенчмаркинг спрямо водещи компании в сектора. Сравнителният анализ между оператори (например национални мрежови компании в Германия, Франция и България) показва значителни различия в нивата на инвестиции в дигитализация, готовност за смесени потоци и ангажираност към ESG цели.

Заключение

Влиянието на Европейската „Зелена сделка“ върху инвестициите в газовата инфраструктура оказва дълбоко отражение върху ефективността и посоката на развитие на сектора. Нарастващият натиск за декарбонизация и постигане на климатична неутралност до 2050 г. трансформира инвестиционната логика – от мащабни конвенционални проекти към гъвкави, нисковъглеродни и технологично адаптивни решения. Инвеститорите са изправени пред редица неопределености: нестабилни пазарни сигнали, трудни за прогнозиране регулаторни рамки и динамика в цените на горивата и въглеродните квоти. Това налага прилагането на сценарийно моделиране, оценка на дългосрочна съвместимост с алтернативни горива (като водород) и внимателно съобразяване със стратегиите на ЕС и националните енергийни политики. Затова новите инвестиции в газовата инфраструктура трябва да бъдат не само технологично устойчиви, но и съвместими с бъдеща декарбонизирана енергийна система.

Управлението на риска при планиране, изграждане и експлоатация на газовата инфраструктура се осъществява в условия на сложна и променлива среда, характеризираща се с технологични, пазарни, политически и организационни рискове. Противоречивата изходна информация, както и нестабилността на регулаторните сигнали, затрудняват дългосрочното проектиране и изискват адаптивен и гъвкав подход. Технологичният риск, свързан с новите изисквания за съвместимост с алтернативни горива, се съчетава с несигурността в цените на природния газ и на въглеродните емисии. Политическата нестабилност, както на национално, така и на международно ниво, засилва необходимостта от изграждане на многосценарни модели за устойчиво развитие. От особено значение е човешкият фактор – необходимостта от висока квалификация, адаптивност и нова организационна култура, ориентирана към устойчиво управление на риска.

В този контекст управлението на газова компания изисква стратегическа трансформация и организационна готовност за действие в условия на дългосрочна несигурност и висока регулаторна динамика. Интегритетът между стратегическата визия на компанията и климатичните политики на ЕС се превръща в основен индикатор за нейната устойчивост и достъп до инвестиционни ресурси. Управлението на стратегията трябва да бъде гъвкаво и адаптивно, а оперативните действия – подчинени на непрекъснат мониторинг чрез ключови показатели за ефективност (KPI), свързани както с икономическата рентабилност, така и с екологичната съвместимост. Успешната газова компания е тази, която съчетава иновации, дигитализация, проактивно управление на риска и способност да се адаптира към динамично променящата се роля на газа в европейския енергиен преход.

Литература

Регламент (ЕС) 2024/1789 на Европейския парламент и на Съвета относно вътрешните пазари на газ от възобновяеми източници, природен газ и водород

Регламент (ЕС) 2024/1787 на Европейския парламент и на Съвета за намаляване на емисиите на метан в сектора на енергетиката

Регламент (ЕС) 2024/1735 на Европейския парламент и на Съвета за създаване на рамка от мерки за укрепване на европейската екосистема за производство в областта на технологиите за нулеви нетни емисии

Регламент (ЕС) 2023/956 на Европейския парламент и на Съвета за създаване на механизъм за корекция на въглеродните емисии на границите

Регламент (ЕС) 2023/1804 на Европейския парламент и на Съвета за разгръщането на инфраструктура за алтернативни горива

ENTSOG *The Hydrogen and Natural Gas, 2024.*

Harvard Business Essentials, Crisis Management: *Mastering the Skills to Prevent Disasters*, 2004.

Marcogaz, (2024). *Cost estimation of hydrogen admission into existing natural gas infrastructure and end use*.

IGU*, Gas is essential to human progress and global growth.*

ACER*, Single programming report 2025-2027,* December 2024.

A REVIEW OF CHALLENGES WITH USING THE NATURAL GAS SYSTEMS FOR HYDROGEN

Lachezar Hristov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: lachezar.hr@gmail.com

ABSTRACT. Hydrogen is an attractive energy carrier as it can be integrated into the existing natural gas infrastructure. Governments and companies are exploring the possibility of blending hydrogen with natural gas, aiming for a gradual transition to pure hydrogen. Differences in the properties of hydrogen and natural gas create challenges in terms of safety, efficiency, and costs. Hydrogen blending offers limited reduction in greenhouse gas emissions, while a full transition requires significant investments and modernisation. Even with technical solutions, serious safety and environmental risks remain.

Key words*:* alternative fuels, decarbonisation, energy, hydrogen, natural gas.

ПРЕГЛЕД НА ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВАТА ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ПРИРОДНИ ГАЗОВИ СИСТЕМИ ЗА ВОДОРОД

Лъчезар Христов

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

РЕЗЮМЕ. Водородът е привлекателен енергиен носител, тъй като може да се интегрира в съществуващата инфраструктура за природен газ. Правителства и компании изследват възможността за смесване на водород с природен газ с цел постепенно преминаване към чист водород. Разликите в свойствата на водорода и природния газ създават предизвикателства за безопасността, ефективността и разходите. Смесването на водород предлага ограничено намаляване на парниковите газове, а пълният преход изисква значителни инвестиции и модернизация. Дори при технически решения, остават сериозни рискове за безопасността и околната среда.

Ключови думи: алтернативни горива, декарбонизация, енергия, водород, природен газ.

Въведение

Природният газ осигурява 25% от световната енергия. Той е основно метан (CH_4), а изгарянето му причинява около 30% от глобалните CO_2 емисии. Допълнително, течовете на метан по веригата добавят 12% към световните емисии на CH_4. Заедно тези газове са причина за 75% от затоплянето на климата досега. Дългосрочното решение е преминаване към енергия без изкопаеми горива. Водородът (H_2) е вариант, защото при изгаряне не отделя CO_2. Но днес почти целият водород се произвежда от изкопаеми горива без улавяне на CO_2, което също замърсява. Разработват се нови технологии за чисто производство, но има трудности – високи разходи и рискове за околната среда. Газовата мрежа е направена за метан, а не за водород. Разликите в свойствата им създават проблеми за безопасността, доставките и разходите. Нужно е да се прецени:

- как тези разлики влияят на системата;
- кои части от мрежата се засягат;
- какви решения са възможни и с какви предизвикателства са свързани.

Сравнение на свойствата на водорода и природния газ

Въпреки че както водородът (H_2), така и метанът (CH_4) са безцветни и без мирис при стандартни условия на температура и налягане, те се различават значително по физични и химични свойства (виж Таблица 1). Тези различия пораждат множество предизвикателства при разглеждането на възможността за използване на съществуващата природногазова инфраструктура за водород, което ще бъде обсъдено по-подробно. Освен това, макар метанът да абсорбира атмосферна радиация, а водородът – не, и двата газа могат да претърпят окисление, което влияе на атмосферната химия и води до увеличаване на концентрациите на други парникови газове.

Физични свойства

Има две важни физични разлики между водорода и метана, които са свързани с размера на техните молекули и температурите, при които те преминават в течно състояние.

Първо, водородът е най-малкият и най-лек елемент в периодичната таблица. Неговата молекула, съставена от два водородни атома, е най-малката и най-леката от всички молекули. Плътността на водорода е осем пъти по-малка от тази на метана, а скоростта, с която водородът се разпръсква във въздуха (дифузира), е около три пъти по-висока (виж Таблица 1). Това означава, че водородът може по-лесно и по-бързо да изтича от тръбопроводи, да прониква през различни материали и да се издига към по-високи части на затворени пространства.

Второ, температурите, при които водородът и метанът могат да се превърнат в течност (което е важно за съхранение и транспорт), са много различни. Водородът става течен при много ниска температура – около -253°C, докато метанът това го прави при около -162°C при нормално атмосферно налягане. Това означава, че за да се превърне водородът в течност, е нужна много повече енергия, а също и има по-голяма вероятност да се губи чрез изпарение, защото разликата между температурата на течния водород и околната среда е много голяма.

Таблица 1: *Характеристики на водорода в сравнение с природния газ (метан*

Свойство	Водород (H_2)	Метан (CH_4)	Сравнение на H_2 с природния газ	Последици от H_2 спрямо природен газ
Молекулно тегло (g/mol)	2.016	16-Apr	≈8× по-лек	По-бързо преминава през уплътнения, тръби и други „меки“ материали
Плътност (NTP) (kg/m³)	0.08375	0.668	≈8× по-ниска плътност	Издига се и се натрупва в затворени пространства
Коефициент на дифузия в въздух (m^2/s, 20°C)	7.55E-05	2.21E-05	По-висока дифузивност	По-висока пропускливост през материали
Коефициент на дифузия във вода (m^2/s, 20°C)	4.58E-09	1.62E-09		
Температура на втечняване (°C)	-253	-162	≈100°C по-студена	Изисква много повече енергия за втечняване
Реактивност	Връзка H-H, симетрия	Връзка C-H, асиметрия	Образуване на слаби връзки	Ускорява умората и намалява якостта на метали
Взривоопасен обхват (% обем)	Apr-75	3/5/2015	По-широк взривоопасен обхват	Повишен риск от експлозии
Енергия на възпламеняване (nJ)	20	290	По-ниска енергия за запалване	По-лесно се възпламенява
Макс. скорост на пламъка (m/s)	3-Apr	2-Sep	≈8× по-бързо разпространение	По-ниска стабилност на пламъка, риск от възврат
Цвят на пламъка	Невидим на дневна светлина	Видим	По-труден за засичане	По-голям риск, трудно се забелязва
Адиабатна темп. на пламъка (°C)	2100	1950	По-висока температура	Повече NO_x продукти
Горивна стойност (MJ/m³)	12-Jul	39.8	1/3 от енергията на природния газ	3× по-висока скорост на подаване за същата енергия

Химични свойства

Има четири основни химични разлики между водорода (H_2) и метана (CH_4), които засягат тяхната реактивност, запалимост, особености на пламъка и енергийна стойност:

Първо, водородът е по-реактивен от метана. Метанът е най-неактивният сред въглеводородите. Въпреки че силата на връзката между атомите във водорода и метана е почти еднаква, структурата на молекулата на водорода позволява по-лесното протичане на химични реакции. Това означава, че водородът може по-бързо да реагира с някои материали, като например цимент, и затова е по-трудно да се съхранява под земята в сравнение с метана.

Второ, водородът е по-запалим от метана. Той може да се запали в много по-широк диапазон на концентрация във въздуха — от 4% до 75%, докато при метана този диапазон е много по-тесен (около 5–15%). Това означава, че при изтичане на водород е по-лесно да се достигне запалима смес и да възникне пожар, дори при по-малки количества. Освен това, водородът се запалва много по-лесно, тъй като изисква по-малко енергия за възпламеняване — дори искра от електрическо устройство може да го запали.

Трето, пламъкът на водорода е по-опасен от този на метана. Водородът гори с много по-висока скорост — около осем пъти по-бързо от метана. Това увеличава риска от обратен пламък (когато пламъкът се връща обратно в горивната система), нестабилност на горенето и опасност от повишено налягане при запалване в затворени пространства. Пламъкът на водорода също почти не излъчва видима светлина, което го прави труден за забелязване. Освен това, при горене водородът достига по-висока температура, което може да доведе до образуването на повече вредни азотни оксиди (NOx).

Четвърто, водородът има много висока енергийна стойност на килограм, но на обем — около една трета от тази на природния газ в тръбопровод. Това означава, че при един и същ обем газ водородът съдържа значително по-малко енергия в сравнение с метана, което трябва да се има предвид при съхранение и транспорт.

Въздействия върху цялата структура на природния газ

Физическите и химичните разлики между H_2 и CH_4 са от критично значение за пригодността на използване на различни компоненти от съществуващата инфраструктура за природен газ за нуждите на H_2. Те допринасят за рискове, свързани с безопасността, енергийните доставки, климата и разходите. Макар че съществуват решения за смекчаване на някои от тези рискове, те често са свързани с нови предизвикателства и рискове.

Производство

Природният газ се добива чрез сондажи и се транспортира по събирателни тръбопроводи до преработвателни инсталации. Там се пречиства от нежелани съединения като по-тежки въглеводороди, сяра, вода, CO_2 и понякога се добавя азот за регулиране на калоричността. В бъдеще с ниски въглеродни емисии, природният газ може да се използва ограничено – предимно за химическо производство или при нужда от пиков капацитет. Повечето съществуващи съоръжения и инфраструктура ще имат ограничено приложение и ще са необходими нови инсталации, пригодени за водород. Преносната инфраструктура за природен газ е изградена от стоманени тръби с висока якост, покрития срещу корозия и защита от външни влияния. Работи при високо налягане (50–150 бара), а налягането се поддържа чрез компресорни станции, които често се задвижват с газ от самата мрежа. Основен проблем при използване на съществуващите тръбопроводи за водород е умората на материала, предизвикана от водород (HAFC). Високоякостните стомани, използвани в газовите тръби, са чувствителни към напукване, когато са изложени на водород и механични напрежения. Пукнатини могат да се развият около заварки, дефекти или корозирали участъци.

Това може да доведе до течове или разрушаване на тръбата. Нискоякостните стомани са по-устойчиви, но също могат да се повредят при висока температура и високо налягане на водорода. Тестове в Европа показват, че водородът ускорява умората на материала и намалява здравината му, като ефектите зависят от вида стомана. Заварките и производствените дефекти остават най-уязвимите места. Тъй като повечето тръбопроводи са подземни, визуалната инспекция е затруднена. Затова основно се използват вътрешни методи за проверка на състоянието. Рискът от преждевременна повреда при пренасочване към водород е реален. Има предложения за решения, но всяко от тях носи нови предизвикателства.

Смесване с природен газ. Водородът може да се добавя към природния газ в малки количества, за да се избегне рискът от уморно напукване (HAFC). Това обаче силно ограничава декарбонизацията – по-високи нива на H_2 не са безопасни без сериозни ремонти или подмяна на тръбите. Дори при ниски концентрации, водородът може да ускори износването на стоманата до 30 пъти и да намали якостта ѝ наполовина.

Вътрешни покрития и облицовки. Облицоването на тръбите отвътре може да намали риска от корозия и повреди, но е технически сложно и скъпо. Водородът прониква през почти всички материали, включително метали. Това налага вентилационни отвори между тръбата и облицовката – в противен случай налягането и натрупването на газ създават опасност от разрушаване. Освен това, изтичането на H_2 във въздуха е рисково и допринася за климатични промени. Нови материали като графен и MXene се изследват, но внедряването им в реални условия остава трудно.

Постоянно налягане и механичен стрес. Поддържането на постоянно налягане може да ограничи напукването, но е трудно на практика. Вибрации, температурни промени и движения на земята също водят до напрежения. Освен това, при преминаване към водород често се налага намаляване на работното налягане до половината или една трета от сегашното, което значително намалява преносния капацитет и обема на съхранявана енергия в тръбопровода.

Налични са безопасни материали за изграждане на нови тръбопроводи, специално проектирани за водород. Такива водородни линии, изградени от мека стомана, стомана с по-ниска якост или високоякостна стомана, съществуват и функционират успешно от десетилетия. Това е възможно благодарение на специален инженерен подход – внимателен избор на проектно налягане, материали, заваръчни методи и изпитвания, насочени изцяло към водородни приложения. За разлика от инфраструктурата за природен газ, водородните тръбопроводи обикновено работят при по-ниско и стабилно налягане, под 65 бара. Едно от основните предизвикателства при използването на водород обаче е неговата ниска енергийна плътност. Водородът съдържа приблизително три пъти по-малко енергия на обем в сравнение с природния газ. Това означава, че ако тръбопроводът работи при три пъти по-ниско налягане (както често се изисква за безопасност), и се вземе предвид и по-ниската калоричност на водорода, тогава възможността за пренос на енергия намалява деветкратно. За да се компенсира това, дебитът на газа трябва значително да се увеличи, което на свой ред води до повече триене в тръбата и необходимост от по-мощни компресори. Компресирането на водород изисква много повече енергия от това на природен газ – поне три пъти повече, поради ниското молекулно тегло на водорода и нуждата от по-висок обемен дебит. Ако се налага и понижаване на работното налягане поради материални ограничения на тръбопровода, енергийните загуби се увеличават още повече. Това подкопава ползите от използването на водорода като „чист“ енергиен източник, защото вложената енергия за транспорт се повишава значително. Допълнителен проблем е, че съществуващите компресори, използвани в мрежите за природен газ, често не са съвместими с водород. Те са изградени от материали и компоненти, които не могат да гарантират безопасна и ефективна работа с H_2. Необходима е подмяна или сериозна модификация на компресорите, включително двигателите, уплътненията и клапаните. Ако не се подменят или пригодят адекватно, съществува риск от изпускане на водород през уплътнения и затворени клапани. Това не само води до загуби на гориво, но и представлява сериозна опасност за безопасността и допринася за климатични промени, тъй като изтеклият водород има затоплящ ефект в атмосферата.

Локално разпределение

Когато природният газ достигне до градската граница (“city gate”), той се подава към потребителите чрез мрежа от подземни тръби с ниско до средно налягане. Тези мрежи са изградени от различни материали – от стомана и чугун до полиетилен (HDPE). Заради по-ниското налягане и рядкото използване на високоякостни стомани, рискът от напукване, предизвикано от водород, е значително по-малък. Основните проблеми при използване на съществуващите мрежи за водород не са в здравината на тръбите, а в пропускливостта и риска от изтичане, пожари, експлозии и климатични ефекти. Водородът лесно преминава през материали като HDPE и различни полимери и уплътнения, тъй като молекулата му е по-малка и по-дифузна от тази на метана. Това води до по-високи скорости на изтичане – измерванията показват, че в пластмасови тръби водородът изтича 4–5 пъти по-бързо от природния газ. Има и данни, че водородът променя свойствата на HDPE с времето, затова са нужни още изследвания, за да се определи безопасният срок на експлоатация на тези тръби. При еластомерни уплътнения се наблюдава отслабване на здравината, което също увеличава риска от течове. Едно възможно решение е вътрешно покритие на тръбите за намаляване на пропускливостта, но това изисква допълнително проучване. Смесването на водород с природен газ е друг подход, макар и с ограничен потенциал за намаляване на въглеродните емисии. За постигане на чист водород се обсъждат методи като мембранна филтрация и адсорбция, но те водят до значителни разходи и емисии. Също така, съществуващите газови измервателни уреди ще трябва да бъдат променени или подменени, тъй като трябва да измерват по-високи обемни дебити, а сегашните

диафрагмени устройства не отчитат точно смеси, съдържащи водород.

Съхранение

Газовите системи разполагат с големи и малки съоръжения за съхранение – сезонни за зимата и дневни буфери, които компенсират колебанията в търсенето. Част от това съхранение се осъществява чрез самата газова мрежа, като налягането в тръбите се повишава над минималното – това се нарича „line pack“. То е важно за поддържане на стабилността при аварии или резки промени в потреблението, и няма аналог в електрическите мрежи. Ако мрежата премине към водород, чиято енергийна плътност е около три пъти по-ниска от тази на природния газ, капацитетът на line pack ще намалее значително. Допълнително понижение на налягането поради риска от водород при съществуващите материали би намалило още повече възможността за съхранение. Това означава по-ниска надеждност или нужда от нови съоръжения, които досега не са били необходими. В страните със студен климат газовите системи използват сезонно съхранение в подземни обекти като изчерпани находища, солни каверни и водоносни пластове. При водорода възникват проблеми – той е по-реактивен, което може да замърси газа, особено в изчерпани находища, където се изисква високочист водород (например за горивни клетки). Солта не реагира с водород, затова солните каверни са по-подходящи, но не са достъпни навсякъде, а изграждането им изисква сериозни инвестиции.

Крайна употреба

Оборудването, което работи с газови смеси, е проектирано спрямо техните специфични свойства. Тези свойства — като енергийна плътност, скорост на горене, температура на пламъка, експлозивен диапазон и индекс на Воббе — влияят върху работата и безопасността на уредите. Повечето уреди за природен газ могат да работят със смес, съдържаща до около 20% водород по обем (около 7% по енергия) без значителни промени. Обаче уредите, направени за изкопаем газ, не са подходящи за чист водород без сериозни модификации. Водородът е различен от метана по размер на молекулите, което позволява по-лесно изтичане през материали и повишава риска от експлозии и емисии. Той има по-ниска плътност, издига се и се натрупва в горните части на затворени помещения, което също повишава риска. Пламъкът на водорода гори по-бързо, при по-висока температура и е по-малко видим, което затруднява безопасната работа. Затова горелките и системите за контрол трябва да се преработят, за да гарантират безопасност при използване на водород. Например, уредите с водородни горелки имат устройства за спиране на подаването на газ, ако пламъкът изгасне. Проучване в Обединеното кралство, което оценява риска при ползване на чист водород в домакинствата, показва, че вероятността и сериозността на пожари и експлозии ще се увеличат, въпреки че броят на тежките наранявания и смъртни случаи ще остане приблизително същият. Затова се препоръчва инсталирането на специални клапани за спиране на излишния газ и вентилационни отвори (10×10 см, до 1.5 м от тавана), които да отвеждат изтеклия водород. Това обаче ще доведе до загуба на топлина и повишена консумация на отопление. Друг проблем е използването на ароматизатори за откриване на газови течове. Конвенционалните сяросъдържащи ароматизатори увреждат катализаторите на горивни клетки. В момента няма безопасни и съвместими ароматизатори за водородни системи с горивни клетки, въпреки че има изследвания в тази посока. При горенето на водорода няма въглероден оксид, но се отделят азотни оксиди (NOx), които са вредни за здравето и околната среда. Поради по-високата температура на пламъка, емисиите на NOx може да са по-високи в сравнение с природния газ. Намаляването на NOx чрез каталитични методи е възможно, но скъпо и изисква постоянна поддръжка.

Заключение

Замяната на природния газ с водород с нулеви или ниски въглеродни емисии често се разглежда като обещаващ начин за декарбонизация, тъй като позволява повторно използване на съществуващата инфраструктура, която е скъпа и икономически ценна. Въпреки това, тази статия показва, че има много нерешени проблеми при използването на водород в настоящата газова система заради различията му с метана — основната съставка на природния газ. Тези различия засягат целия цикъл на природния газ — от производство, транспорт и съхранение, до разпределение и крайна употреба.

Настоящата инфраструктура не може да се използва ефективно без намаляване на работното налягане или значителни и често несигурни инвестиции. Освен това уредите в домакинствата трябва да се подменят, а дори и тогава остават сериозни въпроси за безопасността и здравето, които изискват нови решения. Макар смесването на водород с природен газ да намалява някои рискове, то не осигурява съществена декарбонизация, тъй като съдържанието на водород по енергия е ниско. Например, 20% водород по обем в сместа дава само около 7% намаление на въглеродните емисии на единица произведена енергия. Смесването също носи рискове за безопасността и околната среда, свързани с изтичания и емисии на азотни оксиди (NOx). Общо взето, въпреки че използването на съществуващата газова система за водород изглежда удобно, ограничената ефективност, рисковете и липсата на достатъчно данни показват, че такъв преход носи малко ползи спрямо повишените опасности — дори ако техническите и финансови трудности бъдат преодолени.

От друга страна, продължаването на употребата на природен газ не е устойчива стратегия за борба с климатичните промени. С оглед на физическите и химичните свойства на водорода, той не е най-ефективният начин за декарбонизация в жилищата и сградите. Във всяка стратегия за намаляване на въглеродните емисии е важно да се прецени дали изобщо е нужно използването на гориво и да се обмислят по-ефективни варианти, като директната електрификация с възобновяема енергия.

Литература

Bauer, C., Treyer, K., Antonini, C., et al. (2022). On the climate impacts of blue hydrogen production. *Sustain Energy Fuels, 6*:66-75.

Brown, S., Posta, G., McLaughlin, P. (2021). Work Package 7 Safety Assessment: Conclusions Report (Incorporating Quantitative Risk Assessment. ARUP and Kiwa Gastec. https://static1.squarespace.com/static/5b8eae345cfd799896a803f4/t/60e399b094b0d322fb0dadc4/1625528759977/conclusions+inc+QRA.pdf

Crabtree, RH. (1995). Aspects of methane chemistry. *Chem Rev., 95*:987-1007.

de Kleijne, K., de Coninck, H., van Zelm, R., Huijbregts, MAJ, Hanssen ,SV. (2022). The many greenhouse gas footprints of green hydrogen. *Sustain Energy Fuels, 6*:4383-4387.

Erdener BC, Sergi B, Guerra OJ, et al. (2023). A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines. Int J Hydrogen Energy.48:5595-5617.

Giovanniello MA, Cybulsky AN, Schittekatte T, Mallapragada DS. (2024). The influence of additionality and time-matching requirements on the emissions from grid-connected hydrogen production. *Nat Energy. 9*. 197-207. doi:10.1038/s41560-023-01435-0

Hydrogen Council. Hydrogen Insights. (2023): An Update on the State of the Global Hydrogen Economy, with a Deep Dive into North America. https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023/

Klebanoff LE, Pratt JW, LaFleur CB. (2017). Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry. Int J Hydrogen Energy. 42. 757-774.

Leeds City Gate (Report: H21). (2017). https://www.northerngasnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2017/04/H21-Report-Interactive-PDF-July-2016.compressed.pdf

Melaina MW, Antonia O, Penev M. (2013). Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. National Renewable Energy Laboratory. doi:10.2172/1068610

Ocko IB, Hamburg SP. (2022). Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmos Chem Phys. 22*:9349-9368.

Prinzhofer A, Cissé CST, Diallo AB. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). Int J Hydrogen Energy. 43.19315-19326.

San Marchi, C., Somerday, BP, Nibur, KA. (2014). Development of methods for evaluating hydrogen compatibility and suitability. Int J Hydrogen Energy. 39:20434-20439.

Sand M, Skeie RB, Sandstad M, et al. (2023). A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen. *Commun. Earth Environ. 4:*203.

Scholand M. (2024). Debunking the Hydrogen Hype: Why Europe Should Pursue Electrification Instead of Hydrogen for Cooking and Heating. Environmental Coalition on Standards (ECOS). https://ecostandard.org/wp-content/uploads/2024/05/Debunkingthe-Hydrogen-Hype_M2S2-Energy-Ltd2.pdf

Smolinka, T., Bergmann, H., Garche, J., Kusnezoff, M. (2022). *Chapter 4: The history of water electrolysis from its beginnings to the present.* In: Smolinka, T. et. al., Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications. Elsevier. 83-164.

Sun, T., Shrestha, E., Hamburg, S., Kupers, R., Ocko, I. (2024). Climate impacts of hydrogen and methane emissions can considerably reduce the climate benefits across key hydrogen use cases and time scales. *Environ Sci Technol. 58*. 5299-5309. doi:10. 1021/acs.est.3c09030

Szopa, S., Naik, V. (2021). *Short-lived climate forcers*. In: Masson-Delmotte V. et. al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. 817-922.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (1999). Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled. http://www.epa.gov/ttn/catc.

Warwick, N., Archibald, A., Griffiths, P., et al. (2023). Atmospheric composition and climate impacts of a future hydrogen economy. Atmos Chem Phys. 23, 13451-13467.

Zaneva-Dobranova, E., Hristov, N. (2021). New Opportunities For Energy Storage In Bulgaria - Promising Hydrogen Technologies, *International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM*, 21(1.1), pp. 535–542

STUDY OF HYDROGEN STORAGE SOLUTIONS: TECHNOLOGIES, COSTS, AND INNOVATION

Viliyan Yanakiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: qnakiev91@abv.bg

ABSTRACT. Hydrogen is considered one of the key elements in the transition to sustainable and low-carbon energy. As the lightest chemical element and a carrier of high energy density, it can be crucial role in the decarbonisation of industries branches of economy such as transport, industry, and the energy sector. However, efficient storage of hydrogen remains a challenge related to its physicochemical properties: low density in the gaseous state, high volatility, and ignition risks.

Key words: hydrogen, automated control, energy efficiency.

ПРОУЧВАНЕ НА РЕШЕНИЯ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ВОДОРОД: ТЕХНОЛОГИИ, РАЗХОДИ И ИНОВАЦИИ

Вилиян Янакиев

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

РЕЗЮМЕ. Водородът се смята за един от ключовите елементи в прехода към устойчива и нисковъглеродна енергетика. Като най-лекият химичен елемент и носител на висока енергийна плътност, той може да играе решаваща роля в декарбонизацията на индустрии като транспорта, промишлеността и енергийния сектор. Въпреки това, ефективното съхранение на водород остава предизвикателство, свързано с неговите физикохимични свойства: ниска плътност в газообразно състояние, висока летливост и рискове от запалване.

Ключови думи: водород, автоматизирано управление, енергийна ефективност.

Въведение

Основната трудност при съхранението на водород е неговата ниска енергийна плътност при нормални условия. За да се преодолее това, се използват три основни подхода:

Съхранение под високо налягане (до 700 bar). Компресирането на водород в газообразна форма изисква специални контейнери, устойчиви на налягане, което увеличава разходите и теглото на системите.

Криогенно съхранение (при температури под -253°C): В течно състояние водородът заема по-малък обем, но изисква сложна изолация и енергоемко охлаждане.

Съхранение в твърда фаза. Включва адсорбция в материали като метални хидриди, въглеродни нанотръби или MOFs (Metal-Organic Frameworks), където водородът се свързва химично или физически с носителя. Този метод обещава по-висока безопасност и плътност, но все още се разработва за масово приложение.

Съдове под налягане

Чрез увеличаване на обемната енергийна плътност на газообразния водород чрез компресия, необходимият обем за съхранение намалява. При 20°C и 1,01 bar водородът има плътност от 0,084 kg/m³, която нараства до 7,80 kg/m³ при 100 bar и 49,9 kg/m³ при 1000 bar.

Различните методи за компресиране изискват различни енергийни разходи. Изотермичната компресия е най-малко енергоемката, като теоретично се нуждае от 1,5 и 2,0 kWh/kg за налягане съответно от 253 и 1013 bar.

Въпреки това условията в реалния свят увеличават тези стойности до 2,5 и 4,0 kWh/kg поради допълнителни загуби, което представлява 7,5% и 12% от долната топлинна стойност на водорода (LHV).

Криогенно съхранение

Друг вариант за съхранение е криогенният течен водород, но втечняването изисква допълнителна енергия, което повишава общата енергийна интензивност.

Теоретичната минимална нужда от електроенергия за втечняване на водород е 2,9 kWh/kgH_2 (8,7% от долната топлинна стойност на водорода), докато настоящите инсталации работят при 9-15 kWh/kgH_2.

По-новите проекти могат да постигнат около 6,8 kWh/kgH_2, което все още е около 20% от енергийното съдържание. Обратно, компресирането на газообразен водород до 500 bar изисква само около 2,4 kWh/kgH_2, или 7% от енергийното съдържание.



Фиг. 1. ***Резервоар за криогенен газ за съхранение на течен водород***

Вътрешният контейнер от неръждаема стомана е съвместим с криогенни течности и е оптимизиран по отношение на теглото. Покритието осигурява максимална устойчивост на корозия и отговаря на най-високите стандарти за съответствие с околната среда. Модулната

тръбопроводна система съчетава висока производителност, издръжливост и ниски разходи за поддръжка. Намален е броят на съединенията, рискът от външно изтичане е сведен до минимум и значително е опростен процесът на инсталиране. Има лесен за използване контролен клапан и инструмент. Функциите му за безопасност осигурят максимална защита за операторите и оборудването. Отговаря на най-строгите сеизмични изисквания. Съвместим е с различни компоненти и аксесоари за криогенни резервоари.

Съхранение на водорода в тръбопроводи.

Тръбопроводите за водород могат ефективно да съхраняват значителен обем водород, подобно на природния газ (NG).

Водородът обаче има по-ниска енергийна плътност, например, природен газ при 90 bar съхранява четири пъти повече енергия от водорода при същото налягане. Мрежата за природен газ в САЩ може да съхранява около 4% от годишната употреба, което се равнява на около 15 дни употреба, докато водородът ще съхранява само около 1%, или приблизително 4 дни.

И в двата случая съхранението по тръбопроводи служи само за кратко време, тъй като газът непрекъснато се движи към пазарите.

Сравнение на съхранението на водород

Тръбопроводи с диаметри 1000 mm и 1200 mm и дължина 100 km могат да поддържат ежедневно съхранение на 150-300 тона H_2. Това може да се постигне при конкурентно изравнена цена от 0,05 $/kg или по-ниска.

Типична солна пещера, която съдържа 500 тона водород, струва около 18 милиона долара, което означава 36 долара за килограм водород. Когато водородът се съхранява в хранилище за 120 дни, изравнената цена достига $1,2 на килограм, а съхранението му за 15 дни струва $0,15 на килограм.

Съд с високо налягане, предназначен за станция, произвеждаща 1000 kg водород на ден, може да побере 1000 kg и има цена от $600 000. Изравнената цена за съхранение ще бъде приблизително $0,16 на килограм водород, с допълнителна такса от $0,40 на килограм за компресия.

Разходите за резервоар за съхранение на течен водород варират от $30 до $50 за kg H_2. Ако се съхранява за една седмица, разходите за съхранение ще бъдат между $0,055 и $0,091 на килограм H_2, с допълнителни $1,20 на килограм за втечняване в голям завод.

Приложения и бъдещо развитие

Ефективните системи за съхранение са критични за внедряването на водородни технологии като горивни клетки за електрически автомобили, балансиране на енергийните мрежи с възобновяеми източници и захранване на тежкия транспорт (напр. кораби, камиони). Водородът е най-лекият химичен елемент и предлага най-доброто съотношение енергия/тегло на всички горива. Основният недостатък на използването на водорода е, че той има най-ниската плътност на съхранение от всички горива. Въпреки това е възможно да се съхраняват големи количества водород в неговата чиста форма като се компресира до много високо налягане и се съхранява в контейнери, които са проектирани и сертифицирани да издържат това налягане. По този начин той може да се съхранява като газ или да се охлади под неговата критична точка и да се съхранява като течност. Днес водородът се транспортира от мястото на производство до мястото на употреба чрез тръбопроводи, с камиони, втечнен до ниска температура или в тръби в газообразно състояние, с железопътен транспорт или чрез шлепове. Транспортирането на газообразният водород чрез съществуващите тръбопроводи в момента е най-евтиният вариант за доставка на големи обеми от водород. Високите първоначални капиталови разходи за строителството на нов тръбопровод представляват сериозна пречка за разширяване на инфраструктурата за доставка. Една от възможностите за бързо разширяване на инфраструктурата за доставка на водород е да се адаптира част от инфраструктурата за доставка на природен газ, за да се пренася водород. Приспособяването на газопроводите за природен газ да пренасят смес от природен газ и водород (до около 20%) могат да изискват само малки промени в тръбопровода, докато приспособяването на съществуващите газопроводи за пренос на природен газ за доставка на чист водород може да изисква по-съществени изменения. Съвременните изследвания и анализи разглеждат и двата подхода.

Друг възможен процес на доставка включва производството на носител на течен водород на централно място, изпомпване чрез тръбопроводи до пунктовете за разпределение и зареждане, както и обработката на носителя на място за производството на водород. Етанолът, получен от възобновяеми ресурси с почти нулеви нетни емисии на парникови газове, е между носителите на водород, взети под внимание. Течните носители на водород предлагат потенциал за използване на съществуващ тръбопровод и инфраструктура от товарни автомобили за транспортиране на водорода. Камиони, вагони, кораби и шлепове също могат да се използват, за да се доставя компресиран газообразен или втечнен водород.

Технологиите, използвани за съхранение на водород на борда на превозни средства, също ще повлияят проектирането и избора на система за доставка на водород и инфраструктура. За да се увеличи общата енергийна ефективност, системата трябва да избягва ненужните енергоемки етапи и технологията за доставка да съответства с автомобилни технологии за съхранение на борда.

Водородът може да се съхранява също и в твърдо състояние в химическа комбинация с други елементи. Има редица метали, които могат да усвояват водород много пъти над собственото си тегло. Водородът се освобождава от тези съединения чрез нагряване или добавяне на вода. Изследват се и други носители за съхранение на водород, като например въглеродни нанотръби и микросфери от стъкло.

Заключение

Съхранението на водород е критичен елемент в неговата стойностна верига, чието развитие ще определи скоростта на зеления преход. Комбинация от иновации в материалознанието, инженерството и нормативната рамка ще бъдат ключови за преодоляване на текущите

ограничения и реализиране на пълния потенциал на водорода като чиста енергия. Водородът представлява много обещаващо бъдеще за енергетиката, особено в контекста на прехода към зелена енергия. Той може да се използва като гориво за транспорт, отопление и производство на електроенергия, а същевременно е екологично чист.

Литература

БДС 8544-88 Бутилки стоманени за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 0,85 до 5.00 dm3.

БДС 14399-89 Техника на безопасността: съдове, работещи под налягане. Изисквания към измервателните уреди.

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

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.

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.

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 CONCEPTUAL APPROACH TO EVALUATING MINING OPERATIONS IN BULGARIA WITH EMPHASIS ON CRITICAL AND STRATEGIC RAW MATERIALS

Evgeniya Aleksandrova

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

ABSTRACT. This publication presents a systematic assessment of mining activities in Bulgaria in light of the growing global interest in critical and strategic raw materials (CRMs), driven by the transition to a low-carbon economy and digital transformation, as well as the country’s available natural resource potential. The study proposes a conceptual model for identifying, analysing, and evaluating active mining sites associated with the extraction and processing of mineral resources containing CRMs. The model incorporates criteria for sustainable development, economic relevance, technological feasibility, and environmental responsibility, integrating geological, economic, and regulatory information. The objective is to develop strategies for implementing innovative technologies aimed at the recovery of additional CRM-bearing ore reserves under the conditions of existing mines, aligned with the European Union’s priorities for resource security and the green transition.

Key words: critical and strategic raw materials (CRMs), mining activities, sustainable resource management, low-carbon and green transition.

КОНЦЕПЦИЯ ЗА ОЦЕНКА НА МИННОДОБИВНАТА ДЕЙНОСТ В БЪЛГАРИЯ С ФОКУС ВЪРХУ КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ СУРОВИНИ

Евгения Александрова

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

РЕЗЮМЕ: В публикацията е извършена систематизирана оценка на миннодобивната дейност в България предвид засиления глобален интерес към критичните и стратегически суровини, породен от прехода към нисковъглеродна икономика и цифрова трансформация, както и в съответствие с наличния потенциал на природни ресурси. Изследването представя концептуален модел за идентифициране, анализ и оценка на действащите минни обекти в страната, свързани с добива и преработката на полезни изкопаеми, съдържащи критични и стратегически суровини. Моделът включва критерии за устойчиво развитие, икономическа значимост, технологична приложимост и екологична отговорност, като съчетава геоложка, икономическа и нормативна информация. Целта е да се разработят стратегии за въвеждането на иновативни технологии за разкриване и добив на допълнителни запаси руди, съдържащи критични елементи за условията на действащи рудници, в съответствие с приоритетите на Европейския съюз за ресурсна сигурност и зелена трансформация.

Ключови думи: критични и стратегически суровини, минно-добивна дейност, устойчиво управление на ресурси, нисковъглероден и зелен преход.

Въведение

Развитието на съвременните технологии в производствените отрасли и енергетиката е немислимо без използването на така наречените критични и стратегически суровини (КСС). Проучването, добивът и преработката на минерални суровини, съдържащи КСС са предпоставка за устойчивото развитие на иновационни практики в редица сектори на промишлеността, енергетиката и националната сигурност (Yankova and Grigorova, 2024). Съгласно определенията в Закона за критичните суровини Regulation - EU - 2024/1252, приет от Европейския съюз (ЕС), *критичните суровини* са материали, които са от съществено значение за икономиката на ЕС и са изложени на значителен риск за тяхното осигуряване поради нарастващите тенденции на изчерпване на запасите на подземни богатства (Critical Raw Materials, Act 2024). *Стратегическите суровини* са част от критичните суровини и заемат приоритетно място в зеления преход, дигиталната трансформация, военната промишленост и космическите изследвания.

Примери за критични елементи са алуминий, който намира широко приложение в транспортния сектор и строителството, литий, който е незаменим компонент за производството на акумулаторни батерии и германий, който е ключов елемент при производството на оптични влакна и системи за нощно виждане. В глобален аспект, стратегическите и критични материали обхващат не само добитите минерални суровини, но и техните производни продукти. Сред тях се открояват въглеродните влакна и фибри, специализираните и високотехнологичните сплави, на които се дължат постиженията в съвременната електроника, производството на батерии с голяма мощност, полупроводници и фармацевтични продукти (Bashir et al., 2021; Chaudhary et al. 2024).

Редкоземните елементи, включително лантан, церий, неодим, скандий и итрий, намират широко приложение в промишлената електроника и отбранителния сектор. Те се използват за производството на мобилни комуникационни апарати и устройства, хардуерни компоненти на компютърни системи и конфигурации (в т.ч. процесори, видеокарти, дискове и др.), системи за радиолокационно наблюдение и оптични лазерни системи. Според данни на Европейската комисия (2023), критичните елементи като литий, кобалт и никел са необходими за производството на акумулаторни батерии за електромобили, докато телур, галиум и индий са сред основните суровини, използвани в технологиите за възобновяеми енергийни източници и в сектора на микроелектрониката.

Международната енергийна агенция (IEA, 2022) подчертава, че преходът към нисковъглеродна икономика и съпътстващата го зелена трансформация водят до рязко увеличаване на търсенето на критични суровини. Например, производството на електрически превозни средства изисква до шест пъти повече от тези ресурси в сравнение с конвенционалните автомобили с вътрешно горене. Това увеличава риска от недостиг и нестабилност в световните вериги за доставка. Освен това, според данни на Центъра за стратегически и международни изследвания (Ladislaw et al., 2022), ограниченото предлагане на

редкоземни елементи е причина за колебания в производството на редица промишлени отрасли, особено в сектори като военната отбрана, телекомуникациите и енергетиката.

Значителна част от тези ресурси се добиват в труднодостъпни региони или в територии с географски и политически ограничения, което затруднява до голяма степен тяхната доставка. Представеният анализ на Университета на обединените нации (UNU, 2023) показва, че критичните елементи представляват не само икономически актив, но и стратегически фактор в геополитическите отношения. Китай, например, контролира около 70% от глобалния потенциал на природни ресурси за преработка на редкоземни елементи, като отразява влиянието си върху международните пазари. Исторически пример е кризата през 2010 г. когато Пекин временно прекратява износа на такива суровини за Япония, предизвиквайки световно напрежение на пазара.

Подобни зависимости пораждат сериозни предизвикателства и за България. Голяма част от минно-добивните предприятия са проектирани първоначално за извличане на основните минерални ресурси, а не на КСС, което налага количествен и качествен анализ на запасите и ресурсите на полезни изкопаеми с цел установяване на допълнителни възможности за изземване, оптимизиране на прилаганите технологии, преструктуриране и организация на производствените процеси в откритите и подземните рудници, внедряване на „смарт“ технологии и изкуствен интелект за автоматизирано управление, наблюдение и контрол на минната механизация и, не на последно място, минимизиране на геотехническия риск. Разработването на симулационни модели за изземване на допълнителни природни запаси и усъвършенстването на технологиите въз основа на дългогодишния практически опит на действащите рудници е от изключително значение за постигане на ефективно управление и добив на КСС. Това предполага въвеждане на интегриран подход, отчитащ геоложките условия, производствените резултати от прилаганите минни технологии, икономическата ефективност, екологичната съвместимост и обществената нагласа при разработването на допълнителни запаси в съществуващите минно-добивни предприятия.

В този контекст настоящото изследване си поставя за цел разработването на концептуален модел за оценка на миннодобивната дейност в България с фокус върху КСС, чрез идентифициране на съществуващи обекти с потенциални възможности, анализ на технологичната готовност за вторично извличане на КСС и оценка на рисковете и възможностите за устойчиво управление.

Алгоритъм за разработване на концептуален модел за оценка на действащи минни предприятия

Основната задача при разработването на концептуален модел е систематизиране на информацията относно геоложките, технологичните, икономическите и екологичните параметри, въз основа на която да се идентифицира наличието на КСС (Smith & Johnson, 2019).

За разработване на концептуален модел за оценка на действащи минни предприятия е предложен алгоритъм, включващ следните етапи (фиг.1):



Фиг. 1. Алгоритъм за разработване на концептуален модел

Етап 1: Интегриране и структуриране на събраните данни в информационна платформа, условно наречена „База данни“ от налични източници, включваща действащи минни обекти като открити и подземни рудници, хвостохранилища, техногенни насипища, интегрирани съоръжения за съхранение на минни отпадъци и други. Като първоначални източници на информация относно добива

на подземни богатства, срока на експлоатация могат да се ползват публичните регистри, например Националният концесионен регистър, Националният статистически институт и други. База данни включва:

- Инженерно-геоложка, хидроложка и хидрогеоложка характеристика на разработваното находище;
- Актуално състояние на запасите и ресурсите;
- Технология на разработване и срок на експлоатация;
- Технико-икономически показатели на минно-добивното предприятие;
- Екологични и социални фактори;
- Законодателство и геополитически условия.

Етап 2: Идентифициране на елементи на КСС. През този етап се извършва предварителна оценка за наличието на запаси полезни изкопаеми, съдържащи критични елементи и потенциалните възможности за тяхното извличане, съобразени с технологията на разработване и срока на експлоатация на минното предприятия. Основните задачи, които се решават са:

- Сравнителен анализ на аналогични условия на разработване на известни находища или минни обекти;
- Преглед на съдържанията на критични елементи като рений, кобалт, литий, галий и други;
- Приложение на индикатори за откриване на съпътстващи елементи на КСС.

При установяване на индикативни данни за наличието на КСС, спрямо актуалното състояние на запасите в изследваното находище, се пристъпва към структуриране и обобщаване на резултатите от информационната платформа „База данни“ с цел създаване на устойчив аналитичен модел, т.е. преминаване към Етап 3. Ако по време на анализа се установи липсата на индикатори за наличие на КСС, минният обект се класифицира като нерелевантен за целите на оценката и процесът следва да бъде прекратен или пренасочен към обекти с по-висок потенциал. В случай на недостатъчна информация в първичната инженерно-геоложка информация, може да се актуализира концептуалния модел чрез интегриране на данни от допълнителни геоложки и експлоатационни проучвания (Tomova, 2024, Kisyov et al., 2025).

Етап 3: Систематизиране на информацията. За систематизиране на информацията се прилага многокритериален подход, базиран на следните критерии (Gonzalez et al., 2022):

- Геоложки критерии: геометрични, качествени и количествени параметри на находището на полезни изкопаеми, в т.ч. брой и вид на рудните тела (рудна жила, щокообразни, пластови и др.), наклон, дълбочина на залягане, пространствено местоположение в масива, размери, геометрични характеристики на рудните тела (дебелина, дължина, широчина), взаимно положение на рудните тела, оводненост на масива, съдържание на полезни компоненти, концентрация, съпътстващи минерали, количество на запасите и ресурсите към момента на разработване, граници на рудничното поле, концесионни граници, географско положение и други (Kumar and Singh, 2021, Терзийски и др., 2024). Задълбоченият анализ и систематизирането на посочените параметри са от съществено значение при разработването и моделирането на иновативни технологии за изземване на допълнителни запаси, съдържащи КСС.
- Анализ и оценка на съществуващите технологии за добив и преработка на минералните суровини за изследвания минен обект. Разглеждат се технологичните възможности за внедряване на иновации като се извършва оценка на енергийната ефективност и екологичното въздействие, съобразено с изискванията за намаляване на вредните емисии (Wang et al., 2020). Особено внимание се отделя на степента на автоматизация на производствените процеси, възможностите за дигитализация и прилагането на системи за контрол и мониторинг в реално време. Освен това се отчита технологичната готовност на предприятието за преход към устойчиви производствени технологии в съответствие с принципите на кръговата икономика и политиките за декарбонизация в минния сектор (OECD, 2021). Оценката позволява да се посочат „тесните“ места в производствените процеси, нуждаещи се от модернизация, както и потенциални пътища за повишаване на производителността и намаляване на екологичния отпечатък.
- Икономически критерии: Анализ на производствените разходи, възможностите за инвестиции за минно оборудване и автоматизация, финансовата устойчивост на минното предприятие и чувствителността към изменение в търсенето и предлагането на пазара. Производствените разходи са от първостепенно значение, определящи конкурентоспособността и рентабилността на минното предприятие. Те включват разходи за труд, енергия, поддръжка на оборудване, консумативи и екологични мерки. Според OECD (2021), ефективното управление и оптимизация на тези разходи са от съществено значение за устойчивото развитие на минно-добивните компании. Възможностите за инвестиции в минни машини и съоръжения, автоматизирано управление и използването на „смарт“ технологии допринасят за повишаване на производителността и намаляване на производствените разходи. Внедряването на съвременни технологии, като роботизирани машини, дистанционно управление и интелигентни системи за мониторинг, способства за по-добро управление на ресурсите и подобряване на безопасността на труда. Според OECD (2021) подобен тип инвестиции създават предпоставки за дългосрочна конкурентоспособност и подпомагат стратегическата гъвкавост в условия на пазарна несигурност. Финансовата устойчивост на минното предприятие зависи от способността му да управлява риска, свързан с колебанията в търсенето и предлагането на пазара на минерални суровини. Чувствителността към пазарните промени налага необходимостта от гъвкави стратегии за производство и диверсификация на продуктите. Анализът на чувствителността позволява да се идентифицират критични точки, при които измененията в цените или обемите на продукцията биха повлияли значително върху финансовите показатели (OECD, 2021).
- *Екологични и социални критерии*: Влиянието върху околната среда обхваща оценката на емисиите на парникови газове и други замърсители, управлението на твърди и опасни отпадъци, както и устойчивото използване и опазване на водните ресурси. Включват се и аспекти като рекултивация на нарушени терени, биоразнообразие и дългосрочна екологична отговорност на минното предприятие (Smith et al., 2022). Особено значение се

отдава на прилагането на добри минни практики за предотвратяване и минимизиране на вредното въздействие върху природната среда, включително чрез използване на пречиствателни съоръжения и технологии за повторно използване на води и отпадъци.

Социалните аспекти включват анализ на въздействието върху местното население включително заетостта, създаването на работни места, безопасни условия на труд и здраве. Разглежда се и степента на социална ангажираност и прозрачност в комуникацията с местните заинтересовани страни, както и наличието на механизми за обществено участие при вземането на решения. В съответствие с принципите на устойчивото развитие се отчита ролята на предприятието в повишаването на качеството на живот в региона, в който се осъществява дейността (Smith et al., 2022).

• *Законодателство и геополитически критерии*: Законодателната уредба играе съществена роля за устойчивото развитие и дългосрочната експлоатация на находищата на полезни изкопаеми. В това число се включват нормативните изисквания, свързани с добива и преработката на минерални суровини, процедурите за отдаване на концесии и разрешителни, екологичните регулации, изискванията за ликвидация и рекултивация, както и ангажиментите за социална отговорност. Спазването на тези регулаторни изисквания не само гарантира законността на дейността, но също така оказва пряко въздействие върху финансовата и производствената устойчивост на минното предприятие (UNEP, 2023). Освен това, геополитическата среда, включително нивото на политическа стабилност, сигурността на правото на собственост върху земята и ресурсите, ефективността на институциите и прозрачността в управлението, оказва значително влияние върху инвестиционния риск и дългосрочната предвидимост на минно-добивните работи. В нестабилна или непредсказуема политическа обстановка се увеличава рискът, свързан с промени в законодателството, възможни регулаторни забавяния или конфликти със заинтересовани страни. Геополитическите съображения включват също и международните търговски отношения, санкции и достъп до стратегически пазари, особено в контекста на световната конкуренция за критични и стратегически суровини.

Етап 4: Оценка на риска. Оценката на риска представлява съществен етап от концептуалния модел за анализ на минни предприятия с оглед на възможността за изземване на допълнителни запаси полезни изкопаеми, съдържащи критични и стратегически елементи. Основната цел на този етап е да се идентифицират, класифицират и анализират рисковите фактори, които могат да повлияят върху устойчивостта, икономическата ефективност и дългосрочната експлоатация на изследвания минен обект. Извършва се класификация на видовете риск, която включва следните категории:

• Геоложки риск, свързан с несигурността в геоложкия модел, стохастичния характер в съдържанието и разпределението на полезни компоненти в рудните тела, хидрогеоложките особености и физико-механичните свойства на масива;

• Технологичен риск, който включва несъответствие на наличната технология и комплексна механизация в рудника със специфичните условия на разработване на находището, ниска степен на автоматизирано управление, морално остаряло минно оборудване или липса на възможности за извличане на съпътстващи елементи;

• Екологичен риск, произтичащ от замърсяване на околната среда, неефективно управление на отпадъци и емисии, както и несъответствие с екологичните стандарти;

• Социален риск, свързан с въздействието върху местното население, липсата на социално одобрение или обществено напрежение;

• Икономически риск, включващ непредсказуемост в пазарните условия, неустойчиви производствени разходи и несигурност в инвестиционната възвращаемост;

• Регулаторен и геополитически риск, които включват промени в законодателството, затруднения при получаване на разрешителни, политическа нестабилност и международни търговски ограничения.

Оценката на риска се извършва чрез многокритериален анализ и експертна оценка, отразяваща количествени и качествени показатели. Използват се методи като:

• SWOT анализ за определяне на силните и слабите страни на минния обект, както и на потенциалните възможности и заплахи;

• Матрица на риска, при която се оценява вероятността от настъпване на дадено събитие спрямо неговото въздействие;

• Многофакторен анализ и анализ на чувствителността, чрез които се оценяват влиянието на отделните параметри върху крайните резултати от добива и преработката на КСС;

• Симулационен анализ, при който се моделират алтернативни бъдещи състояния, например при промяна в цените на суровините, законови ограничения или технологични иновации.

За всеки анализиран обект се изготвя профил на риска, който служи за приоритизирането, формулирането на мерки за оптимизирането и планирането на бъдещи инвестиции. Профилът указва и нуждата от допълнителни проучвания при наличие на информационни дефицити.

Оценката на риска е динамичен процес, който трябва да се актуализира периодично, съобразно пазарните условия, технологичния напредък, екологичните и социалните предизвикателства. Гъвкавостта и приложимостта на модела са ключови за неговото устойчиво прилагане в реални условия и за постигане на дългосрочна устойчивост на минната индустрия.

При установяване на висока степен на риск за изследвания обект е необходимо своевременно да се актуализира концептуалният модел с оглед адекватно управление и минимизиране на потенциалните негативни последици.

Етап 5: Разработване на иновационни технологии и симулационни модели за добив на КСС. В заключителния етап от концептуалния модел за минния обект се решават редица задачи, свързани с интегрирането на иновационни технологии и разработването на симулационни модели с цел оптимизация на минно-добивните процеси и преработката на КСС. Този подход позволява по-прецизно управление на добива на минерални суровини чрез цифрово моделиране на производствената мощност, системата на разработване, календарния график, технико-икономическите показатели и срока на експлоатация на находището. В симулационните модели се включват основни технологични характеристики като тип и

производителност на минното оборудване, режим на работа, енергопотребление, качество и количество на изземваните полезни изкопаеми, както и параметри, свързани с преработката и оползотворяването на отпадъци. Моделите позволяват да се симулират различни варианти за развитие на минните работи при открит или подземен добив, като се отчитат техническите ограничения, екологичните норми и пазарните условия.

Моделирането подпомага вземането на решения за оптимални технологии и инвестиции, които максимизират ефективността, намаляват риска и гарантират устойчивост с отчитане на динамиката на пазара.

Въз основа на изложената методология и приложените критерии, алгоритъмът за разработване на концептуален модел предоставя структурирана рамка за оценка на съществуващи минни обекти с оглед на тяхната пригодност за добив на критични и стратегически суровини. Прилагането на този подход в български условия позволява да се направи сравнителен анализ между различни предприятия като се открояят обектите с най-висок потенциал за допълнителна експлоатация на КСС. Получените резултати от практическата му реализация очертават конкретни възможности за развитие, оптимизация на производствените процеси и стратегическо планиране в съответствие с целите на зеления преход и нисковъглеродните технологии.

Приложение на концептуалния модел за условията на България

Предложеният концептуален модел за оценка на миннодобивната дейност с фокус върху добива на критични и стратегически суровини е съобразен с инженерно-геоложките, икономическите и институционалните особености на България. Основните аспекти на модела включват:

• *Геоложка характеристика и актуално състояние на запасите на полезни изкопаеми, съдържащи КСС или съпътстващи компоненти*. Оценката на наличните ресурси се извършва въз основа на данни от НСИ, Минно-геоложкия университет, Министерството на енергетиката и геоложки проучвания, отчитайки както утвърдени, така и перспективни находища. Прилагането на модела в българските условия потвърждава високия потенциал в райони като Средногорието, Източните Родопи и Западна Стара планина, където се концентрират значителни запаси от мед, злато, сребро, антимон и други КСС.

• *Икономически показатели и въздействие* – България разполага с добре развит минно-добивен и преработвателен отрасъл, а моделът включва анализ на добавената стойност, създадена от добива и преработката на КСС, както и дългосрочните икономически ползи за местните минни региони и държавата.

• *Устойчиво развитие и екологични изисквания.* В условията на действащи минни обекти на територията на България, моделът е приложен чрез оценка на добрите практики за рекултивация на терени, мониторинг и контрол върху емисиите, управление на отпадъци и рециклиране на суровини. Използвани са примери от дейността на рудници като „Ада тепе“, „Асарел“, „Елаците“, „Челопеч“ и други, които прилагат съвременни технологии при добива на полезни изкопаеми.

• *Законодателство и стратегическо планиране*. Концептуалният модел е използван за намиране на пропуски в нормативната база и необходимостта от адаптиране на национални политики спрямо европейските регламенти (напр. CRM Act на ЕС, Европейската стратегия за КСС, Зеления пакт). В частност се обръща внимание на липсата на координирана национална стратегия за управление на КСС.

• Социален аспект и обществено мнение. Представеният модел акцентира върху значението на общественото мнение и приемане на миннодобивната промишленост и нуждата от по-активен диалог между компаниите, местните власти и засегнатите общности. Българските условия показват разнородна картина – от утвърдени партньорства (както в района на Етрополе и Челопеч) до изразени обществени резерви спрямо нови концесии.

Резултати

Предложения концептуален модел за оценка на миннодобивната дейност в България с фокус върху изземване на допълнителни запаси полезни изкопаеми, съдържащи критични и стратегически суровини дава основание да се идентифицират находища със стратегическо значение за страната. Анализът очертава четири района с висок потенциал за устойчив добив на КСС, включително Средногорието, Източните Родопи, Чипровци и Панагюрище. Утвърдените рудници в Челопеч, Елаците и Ада тепе продължават да бъдат гръбнакът на сектора.

Данните за периода 2020–2023 г. показват устойчиво развитие при добива на медни руди (35–40 млн. t годишно) и златосъдържащи руди (около 800 хил. – 1 млн. t), с висока степен на усвояване на съпътстващи метали. Това потвърждава способността на минния бранш да поддържа икономическа устойчивост, въпреки глобалните предизвикателства на пазара на минерални суровини.

Установена е необходимостта от уеднаквяване на критериите за определяне на КСС в националната нормативна рамка, както и от механизми за ускорено административно обслужване на инвестиционни проекти с европейски приоритет.

Рудниците като „Ада тепе“, „Челопеч“, „Елаците“ и „Асарел“ показват възможността за добив на КСС при високи екологични и социални стандарти, като предлагат модели за апробиране в нови проекти.

Заключение

Настоящото изследване подчертава ключовата роля на критичните и стратегически суровини за развитието на съвременните технологии, икономиката и националната сигурност. В контекста на глобалните предизвикателства, свързани с ограниченото предлагане и геополитическата несигурност е необходим интегриран подход за ефективно управление и устойчив добив на тези ресурси.

Предложеният концептуален модел за оценка на миннодобивната дейност в България акцентира върху

систематизиране и интегриране на ключови геоложки, технологични, икономически, екологични и законодателни параметри, които да подпомогнат идентифицирането и използването на КСС в съществуващите минни предприятия. Многокритериалният анализ дава възможност за оптимизация на производствените процеси, внедряване на иновативни и екологосъобразни технологии, както и за минимизиране на технологичния и икономическия риск, свързани с добива.

Ефективното прилагане на този модел би могло да подпомогне стратегическата независимост на България в областта на критичните суровини, да стимулира модернизацията и дигитализацията на минната индустрия и да осигури дългосрочна устойчивост на сектора в условията на нарастващо глобално търсене и динамична геополитическа среда.

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

Bashir, T., S. Ismail, Y. Song, R. Irfan, S. Yang, S. Zhou, J. Zhao, L. Gao (2021) A Review of the Energy Storage Aspects of Chemical Elements for Lithium-Ion Based Batteries. Energy Mater. 2021, 1, 100019.

Chaudhary, R., J. Xu, Z. Xia, L. Asp. (2024). "Unveiling the Multifunctional Carbon Fiber Structural Battery." Advanced Materials, 36(10), 202409725.

Critical Raw Materials Act (2024): Regulation - EU - 2024/1252 - EN - EUR-Lex - https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1252&qid=1715612182632

European Commission. Critical Raw Materials Act: Ensuring Secure and Sustainable Supply Chains for EU Green and Digital Future. Brussels, 2023.

Gonzalez, L., Martinez, P., & Lopez, J. (2022). Criteria for Sustainable Mining Practices. Minerals Engineering, 159, 106682

International Energy Agency. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA, 2022

Kisyov, A., M. Tomova, I. Koprev (2025) Geophysical Methods for Optimizing Mining Waste Management. Lecture Notes in Networks and Systems, 2025 Vol. 883 LNNS, Pages 204-209, ISSN: 2367-3370, ISBN: 978-303174706-9, DOI 10.1007/978-3-031-74707-6_22

Kumar, S., R. Singh (2021). Geological and Geotechnical Characterization of Mineral Deposits. Resources Policy, 70, 101982

Ladislaw, S., et al. (2022). Critical Minerals and the Role of U.S. Mining in a Low-Carbon Future. Center for Strategic and International Studies (CSIS), 2022

OECD. (2021). Economic Assessment of Mineral Resources. Paris: OECD Publishing.

Smith, T., L. White, P. Brown (2022). Environmental and Social Impacts of Mining Activities. Journal of Cleaner Production, 349, 131342.

Terziyski, D., Asenovski, S., Koprev, I. (2024) Advanced Optimisation Strategies for Road Construction in Open Pits: an Approach Focusing on Geotechnical Stability. Annual of the University of mining and geology "St. Ivan Rilski", 2024, T. 67, p. 84-86, ISSN 2738-8808; ISSN 2738-8816

Tomova, M. (2024). Geophysical Survey in Enhancing Decision-Making Process and Mine Planning: Case Studies from Bulgaria. International Conference on Research in Engineering, Technology and Science (ICRETS) Pages 339-343, ISBN: 978-625-6959-51-4

UNEP (2023). Regulatory Frameworks for Sustainable Mining. Nairobi: United Nations Environment Programme.

United Nations University (UNU). (2023). What Are Critical Minerals, and Why Are They So Important?. https://unu.edu/merit/news/what-are-critical-minerals-and-why-are-they-so-important

Wang, X., Y. Chen, L. Zhao (2020). Technological Innovations in Mineral Processing. Minerals Engineering, 150, 106280

Yankova, T., I. Grigorova (2024) Beneficiation of sulfide ore from a porphyry-copper deposit. Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies, Vol. 18/2024, pp.114-124, ISSN 1314-7269 (Online)

APPLICATION OF SATELLITE REMOTE SENSING METHODS FOR THE MAPPING OF HARD-TO-ACCESS AREAS

Nataliya Aleksandrova[1], Asparuh Kamburov[1], Lyubomir Ivanov[2]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nataliya.aleksandrova@mgu.bg
[2]Institute of Mathematics and Informatics, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia; E-mail: lyubomail@yahoo.com
Corresponding author: nataliya.aleksandrova@mgu.bg

ABSTRACT. The article presents an innovative methodology for using satellite remote sensing methods as a fast and affordable way to produce cartographic products. Three main data sources are analysed: 1) the *Sentinel* satellite mission - multispectral data from the *Sentinel 2B* satellite were used; 2) the *Landsat* satellite mission - data from the *Landsat 8* satellite were used; 3) Reference Elevation Model of Antarctica (REMA), built from a set of multiple individual stereoscopic digital elevation models extracted from satellite images from the *WorldView-1*, *WorldView-2*, *WorldView-3,* and *GeoEye-1* missions. As a result of data processing from *Sentinel 2B* and *Landsat 8*, classified raster datasets were obtained, and a model with terrain contours from the Reference Elevation Model. The experimental part includes the creation of a topographic map at a scale of 1:50 000 for a selected geographical area (the Havre Mountains on Alexander Island, Antarctica), with a spatial resolution corresponding to terrain element size of 2 m. The toponymical data for the geographical features on the map were provided by the Antarctic Place-Names Commission at the Ministry of Foreign Affairs of Bulgaria.

Key words: remote sensing, cartography, REMA, Sentinel, Landsat.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА СПЪТНИКОВИ ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ЗА КАРТОГРАФИРАНЕ НА ТРУДНОДОСТЪПНИ ОБЛАСТИ

Наталия Александрова[1], Аспарух Камбуров[1], Любомир Иванов[2]
[1]Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
[2]Институт по математика и информатика, Българска академия на науките, 1113 София

РЕЗЮМЕ. Статията представя една иновативна методология за използване на спътникови методи за дистанционни изследвания като бърз и достъпен начин за производство на картографски продукти. Анализирани са три основни източника на данни: 1) спътникова мисия Sentinel – използвани са мултиспектрални данни от спътникова мисия Sentinel-2; 2) спътникова мисия Landsat - използвани са мултиспектрални данни от спътникова мисия Landsat 8; 3) референтен височинен модел на Антарктида (REMA), формиран от набор на множество индивидуални стереоскопични цифрови модели на релефа, генерирани от спътникови изображения, получени от мисиите WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 и GeoEye-1. В резултат на обработката на данните от Sentinel-2 и Landsat-8 са получени класифицирани резултати за теренното покритие, а от референтния височинен модел – модел с хоризонтали на терена. Експерименталната част включва създаване на топографска карта в мащаб 1:50 000 за избран географски район (планината Хавър на остров Александър, Антарктида), с пространствена разделителна способност, която съответства на размер на теренния елемент от 2 m. Топонимните данни за географските обекти в картата са предоставени от Комисията по антарктически наименования към Министерство на външните работи на България.

Ключови думи: дистанционни методи, картография, REMA, Sentinel, Landsat.

Introduction

The main objective of the study is the integration of open access geospatial data (satellite data and digital terrain model) and the application of remote sensing methods as a fast and affordable way to produce map products for hard-to-access areas of the Earth's surface. To test the methodology, a 1:50 000 scale topographic map of a selected geographic area (Alexander Island, Antarctica) was created. The topographic map represents in graphical form the relief of the Havre Mountains, including peaks, saddles, glaciers, coastline and rocky areas free of snow and ice. The selected area is of historical significance as it was one of the original options for the construction of a polar station in 1988 as part of the First Bulgarian Antarctic Expedition.

The presented methods for processing satellite remote sensing data allow the provision of reliable information about the objects located on the Earth's surface, which is of particular importance for hard-to-reach areas. Similar research which, however, uses the synthetic aperture radar (SAR) methods, has been published for the glaciers of Livingston Island by Atanasova (2023) and Atanasova & Nikolov (2022).

Data sources for the methodology

The methodology used data from the Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) for the Alexander Island region, combined with additional multispectral satellite optical imagery, which was processed in a GIS environment.

The application of methods for processing the multispectral satellite images data are used for computer-aided (automatic) classification of non-snow-covered rocks and snow cover by using the Normalised Difference Snow Index (NDSI) (Dozier, 1989), while the Normalised Difference Water Index (NDWI) was applied to distinguish water areas from snow cover (McFeeters, 1996).

Satellites, such as *Landsat 8* and *Sentinel-2*, which provide data in the visible and infrared regions of the electromagnetic spectrum, are suitable for distinguishing different types of land cover; for the continent of Antarctica, these are objects such as snow, rocks, water areas.

The *Landsat 8* satellite has nine spectral bands from the Operational Land Imager (OLI) sensor and two spectral bands from the Thermal Infrared Sensor (TIRS), which have different spatial resolutions: from 15 m, 30 m, 60 m for OLI images and up to 100 m for TIRS images. By processing *Landsat 8* OLI-TIRS images, maps that provide tracking data for the dynamics of the spatial distribution of snow cover were created (Stoyanov, 2024).

The *Sentinel-2* satellite has thirteen spectral bands, with four bands in the visible spectral region and nine bands in the near-infrared to shortwave infrared regions; the bands have different spatial resolutions ranging from 10 m to 60 m.

Landsat and *Sentinel-2* satellite imageries are freely available from several platforms, such as Copernicus Open Access Hub, USGS EROS Archive, Google Earth Engine.

Geospatial data on snow-covered areas, cliffs, coastal margin, etc., for the Antarctic region are available on the Antarctic Digital Database website (ADD) (http://www.add.scar.org)

It is possible to combine data from both passive and active sensor systems for snow cover mapping (Wang et al., 2018). This is a good approach when there are difficulties to distinguish clouds from snow, as optical sensors cannot work effectively in high cloud cover areas with snow cover (Grenfell et al., 1994). Synthetic aperture radar systems provide information on surface texture and structure to distinguish between snowy and rocky terrain.

Software products used for processing, analysis, and visualisation of geospatial data obtained by remote sensing methods are commercial products, such as ERDAS Imagine, ArcGIS, ENVI, Global Mapper, as well as open-source software such as QGIS, GRASS GIS, SNAP, SAGA GIS.

Interpretation and processing of satellite data and REMA model data

Suitable multispectral data from the *Landsat 8* OLI/TIRS satellite missions (Fig. 1) and *Sentinel-2 L1C* were selected to perform the precision mapping. The cloud-free satellite images used in the processing were selected because the main difficulty is not to detect snow when the atmosphere is cloud-free, but to prevent errors in its identification among clouds. The choice of satellite data from the summer period for the Alexander Island area was made, taking into account some specificities of the region:

- rocky areas are supposed to be more visible in the summer season, although even when temperatures are higher, snow and ice are still significant;
- cloud-covered areas are also supposed to be significantly less, compared to the winter period, although this depends on the specific weather conditions.

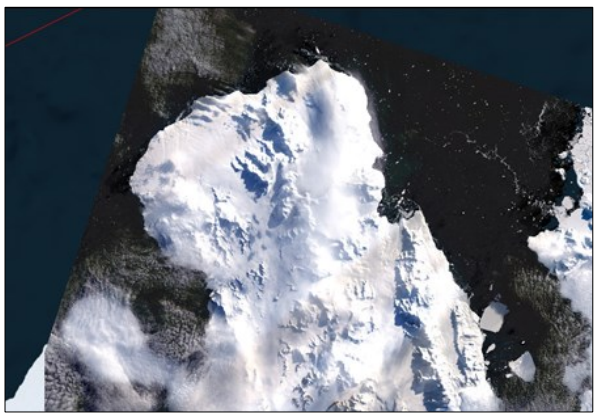


Fig. 1. *Landsat 8* scene (Earth Resources Observatory and Science (EROS) Center (2020). *Landsat 8-9* Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6)

The digital elevation model that was applied to generate the terrain contours was derived from the Reference Elevation Model of Antarctica.

Satellite data

Sentinel-2 L1C satellite image data were used to distinguish snow- and ice-free areas of the Alexander Island terrain cover, and the result is presented in false colours composite - a selection that provides the best visual distinctiveness.

A suitable spectral combination of bands to distinguish snow, ice, and snow- and ice-free areas of the terrain cover is: Blue, SWIR1, and SWIR2, as these bands are highly reflective in the visible part of the electromagnetic spectrum and highly absorptive in the shortwave infrared. The assignment of the spectral bands to the corresponding colours for visualisation was done in order to obtain the best visual discrimination for the analysed object classes. Since the only band used in the visible region is Blue and in these synthetic images it is by the colour red, snow and ice appear bright red. The more ice there is, the stronger the absorption in the shortwave infrared bands and the lower the intensity in these bands, resulting in a more intense red colour (Fig. 2).

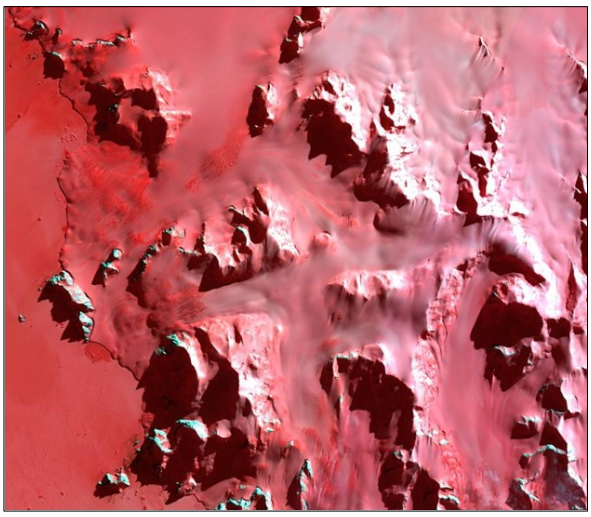


Fig. 2. Part of a *Sentinel-2* Sensor Level-1C scene, with an appropriate spectral band combination applied to distinguish terrain cover containing snow, ice, and snow- and ice-free terrain areas

Thick ice and snow appear bright red, while small ice crystals in high altitude clouds appear red-orange to very pale orange. In the presence of vegetation, it will appear greenish in this combination of spectral bands. Sections of ground cover that are free of snow and ice are visible in bright blue colour in the image.

Although the Normalised Difference Snow Index is useful for evaluation, i.e., it is the best index for snow mapping, the processing was performed by applying machine learning methods from an interpreter (supervised classification method), since using an index does not provide satisfactory results in distinguishing snow cover from clouds. Object-based classification was applied and six training samples (training polygons) were formed for: water, rock, shadow, shaded rock, snow, and snow in water. Based on the training polygons, class descriptions are generated, obtained in a supervised classification mode (Marinov, et al. 2016). After classification, a vector description of these object classes was formed. The vectors describing non-snow-covered rock areas were used to

produce the map. Identification and mapping of land cover changes, based on computer-aided visual interpretation of satellite imagery, was carried out as part of the pan-European CORINE Land Cover project (Koleva, et al. 2018). The sampling by major strata and substrates for the CLC012 and CLCCH2006-12 products included bare rocks and perpetual snow.

The results obtained on the data using the REMA elevation model are compared with data obtained on two indices: the Normalised Difference Snow Index {NDSI=(VIS-SWIR)/(VIS+SWIR)} and the Normalised Difference Water Index {NDWI=(GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)} applied on a *Landsat 8* image. The Normalised Difference Snow Index data represent a spectral band ratio that is determined from the spectral differences of snow in the shortwave infrared and visible spectral bands to identify snow relative to other features in a scene. In the visible wavelengths of the electromagnetic spectrum, snow cover is as bright as clouds and is therefore difficult to distinguish from areas obscured by clouds. In the band with 1.6-micron wavelength, the snow cover absorbs sunlight and, therefore, appears much darker than clouds. This makes it possible to distinguish snow cover from clouds. NDSI values > 0.4 usually indicate the presence of snow.

Reference Elevation Model of Antarctica

The Reference Elevation Model of Antarctica is a digital elevation model with a spatial terrain resolution of 2 m, developed and maintained since 2017 by the Polar Geospatial Center (PGC), a research centre at the University of Minnesota, USA. The model is built by stereophotogrammetric processing of satellite imagery over a 12-year period, and its latest version (2) is dated October 2022. REMA is generated by applying fully automated techniques - stereo autocorrelation of overlapping pairs of optical satellite images, with high spatial resolution from *WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3* and *GeoEye-1* acquired between 2009 and 2021, using open-source Surface Extraction from TIN-based *Searchspace Minimisation (SETSM)* software developed at the Ohio University. Each DEM was vertically referenced with satellite altimetry measurements from *Cryosat-2* and *ICESat*. REMA data are available under a *Creative Commons Attribution 4.0* International Public License (CC-BY-4.0) (Howat et al., 2022).

The processing of the REMA elevation model data and satellite data, as well as the production of the topographic map, are performed in ArcGIS Pro software environment, version 3.4. The raw REMA data are available as overlapping strips of different shapes and sizes, and as a product in the form of 50x50 km square raster mosaics georeferenced in the WGS-84 geodetic reference system (geographic coordinates and ellipsoid heights). Mosaics with identifiers 38_09_1_1_2m_v2.0 and 38_09_1_2_2m_v2.0 are used for the map.

Case study: topographic map of the Havre Mountains on Alexander Island, Antarctica

History and toponymy

The Havre Mountains are a large mountain group forming the northwestern region of Alexander Island, Antarctica. They were first seen in 1821 by a Russian expedition under the command of Fabian Gottlieb von Bellingshausen. They were originally mapped with approximate accuracy by the French Antarctic Expedition, 1908-10, under Jean-Baptiste Charcot, who named them after Le Havre, the French port from which their ship sailed. The mountains were mapped in more detail in the 1960s from aerial photographs taken by the Ronne Antarctic Research Expedition, 1947-48 (SCAR 2025b). The toponymy of the Havre Mountains evolved, as more land and air surveys were carried out in the area and new mapping became available. Most of the later mapping of the Havre Mountains was also British.

The Havre Mountains were surveyed by the British geologists Bernard Care and Richard Burn in 1976/77, and by a British-Bulgarian team comprising geologists Hristo Pimpirev, Borislav Kamenov (both part of the first Bulgarian Antarctic Expedition) and Philip Nell, and mountain guide and medic Peter Marquis in 1987/88. Apart from their geological field work, operating from the team’s base camp in the foothills of St. George Peak (1008 m a.s.l.), Pimpirev and Kamenov chose some appropriate location for a possible Bulgarian base near Balgari Nunatak at Cape Vostok at the northwest extremity of the Havre Mountains. Four other members of the Bulgarian expedition sailed on board the Soviet *Mihail Somov* scientific expedition ship commanded by Captain Feliks Pesyakov, and the two groups were to get together and assemble a couple of huts on the chosen location on Alexander Island. However, that plan failed and the huts were installed on Livingston Island instead (Pimpirev 2013, Ivanov & Ivanova 2022).

There are 72 marked geographic features on the 2025 Bulgarian map, comprising 42 named features and 30 nameless elevations. The names have been given by Bulgaria (21), the United Kingdom (12), the USA (5), Russia (2), and France (2). These could be divided into several categories: Musicians 8; Bulgarian geography 7; Antarctic history 6; British research and support personnel 5; US research and support personnel 5; Bulgarian history 3; French research and support personnel 2; French geography 1; Russian royalty 1; Russian culture 1; Bulgarian culture 1; History of science 1; Descriptive 1.

The local toponymy expanded over time with the following: 2 Russian names in 1821, 2 French in 1912, 6 British in 1961, 1 American in 1969, 5 British and 4 American in 1980, 1 Bulgarian in 1989, 1 British in 2015, and 20 Bulgarian ones in 2017 (SCAR 2025b).

Topographic map of the Havre Mountains

The map is created in the following sequence:

1. Selection of map coordinate system – WGS-84 UTM projection, zone 19S, height system - geoid model EGM96.

2. Coordinate and height transformations of input digital raster data from REMA.

3. Input of vector point layer with toponym data.

4. Creation of 20 m sectional height contours, with index contours multiple of 100.

5. Coastline delineation - for this purpose a contour with a value of 5 m was generated and selected as the coastline boundary. Verification of the coast boundaries was performed by comparison with the Antarctic Digital Database data (ADD_coastline_high_res_line_v7_9 layer), with which the 5 m contour matches to a good approximation for the mapped area (Fig. 3). The coastline is also matched with data derived from two indices, the Normalised Difference Snow Index and the Normalised Difference Water Index.

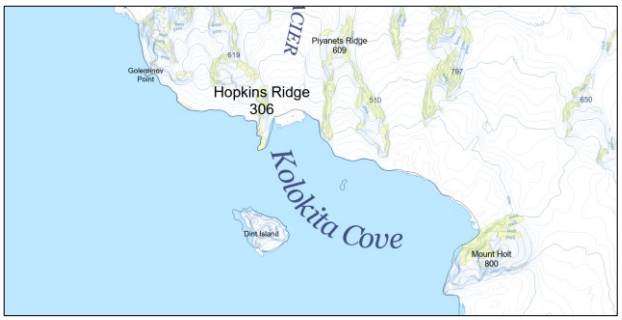


Fig. 3. Part of the map with a discrepancy between the shoreline from ADD data (black contour) **and the 5 m contour from REMA** (dark blue contour)

6. Smoothing of contour under topological conditions of non-intersection with other geographic objects (peaks, coastline, etc.) using the Polynomial Approximation with Exponential Kernel (PAEK) method with a 500 m tolerance and removal of contours with circumference less than 200 m, reported as noise in the REMA DEM.

7. Input and representation of a vector polygon layer with boundaries of ice and snow-free areas (generated from Landsat and *Sentinel* satellite data).

8. Geographical feature labels – set of labels for the following feature classes: glaciers, bays, peaks, saddles, nameless characteristic heights (respectively those covered or not covered with ice/snow), camp of the British-Bulgarian geological survey of 1987/88. The proper visualisation of the location of features, such as glaciers and saddles, the orientation of the inscriptions, and their colouring were done on a height-coloured pad from the REMA digital model (Fig. 4)

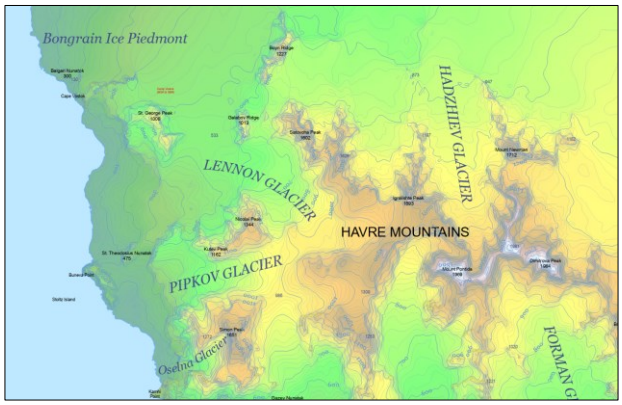


Fig. 4. Part of the topographic map for the Alexander Island area - labels of glaciers and peaks in the Havre Mountains area

9. Creation of the final cartographic product - scaling, metadata input, out-of-frame layout (Fig. 5). The map is published with ISBN 978-619-90008-0-9 (soft cover) and ISBN 978-619-92883-0-6 (digital format PNG).

Conclusion

As a result of the case studies, the following main results can be summarised:

- A methodology for creating digital topographic models and maps of different geographic areas using satellite data and elevation models with appropriate spatial resolution was developed;
- The cartographic products which can be created using this methodology are applicable to a wide range of users in science and practice, including in mining for modelling processes in open pits and open-cast mines;
- The methodology allows the use of remote sensing data as a quick and easy way to produce mapping products for hard-to-reach areas;
- When mapping snowy areas, it is necessary to select appropriate combinations of spectral bands in order to best distinguish the classes of objects analysed: rocks not covered by snow and ice from snowy areas.

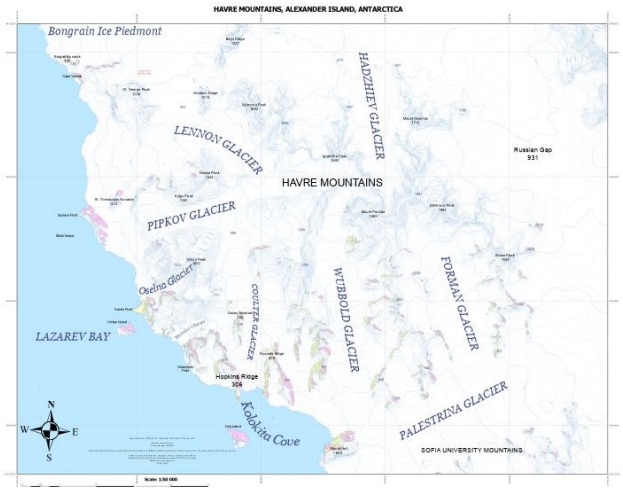


Fig. 5. A map version with ice-free areas from satellite data processing (vector polygons in yellow and pink)

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” for the funding under the scientific project MTF-195/2024.

References

Antarctic Digital Database. (2025, April 28). http://www.add.scar.org

Atanasova, M. (2023). Monitoring na skorostta na leda na lednitsite na ostrov Livingtan chrez vremevi serii ot SAR danni. *XI National Geophysical Conference, 9th June 2023*. https://doi.org/10.48368/BGS-2023.1.N14

Atanasova, M., Nikolov, H. (2022). Creation of glaciers velocity maps in Livingston Island using Sentinel-1 data. *Proceedings Vol. 2, 8th International Conference on Cartography and GIS, 20-25 June 2022, Nessebar,* Bulgaria ISSN: 1314-0604.

Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper, *Remote Sens. Environ*., *28*, 9–22.

Google Earth Engine. (2025, April 28). https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat-8

Grenfell, T.C., Warren, S.G. and Mullen, P.C. (1994). Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and near-infrared wavelengths. *J. Geophys. Res. Atmos*. Vol.99, pp.18669–18684. https://doi.org/10.1029/94JD01484

Howat, Ian, Claire Porter, Myoung-Jon Noh, Erik Husby, S. Khuvis, E. Danish, K. Tomko et al. (2022). The Reference

Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2, Harvard Dataverse, V1. https://doi.org/10.7910/DVN/EBW8UC

Ivanov, L., & Ivanova, N. (2022). *Geographic names. In: The World of Antarctica*. Generis Publishing. pp. 106–117. ISBN 979-8-88676-403-1

Kamburov, A., Ivanov, L. (2024). Application of the Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) for the mapping of Tangra Mountains on Livingston Island. *Proceedings, 9th International Conference on Cartography and GIS,* 16-21 June 2024, Nessebar, Bulgaria, pp. 49-59. ISSN: 1314-0604.

Koleva, R., Tepenliev, Yu., Dimitrov, V. (2018). Promeni v zalesenite ploshti ot gorskite teritorii kd Bulgaria v perioda 1990-2018 g., ustanoveni po rezultatite ot proekta CORINE Zemno pokritie. XXVIII International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, Sofia, 08 - 09 November 2018, Sofia, Bulgaria. ISSN 2367-6051

Marinov, B., Aleksandrova, N., Koleva, P. (2016). Logicheska filtratsiya za podobryavane opisanieto na formata na obektite ot klasifitsirani izobrazheniya s razlichna razdelitelna sposobnost. *Geodeziya, Kartografiya, Zemeustroystvo*, *(3-4)*. ISSN 0324-1610

McFeeters, S.K. (1996). The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing,* 17, 1425-1432. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714

Pimpirev, H. (2013). *Antarkticheski dnevnitsi*. Universitetsko izdatelstvo “Sv. Kliment Ohridski”. ISBN 9789540735498

REMA. (2025, March 31). *Reference Elevation Model of Antarctica.* https://www.pgc.umn.edu/data/rema/

SCAR. (2025, March 31). *Nomenclature from the toponym guide Composite Gazetteer of Antarctica*. https://scar.org/library-data/maps/cga-composite-gazetteer-of-place-names

SCAR. (2025b). Composite Gazetteer of Antarctica. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR). Since 1992, regularly updated

Stoyanov, A. (2024). Prilozhenie na spatnikovi danni ot Sentinel-2 za monitoring na snezhnata pokrivka ot teritoriyata na NP “Tsentralen Balkan”, Stara planina. Proceedings of the Twentieth International Scientific conference SES2024, 22-25.10.2024, Sofia, Bulgaria, pp. 181–186, print ISSN 2603 – 3313, e-ISSN 2603 – 3321

The Copernicus Data Space Ecosystem Browser. (2025, April 28). https://browser.dataspace.copernicus.eu/

USGS EROS Archive. (2025, April 28). https://www.usgs.gov/

Wang, S., Yang, B., Zhou, Y., Wang, F., Zhang, R., and Zhao, Q. (2018). Snow Cover Mapping and Ice Avalanche Monitoring from the Satellite Data of the Sentinels, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3, 1765–1772, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1765-2018.

ENSURING BLAST-SEISMIC PROTECTION FOR A TRANSPORT TUNNEL WITH A RUBBER CONVEYOR BELT IN THE *ELLATZITE* MINING COMPLEX, ETROPOLE

Radoslav Asenov[1], Penko Karamihov[1], Rosen Borisov[2]

[1]”Ellatzite-Med” AD 2086 Mirkovo; E-mail: r.asenov@ellatzite-med.com; p.karamihov@ellatzite-med.com
[2]”Explozivprogres GTM” EOOD, 1588 Sofia; E-mail: r.borisov@Explosiveprogress.eu

ABSTRACT. On an annual basis, a large number of blast fields are detonated at the *Ellatzite* mining complex near the town of Etropole, meaning there is a high intensity of blasting operations. Mass explosions are carried out, which are characterised by a large volume of drilling and blasting activities. A certain part of the blast fields are located at small hypocentral distances from a transport tunnel with a rubber conveyor belt, a Class-I structure, thus creating conditions for blast-seismic impact. The transport tunnel has a length of L=6355 m and a slope of ρ=1.94%. The purpose of this facility is to transport the crushed ore to the processing complex in the village of Mirkovo. Given the importance of this facility, regular monitoring of the blasting operations is conducted to ensure blast-seismic protection.

Key words: seismics.

ОСИГУРЯВАНЕ НА ВЗРИВО-СЕИЗМИЧНА ОХРАНА НА ТРАНСПОРТЕН ТУНЕЛ С МАГИСТРАЛНА ГУМЕНА ТРАНСПОРТНА ЛЕНТА В РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“, ГРАД ЕТРОПОЛЕ

Радослав Асенов[1], Пенко Карамихов[1], Росен Борисов[2]

[1]“Елаците-Мед“ АД, 2086 Мирково
[2]“Експлозивпрогрес ГТМ“ ЕООД, 1588 София

РЕЗЮМЕ. На годишна база в рудник „Елаците“- гр. Етрополе се взривяват голям брой взривни полета, т.е. налице е голяма интензивност на провежданите пробивно-взривни работи. Извършват се масови взривявания, характеризиращи се с голям обем сондажни и взривни дейности. Определена част от взривните полета са разположени на малки хипоцентрални разстояния до транспортен тунел с магистрална гумена транспортна лента (съоръжение от I-клас), които са предпоставка за взриво-сеизмично въздействие. Транспортният тунел е с дължина L= 6355 m и наклон ρ=1,94%. Предназначението на това съоръжение е да транспортира натрошената рудна минна маса до обогатителния комплекс в с. Мирково. Предвид значимостта на съоръжението се извършва редовен мониторинг на провежданите ПВР с цел осигуряване на взриво-сеизмична охрана.

Ключови думи: сеизмика.

1. Въведение

Рудник „Елаците“ е разположен на около 80 km източно от гр. София, на северния склон на Етрополска Стара планина в близост до гр. Етрополе (Фиг. 1).

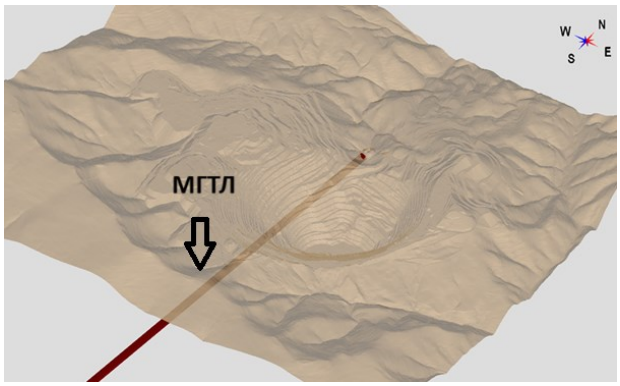


Фиг. 1. Местоположение на рудник „Елаците“

Предвид технологията на разработване се извършват интензивни промишлени пробивно-взривни работи (ПВР). Определена част от тях са разположени на малки хипоцентрални разстояния (r_x) до обекти, които подлежат на взриво-сеизмична охрана (транспортен тунел с магистрална гумена транспортна лента (МГТЛ); КЕТ № 3; транспортен тунел между КЕТ № 1 и КЕТ № 3), т.е. налице е високо взриво-сеизмично въздействие. Усъвършенстването на взривната техника в последните години направи възможно провеждането на сложни взривни работи в близост до и под сгради и съоръжения от подобен тип, чиято цялост не трябва да бъде нарушавана.

Породените вибрации, въздушно-ударната вълна и разлетът на скални късове са с потенциален риск за нарушаване целостта на съоръженията, затова е необходимо взривните дейности да бъдат контролирани.

В западния откос на рудник „Елаците“ е построен вътрешен транспортен тунел с МГТЛ, съоръжение което подлежи на взриво-сеизмична охрана при извършване на промишлени взривни работи (Фиг. 2).



Фиг. 2. Проектно трасе на транспортния тунел с МГТЛ вместен в западния откос на рудничния котлован

Транспортният тунел служи за транспортиране на натрошената минна маса от рудника до обогатителния комплекс в с. Мирково. Той е с дължина L= 6355 m и наклон

ρ=1,94%. В рудничния комплекс входът на тунела се намира на кота 1026,40 m, а изходът е в Обогатителния комплекс и е разположен на кота 903,18 m. В настоящия доклад се разглежда осигуряването на взриво-сеизмична охрана на описаното съоръжение. Анализирани са 3 броя взривни полета на три работни хоризонта: хор.1255, хор.1240 и хор.1225 в северозападната част на рудничния котлован в непосредствена близост над транспортния тунел.

2. Общи сведение за земните вибрации

От физико-механична гледна точка сеизмичните вълни представляват процес на пренасяне на деформации на разстояние.

Средата, в която се разпространяват сеизмичните вълни, оказва влияние върху тяхната скорост на разпространение, особено при натисковите - P и срязващи вълни - SH (хоризонтални), SV (вертикални). В *Таблица 1* са описани физико-механичните свойства на литоложките разновидности, които се срещат в рудник „Елаците“. Теоретично сеизмичните (еластичните) вълни се разпространяват на разстояние, приблизително равно на 120-150 пъти по диаметъра на инициирания заряд от взривно вещество.

Таблица 1. Физико-механични показатели на литоложките разновидности в находище „Елаците“

Литология	Якостни параметри		Деформационни параметри	
	Якост на едноосов натиск	Якост на опън	Надлъжни вълни V_P	Напречни вълни V
	MPa	MPa	m/s	m/s
Филити	11,24	2,09	3714,45	1864,62
Ивичести и петнисти шисти	35,65	4,34	5010,70	2404,76
Хорнфелзи	75,49	7,69	5303,76	2519,38
Монцодиоритови порфирити	87,05	7,42	4245,01	2037,16
Гранодиорити	93,77	9,11	4911,31	2400,76

При инициране на зарядите от взривно вещество, част от енергията, освободена от взрива, се разпространява във всички посоки под формата на сеизмични вълни с различни честоти. Енергията на тези вълни отслабва с разстоянието, като вълните с най-висока честота отслабват най-бързо.

Целта на сеизмо-безопасното взривяване е да се предотврати възникването на остатъчни деформации в масива (Mitkov, 2020). Степента на деформации в масива се определя от отношението на скоростта на колебание на почвата или скалният масив (V) към скоростта на разпространение на сеизмичните вълни (C_p) в дадената среда:

$$\varepsilon = \frac{V}{C_p}, \quad (1)$$

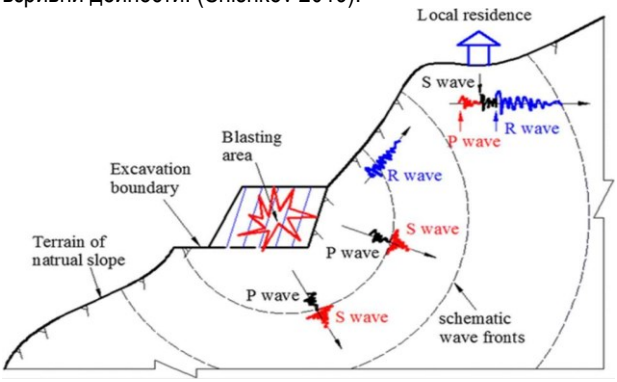
където:

ε- относителна деформация при динамично натоварване и разтоварване на средата

V- максимална скорост на преместване, cm/s

C_p- скорост на разпространение на надлъжните еластични вълни, m/s

Между сеизмичните колебания, породени от взрив и слабите земетресения се наблюдава една съществена разлика, изразяваща се в по-малката продължителност на сътресение на земните маси и на конструкциите в случай на взривни дейности. (Shishkov 2019).



Фиг. 3. Видове взриво-сеизмични вълни. *P*-надлъжни; *S*-напречни; *R*-повърхностни вълни на Релей

Размерът на вибрациите при провеждане на контролирани взривни работи зависи от (Stig O Olofsson):

a. Количеството експлозив в зарядите, взривени едновременно
b. Колко свободни повърхности има взривното поле
c. Характеристиките на скалата
d. Разстоянието до взривното поле
e. Геоложкият строеж на земната покривка

За проектиране на ВР в близост до обекти, при които вибрациите са проблем, е важно да се знае отношението между разстоянието, заряда и вибрациите. Използвайки формулата на Лангефорс за определяне нивото на заряда, може да се изчисли скоростта на вибрациите *(Stig O Olofsson)*:

$$\text{Ниво на заряда} = \frac{Q}{R^{3/2}}, \quad (2)$$

където:

Q - зарядът в килограми в един сондаж или няколко заряда взривени едновременно на едно и също разстояние до обекта, който се охранява, kg

R - разстояние до обекта, m

Скорост на вибрациите:

$$V = K\sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}}, \quad (3)$$

където:

V - скорост на частиците, mm/s

K - константа на средата (трансмисионен фактор), която зависи от хомогенността на скалата и наличието на разломи и напуканост

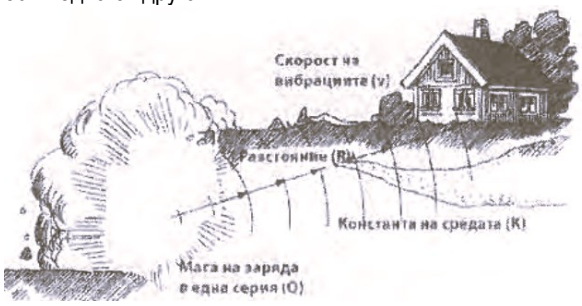
Q - зарядът в един сондаж или няколко заряда, взривени едновременно, на едно и също разстояние до обекта, който се охранява, kg

R - разстояние до обекта, m

3. Извършвани контролни измервания.

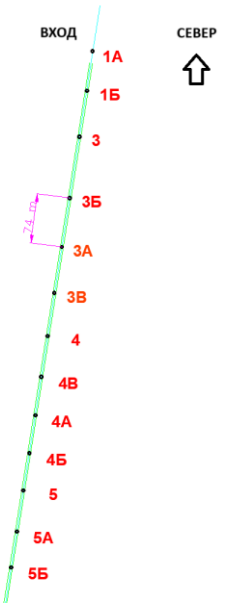
Контролните взриво-сеизмични измервания се изпълняват от фирма „ЕКСПЛОЗИВПРОГРЕС-ГТМ“ ЕООД. За тяхната регистрация се използва сеизмична апаратура на фирмите „Instantel“ (Канада) и „Nomis“ (САЩ). Измервания могат да се извършват на 19 броя контролни

точки (от т. 1А до т. 8), разположени по проектната дължина на транспортния тунел на приблизително разстояние 75-80 m една от друга.



Фиг. 4. Разпространение на сеизмични вълни в следствие на контролирани взривни работи.

Изборът на контролна точка зависи от разположението на взривното поле, като се избира тази с най-малка дистанция до конкретното взривно поле. Сеизмографите се поставят на избраните контролни точки и се включват минути преди детониране на зарядите във взривните сондажи (съгласно вътрешно-фирмените правила, определеното време за детониране е 14:30 часа в дните вторник и четвъртък).



Фиг. 5. Разположение на контролни точки в транспортния тунел.

Регистрираните относителни деформации при контролните точки се определят, както следва:

$$\varepsilon = \frac{V}{C_p}, \quad (4)$$

където:

ε - относителна деформация при динамично натоварване и разтоварване на средата,

V - максимална скорост на преместване, cm/s,

C_p - скорост на разпространение на надлъжните еластични вълни, m/s.

$$V = KR^{-n}, \quad (5)$$

където:

V - максимална скорост на преместване, cm/s,

K - интегрален коефициент, отразяващ инженерно-геоложките и хидрогеоложките показатели на скалите, формата на действие на взрива и условията на взривяване,

R - приведено разстояние, m/kg$^{\frac{1}{3}}$

N - степенен показател на затихване на сеизмичните вълни, който за зоната извън сеизмичното огнище е 1,5

$$R = \frac{r_x}{Q^{1/3}}, \quad (6)$$

където:

R - приведено разстояние, m/kg$^{\frac{1}{3}}$

r_x - хипоцентрално разстояние от мястото (точката) във взривното поле, където се получава максимална стойност на резултантната скорост на преместване (трептене, колебание), до мястото на регистрация (точките на измерване) в транспортния тунел с МГТЛ, m,

Q - максимална маса на заряда от взривно вещество, взривен в една степен на закъснение, kg.

$$r_x = \sqrt{l^2 + h^2}, \quad (7)$$

където:

r_x - хипоцентрално разстояние, m,

l - хоризонтално разстояние от мястото (точката) във взривното поле, където се получава максимална стойност на резултатната скорост на преместване (трептене, колебание), до мястото на регистрация в тунела с МГТЛ, m,

h - превишение/понижение на взривното поле спрямо мястото на регистрация (точките на измерване) в тунел с МГТЛ, m.

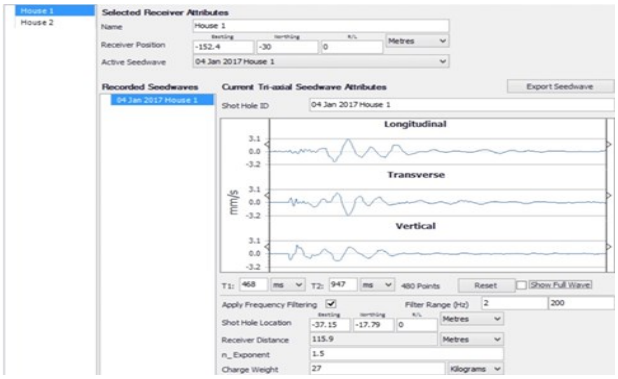
При изчислена допустима относителна деформация $\varepsilon \leq 0{,}0001$, стойностите на скоростта на преместване - V (трептене, колебание) не трябва да надвишават 2,35 ÷ 3,46 cm/s, средно 2,91 cm/s. Допустимата скорост на преместване (трептене, колебание) в транспортния тунел с МГТЛ е приета за 3,46 cm/s., като технологичното регулиране на взривните работи следва да се осъществява до допустимата скорост на преместване (трептене, колебание) - 3.46 cm/s.

4. Проектиране на ПВР до обекти които подлежат на взриво-сеизмична охрана.

При проектирането на ПВР се използва набор от софтуерни продукти с цел обработка на информацията, необходима за изготвянето на паспорт за ПВР.

Един от използваните софтуери е „Paradigm“ (Фиг.6), разработен от „Austin Powder“, който дава възможност да се извършват сравнения на различни варианти (сценарии) с предполагаеми резултати при: зареждане на сондажите с взривно вещество (ВВ); оптимални интервали за инициране на отделните заряди от ВВ; посока и времеви интервали на изместване на взривявания материал; разпределение на взривната енергия при взривяване; предполагаем зърнометричен състав на взривното поле; изчисляване на предполагаемо взриво-сеизмично

въздействие до охраняеми съоръжения и обекти; изчисляване на безопасни разстояния по отношение на разлет на скални късове и др.



Фиг. 6. Работен прозорец от „Paradigm” (по лиценз на Austin Powder) с обработени данни за предполагаеми стойности на скорост на преместване (трептене, колебание).

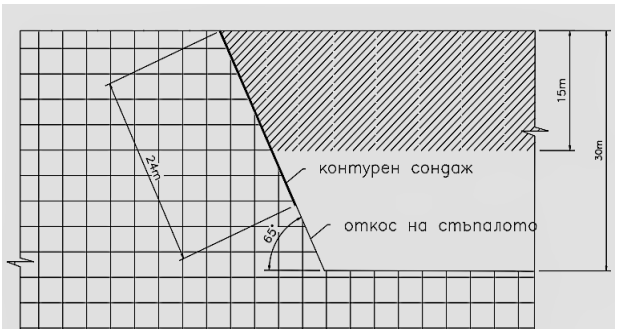
При проектиране на ПВР в близост до взриво-сеизмично охраняеми обекти, проектантите се съобразяват с хипоцентралното разстояние (r_x) от взривното поле до охраняемия обект. В зависимост от него се прилагат оптимални: диаметър на взривните сондажи и сондажна мрежа, количество на зарядите от ВВ, времеви интервали на инициране на отделните заряди и т.н.

Видът на използваните взривни смеси е от значение, тъй като грубодисперсните ВВ (АНФО Е) имат ниска скорост на детонация в следствие на малката насипна плътност, а емулсионните ВВ (Елацит 3400) – висока в следствие на по-високата насипна плътност (Таблица 2).

Таблица 2. Взривни смеси прилагани при ПВР в рудник „Елаците“

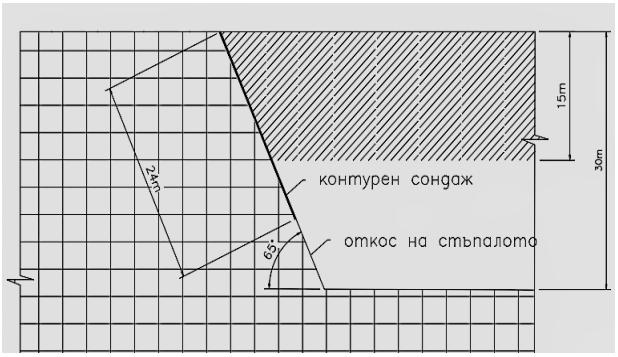
Взривно вещество	Тип Взривно вещество	Насипна плътност, kg/m^3	Критичен диаметър, mm, не повече от	Стабилен диаметър, mm не повече от	Оптимален междинен детонатор	Скорост на детонация, m/s
Елацит 710	патронирано емулсионно	1100-1220	до 51*	над 51**	не по-малко от КД №8	не по-малко от 5000
АНФО Е	нафтоселитрено грубодисперсно	750-820	60	100	400 g пресовка ТНТ	не по-малко от 3000
Елацит 3400	емулсионно	1150-1280	80	120	400 g пресовка ТНТ	не по-малко от 4300

Взривните вещества с по-висока скорост на детонация са предпоставка за високи сеизмични стойности поради по-високото детонационно налягане при инициране на зарядите, като това е предпоставка за вибрации с високи честоти.



Фиг. 7. Напречен разрез на работно стъпало с проектно разположение на контурни сондажи, L=24 m, $\alpha = 65°$

Взривните работи в краен проектен контур на работните хоризонти се изпълняват с екраниращо или контурно взривяване. Контурните сондажи, спомагат за „разсейването“ на енергията при извършването на взривни работи до проектен краен контур и отвеждането ѝ във вертикална посока.



Фиг. 7. Напречен разрез на работно стъпало с проектно разположение на контурни сондажи, L=24 m, $\alpha = 65°$

При извършването на взривни работи в рудник „Елаците“ се използват две системи за взривяване: електронна с програмируеми КД (Austin Powder) и неелектрическа (NONEL).

а) Максималното отклонение на електронните детонатори, в сравнение с другите системи за инициране е 1 ms. Предимствата на електронната система се изразяват в намаляване на сеизмичното въздействие от взрива, вследствие на пълната интерференция на вълните и изравняването на по-високи и по-ниски взривни пикове; по-добро раздробяване на материала, поради пълното взаимодействие на отделните заряди; намаляване на относителния разход на експлозива, поради по-пълното използване на енергията.

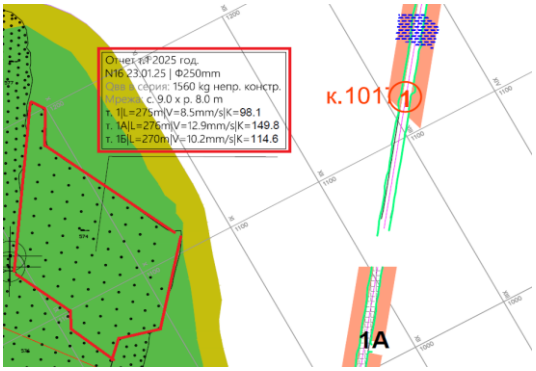
b) В рудник „Елаците“ се прилага неелектрическа система за взривяване - „NONEL“, производство на фирма „Nitro Nobel“- Швеция. Системата използва закъснения в заредените сондажи и закъснения в повърхностните съединителни елементи (конектори).

5. Извършени измервания на взриво-сеизмичното въздействие от проведени ПВР в близост от транспортен тунел с МГТЛ.

Контролните взриво-сеизмични измервания в рудник „Елаците“ се извършват за всяко едно взривно поле, което е в близост до съоръжение, което подлежи на взриво-сеизмична охрана. Анализирането на получените данни, дава основни насоки при изготвянето на следващите проекти за ПВР.

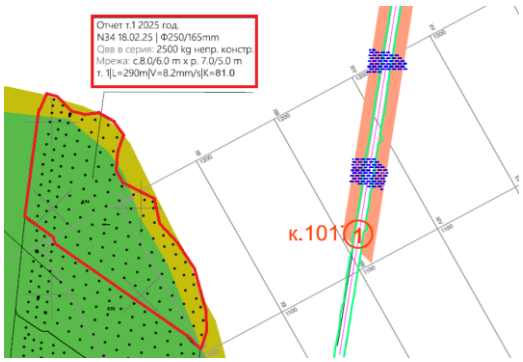
В настоящия доклад е представен анализ върху извършени измервания на три взривни полета, които са разположени на три работни хоризонта в близост до транспортния тунел с МГТЛ.

a. ВП № 16 на хоризонт (кота) 1255 (фиг. 8);
b. ВП № 34 на хоризонт (кота) 1240 (фиг. 9);
c. ВП № 62 на хоризонт (кота) 1225 (фиг. 10).



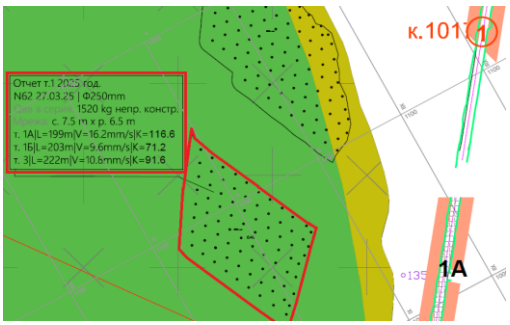
Фиг. 8. Местоположение на ВП № 16 спрямо транспортния тунел с МГТЛ

Геологията на взривното поле е представена от гранодиорити с якост на натиск от 50 до 75 MPa, напуканост с блоков строеж от 0,30 до 0,50 m.



Фиг. 9. Местоположение на ВП № 34 спрямо транспортния тунел с МГТЛ

Геологията на взривното поле е представена от гранодиорити с якост на натиск от 50 до 75 MPa, напуканост с блоков строеж от 0,30 до 0,50 m.



Фиг. 10. Местоположение на ВП № 62 спрямо транспортния тунел с МГТЛ

Геологията на взривното поле е представена от гранодиорити с якост на натиск от 50 до 75 MPa, напуканост с блоков строеж от 0,30 до 0,50 m.

В таблица 3 са дадени основните параметри на приложените сондажни работи за трите взривни полета.

За планираните взривни работи в рудник „Елаците“ се използват емулсионни или грубодисперсни взривни смеси, които са собствено производство, по лиценз на американската фирма „Austin Powder“. Зареждането е механизирано. Изпълнените взривни сондажи се зареждат с взривни смеси, съгласно изготвеният паспорт за ПВР. В конкретните взривни полета са използвани емулсионни (Елацит 710; Елацит 3400) и грубодисперсни (АНФО Е) взривни смеси. Приложен е методът на сондажните заряди с непрекъсната конструкция на заряда. Дължината на забивката е: 7 m за буферните сондажи, 5 m за сондажите с диаметър 165 mm, 6 m за сондажите с диаметър 250 mm.

Таблица 3.

ВП №	Хоризонт	Диаметър сондажи, бр.		Проектна дълбочина, m		Проектен ъгъл, ...°		Сондажна мрежа, m			
								165 mm		250 mm	
		165 mm	250 mm	165 mm	250 mm	165 mm	250 mm	a	b	a	b
16	1255	0	82	0	17-18	90	90	-	-	9	8
34	1240	39	94	16-18	17	90	90	6	5	8	7
62	1225	0	81	0	17	90	90	-	-	7.5	6.5

Две от взривните полета са изпълнени с неелектрическа система за взривяване (Таблица 4), а един брой – с електронна система за взривяване.

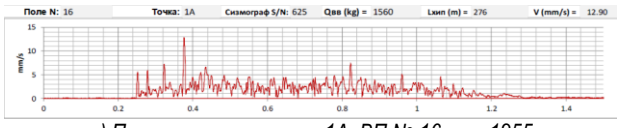
Таблица 4. Количество на зарядите (kg) за отделните взривни полета и избор на система за взривяване

ВП, №	Работен хоризонт	Екраниращо /контурно взривяване от ВП, m	Система за взривяване	Минимално количество ВВ в сондаж, kg	Максимално количество ВВ в сондаж, kg	Средно количество ВВ в сондаж, kg	Максимално количество ВВ в серия, kg
16	1255	27	NONEL	500	870	695	1560
34	1240	7	Електронна	200	760	480	2500
62	1225	39	NONEL	360	930	758	1520

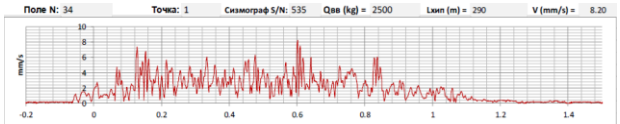
Таблица 5. Количество енергия при ВР и отчетени максимални скорости на преместване

ВП, №	Работен хоризонт	Контролна точка от тунела	Хипоцентрално разстояние (rx), m	Интегрален коеф К	Екраниращо /контурно взривяване от ВП, m	Максимално количество ВВ в серия, kg	Общо енергия на ВП, MJ	Отчетена сеизмика, mm/s
16	1255	1A	276	149,8	27	1560	200707	12,9
34	1240	1	290	81	7	2500	293861	8,2
62	1225	1A	199	116,6	39	1520	199986	16,2

Взривно поле № 16 използва закъснения в конекторите, както следва: 25 ms между редовете и 67 ms между сондажите. Взривно поле № 34 използва закъснения в електронните детонатори, както следва: 67 ms между редовете и 25 ms между сондажите. Взривно поле № 16 използва закъснения в конекторите, както следва: 25 ms между редовете и 65 ms между сондажите (произвежданото закъснение от 67 ms в конекторите на NONEL системата вече се произвежда с 65 ms).



a) При контролна точка 1A, ВП № 16, хор.1255



b) При контролна точка 1, ВП № 34, хор.1240



c) При контролна точка 1A, ВП № 62, хор.1225

Фиг. 11. Данни от сезмографите след извършени измервания.

6. Заключение

От получените резултати от проведените взриво-сеизмични измервания в МГТЛ е регистрирана максимална стойност на коефициента К=149,8. При проектирането на анализираните взривни полета със софтуера „Paradigm“, за да се получат предполагаеми стойности на скорост на преместване, се използва стойност на коефициента К=250 (осреднена стойност). В последствие бяха получени следните резултати представени в *Таблица 6*.

Таблица 6. Стойности на отчетена сеизмика в котролни точки от тунела с МГТЛ при симулация с „Paradigm“ и при реално измерване

ВП, №	Работен хоризонт	Контролна точка от тунела	Хипоцентрално разстояние (rx), m	Интегрален коеф К	Интегрален коеф К по "Paradigm"	Предполагаема сеизмика-Paradigm, mm/s	Отчетена сеизмика, mm/s
16	1255	1A	276	149,8	250	16,5	12,9
34	1240	1	290	81	250	24,9	8,2
62	1225	1A	199	116,6	250	15,1	16,2

Получените резултати се доближават като стойности при взривни полета с № 16 и № 62. Разликата е голяма при взривно поле № 34 поради голямо разминаване в стойностите на коефициента К.

При измерените взривни полета регистрираната максимална скорост на преместване (трептене, колебание) в МГТЛ е V=16,2 mm/s, т.е. не е надхвърлена допустимата такава от 34,6 mm/s.

Експериментално бяха направени и измервания на единични (контролни) сондажи с диаметър 250 mm и H=17 m в еднакви геоложки условия и разлика от 30 m в отстоянието до контролна точка - 3, като веднъж зарядът беше изпълнен със 770 kg „Елацит 3400“ и веднъж с 480 kg „АНФО Е“.

Таблица 7. Количество енергия и отчетени максимални скорости на преместване.

ВП, №	Работен хоризонт	Контролна точка от тунела	Хипоцентрално разстояние (rx), m	Интегрален коеф К	Максимално количество ВВ в	Общо енергия на ВП, MJ	Отчетена сеизмика, mm/s
50	1240	3	252	112.2	770	2824	6.9
61	1240	3	222	105.7	480	1849	7.0

Забелязва се минимална разлика в скоростта на преместване при различния вид взривно вещество въпреки разликата в количеството на заряда в сондаж от 290 kg. Това се дължи на разликата от 30 m в разстоянията от точката на измерване.

Получените стойности на интегралния коефициент К, отразяващ факторите, влияещи върху генерирането и разпространението на породените от промишлените взривни работи сеизмични вълни в различните точки, потвърждават сложните условия, при които те се формират и разпространяват с развитието на минните работи в рудник „Елаците“ - по площ и в дълбочина. Трудно може да се изведе ясна зависимост за взриво-сеизмичното въздействие. Факторите, които оказват въздействие са много и не са постоянни. В тази връзка се препоръчва следното:

a. При проектиране и достигане на близки разстояния да се използват теоретично определените минимални количества ВВ при използване на максималните стойности на коефициента К.
b. При проектирането на ПВР да се използват похоризонтните планове от извършени измервания с нанесените взривни полета, чиито данни са най-показателни за съответните условия.
c. С цел осигуряване на оптимална взриво-сеизмична охрана на транспортния тунел с МГТЛ, след всяко измерване на база получени резултати и при достигане на стойности близки до граничните, количеството на заряда за следващите взривявания да се променя съобразно конкретните условия.

Литература

Митков, В. (2020). *Взривна техника и технология*., София

Паунов, Н., Б. Барбулов. (1989). *В помощ на взривника*. София.

Взривни явления и експлозиви. Гергана Камбурова, София 2007

Шишков, П. (2019). *Справочник на взривника*. София.

Stig O Olofsson. *Applied explosives technology for construction and mining*. Sweden.

The Journal of Explosives Enginering (January-February 2024).

Отчет от „ЕКСПЛОЗИВПРОГРЕС-ГТМ“ ЕООД по задача: Осигуряване на взриво-сеизмична охрана на МГТЛ и КЕТ №3 в РК „Елаците“ 2025

DURABILITY, CORROSION RISKS AND PREVENTION OF TUNNEL LININGS AND PORTALS

Borislav Borisov

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

ABSTRACT. The report outlines the main factors and processes affecting the durability of tunnel linings and portals. Deterioration mechanisms are discussed, such as chloride and carbonation-induced corrosion, sulphate and acid attack, alkaline reaction of the filler material, and freeze/thaw. Attention is also paid to the corrosion induced by stray currents, which is common in railway and metro tunnels. Methods for managing these risks are examined. A review of good practices and recommendations for ensuring the service life of tunnels is provided.

Key words: tunnels, reinforced concrete, corrosion, durability, service life.

ДЪЛГОТРАЙНОСТ, КОРОЗИОННИ РИСКОВЕ И ПРЕВЕНЦИЯ НА ТУНЕЛНИТЕ ОБЛИЦОВКИ И ПОРТАЛИ

Борислав Борисов

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

РЕЗЮМЕ. Публикацията разглежда основните фактори и процеси, влияещи върху дълготрайността на тунелните облицовки и портали. Обсъдени са механизмите на влошаване, като: корозия, предизвикана от хлориди и карбонизация, сулфатна и киселинна атака, алкална реакция на добавъчният материал и замръзване/размразяване. Внимание е отделено и на корозията, предизвикана от блуждаещи токове, често срещана в железопътните и метро тунели. Разгледани са методите за управление на тези рискове. Направен е преглед на добрите практики и препоръки за осигуряване на експлоатационният живот на тунелите.

Ключови думи: тунели, стоманобетон, корозия, дълготрайност, експлоатационен срок.

Въведение

Тунелите са подземни или подводни линейни съоръжения, създадени за транспортни, минни, хидротехнически или други цели. Тунелите са важен елемент от съвременната инженерна инфраструктура, осигуряващи безопасно и ефективно преминаване на транспортни средства и води, както и разполагане на комуникации, оборудване и инсталации, под различни препятствия, като планини, реки, водни басейни, морета и градски райони. Представляват ключови инфраструктурни обекти, обикновено проектирани за експлоатационен срок от над 100 години. Дълготрайността им е пряко свързана с характеристиките и качеството на носещите им конструктивни елементи, хидрогеоложките и инженерно-геоложките условия и условията на експлоатация.

Корозията на стоманобетонните конструкции, по-специално при тунелните облицовки и портали, е значителен проблем, който оказва въздействие както върху безопасността, така и на икономическите разходи за поддръжка. Тя може да доведе до компрометиране на съоръженията, увеличаване на ремонтните разходи и намаляване на експлоатационния срок на тунелите. Анализът на корозионни процеси и тяхното влияние върху дълготрайността на армирания бетон е от важно значение за проектирането и изграждането на надеждни и устойчиви тунелни съоръжения.

Класификация на тунелите според предназначението:

- Транспортни (автомобилни, железопътни, метро и пешеходни) тунели;
- Хидротехнически (водопроводни, канализационни и деривационни) тунели;
- Инфраструктурни (комуникационни, технологични) тунели;
- Минни тунели;
- Специални (военни, изследователски и др.) тунели.

Механизми на влошаване

Корозията в железобетона е сложен процес, при който стоманената арматура и бетонът са подложени на неблагоприятни химични реакции или механични въздействия, които водят до намаляване надеждността, носимоспособността, функционалността и дълготрайността на подземните стоманобетонни конструкции.

Защитният бетонен слой, обгръщащ армировката, макар и да я предпазва от прякото неблагоприятно въздействие на околната среда, не осигурява пълна изолация. Бетонът, бидейки капилярно-порест материал, е пропусклив за влага и кислород – ключови фактори за електрохимичната корозия на стоманата. Външната среда въздейства на стоманобетонните конструкции предимно върху бетона, а посредством него и върху армировката.

Корозията на металите често протича по електрохимичен механизъм, за чието осъществяване са необходими следните условия (Назърски Д., 1995):

1. Наличие на потенциална разлика между отделни участъци на металната повърхност, т.е. електрохимична нееднородност;
2. Електролитна връзка между тези участъци;
3. Активно състояние на анодните зони, където металът се разтваря по схемата:

$$nH_2O + Me \rightarrow Me^{+}.nH_2O + e^{-}$$

4. Достатъчно количество поляризатор, по-специално кислород, за усвояване на излишните електрони от катодните зони.

Поради неоднородността на структурата както на стоманата, така и на бетона в контакт с нея, първото условие за армировката в бетона е изпълнено. Бетонът, като капилярно-порест материал с хидрофилна вътрешна повърхност, осигурява наличието на електролитна връзка и на достатъчно кислород, което на практика удовлетворява второто и четвъртото условие за протичане на корозионния процес. Следователно, липсата на корозия на стоманата в бетона се дължи на неизпълнението на третото условие – активно състояние на анодните зони.

Течната фаза на бетона е алкална, поради наситеността ѝ с $Ca(OH)_2$, а порите и капилярите осигуряват взаимодействието с околната и експлоатационна среда. Устойчивостта на армировката се дължи на пасивността на стоманата в алкална среда, т.е. неспособността ѝ да се разтваря по горната реакция. Пасивността, от своя страна, представлява състояние на повишена корозионна устойчивост, предизвикано от затрудняването на анодния процес.

Не всички бетони се характеризират с високо pH на течната фаза, а и тази стойност може да намалее с времето. Следователно, от критично значение е стойността на pH, под която стоманата в бетона губи пасивността си. Експериментално е установено, че тази граница е около pH = 11,8 (Назърски Д., 1995). Пасивиращото действие на $Ca(OH)_2$ се проявява при pH ≈ 12 при свободен достъп на въздух и при pH ≈ 11,8 при ограничен.

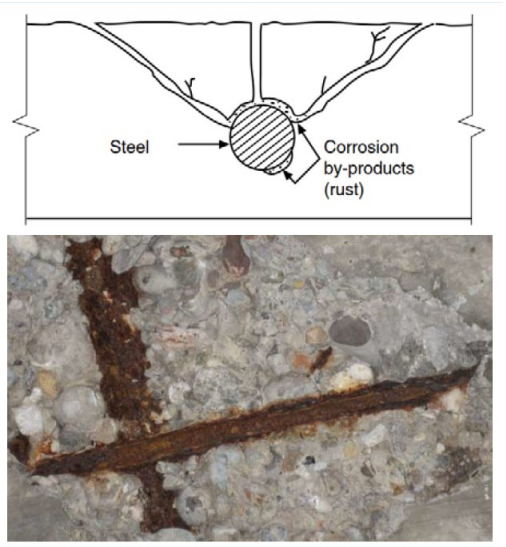
Все пак pH на средата не може да характеризира еднозначно състоянието на стоманобетона, тъй като в него могат да се намират активиращи йони (например Cl са едни от най-силно влияещите). Потенциалът на стоманата се премества в отрицателна посока, както при pH < 11,8, така и в присъствието на йони-активатори.

При наличието на въздействие от агресивни околна или експлоатационна среди, най-уязвимата съставна част на бетона е циментовият камък. Видът, температурата и концентрацията на агресивните агенти определят интензитета на физико-химичните процеси между агресивната среда и циментовия камък. От друга страна, добре известно е, че типът на цимента, характеристиките и размерите на порите и капилярите, както и режимът на въздействие на средата, оказват съществено влияние върху корозионната кинетика.

При въздействие на агресивни среди върху бетона, корозионните процеси прогресират от повърхността към вътрешността на материала. В резултат на това, промените във физико-механичните свойства на бетона се наблюдават неравномерно в дълбочина.

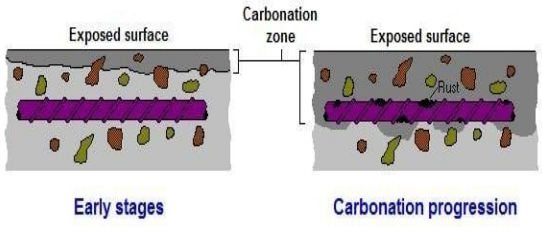
Съществуват следните основни типове корозия, засягащи разглежданите подземни изработки:

1. **Корозия, предизвикана от хлориди:** Този вид корозия е основен риск за стоманобетонните облицовки на тунелите (Abbas, 2014). Хлоридните йони, проникващи в стоманобетона, могат да произхождат от морска вода, соли за размразяване, в студено време, или от скалите (почвите) на околния геоложки масив и подземните води. При достигане на определена концентрация, хлоридите нарушават оксидния пасивиращ слой, който предпазва армировката от корозия.

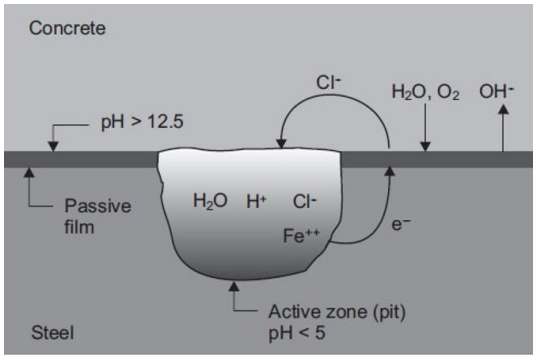


Фиг. 1. Загуба на сечение на армировката и пукнатини, причинени от корозия на стоманата, предизвикана от хлориди (Bakhshi, M., & Nasri, V., 2018)

2. **Корозия, предизвикана от карбонизация:** Карбонизацията е процес, при който въглероден диоксид (CO_2) от атмосферата прониква в бетона и реагира с хидроксидите в него, което води до намаляване на pH нивото на бетона и влияе неблагоприятно на неговите физико-механични характеристики. Понижаването на pH прави армировката по-податлива на корозия, както вече бе посочено. Процесът на карбонизация може да бъде ускорен от наличието на пукнатини и използването на материали с недостатъчно качество. Карбонизацията е характерна за тунелните портали на автомобилните тунели, поради съчетанието на CO_2 емисии и относителна влажност от 50 % - 75 %.

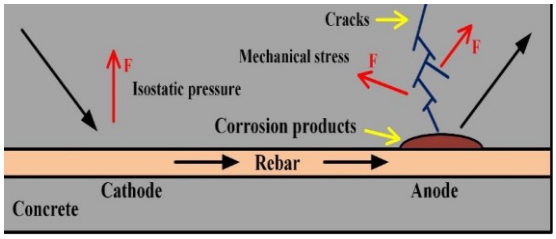


Фиг. 2. Процес на карбонизация (https://ronacrete.co.uk/carbonation-reinforced-concrete)



Фиг. 3. Процес на електрохимична хлоридна корозия (https://www.ctlgroupqatar.com/single-post/2019/02/02/chloride-attacks-on-concrete-structures)

3. **Сулфатно неблагоприятно въздействие:** Сулфатите в масива или подпочвените води могат да реагират с компонентите на цимента, причинявайки разширяване и разрушаване на бетона.
4. **Киселинно неблагоприятно въздействие:** Киселини от промишлени и селскостопански отпадни води или естествени източници могат да разградят бетона и армировката.
5. **Алкална реакция на агрегатите (APA):** Химическа реакция между активни инертни материали и алкали от цимента, водеща до образуване на разширяващи се продукти, напукване и разрушаване на бетона.
6. **Повреди от замръзване и размразяване:** Повтарящите се цикли на замръзване и размразяване на течната фаза в порите на бетона могат да доведат до разрушаване на структурата му.
7. **Корозия от блуждаещи токове:** Блуждаещите токове са специфичен проблем за метро и железопътните тунели, където токовете от електрифицираната железопътна линия могат да предизвикат ускорена корозия на армировката (Dolara et al., 2012). Тези токове могат да проникнат в тунелната облицовка и да създадат анодни и катодни зони, където да се инициират процеси на корозия (Wang et al., 2018).



Фиг. 4. Схема на протичане на блуждаещи токове през тунелна облицовка и причиняване на корозия, (Wang et al., 2018)

Методи за управление на рисковете:

- Намаляване на проникването на хлориди: Използване на плътен бетон с ниско водо-циментно отношение, активни минерални добавки, химически добавки за намаляване на пропускливостта, поцинкована, с полиуретанно покритие или неръждаема армировка, защитни покрития (ACI PRC-222-19).
- Предотвратяване на карбонизацията: Осигуряване на достатъчно бетонно покритие над армировката, използване на плътен бетон, активни минерални и химически добавки, нанасяне на защитни покрития, контрол на влажността и вентилация (БДС EN 1992-1-1).
- Устойчивост на сулфатна атака: Използване на цименти, устойчиви на сулфати (например, цимент тип II или V по ASTM C150), добавки с пуцоланови свойства (ASTM C150).

Намаляване на риска от корозия от блуждаещи токове:

- Намаляване на съпротивлението на релсите: Използване на подходящи връзки между релсите, редовна поддръжка на железният път (Brenna et al., 2010).
- Подобряване на изолацията на релсите: Използване на изолационни системи за скрепление, подложки под релсите и подобни (Dolara et al., 2012).
- Еквипотенциална връзка: Свързване на армировката на съседни тунелни сегменти с медни пластини с цел изравняване на потенциалите (Dolara et al., 2012).
- Използване на влакнесто-армиран бетон (ВАБ): Влакната разпределят токовете и намаляват концентрацията им в определени зони (Tang, 2017).

Съображения при проектиране и стандарти

Проектирането на дълготрайни тунелни конструкции изисква внимателно отчитане на всички потенциални рискове и прилагане на подходящи мерки за защита. Важно е да се спазват приложимите национални и международни стандарти, като например: БДС EN 206-1, БДС EN 1992-1-1, ASTM C150, BSI, 2016; DAUB, 2013, ITA, 2011, EFTA и др. Тези стандарти определят изискванията за състава на бетона, изпълнението на строителните работи и методите за контрол на качеството.

Следва да се отбележи, че в българската и чуждестранната тунелна практика често външната облицовка е основната, а понякога и единствената носеща конструкция. Съответно независимо дали е изградена от предварително изготвени стоманобетонни сегменти, монолитни шлиц стени или армиран торкрет бетон обикновено е невъзможно да се изпълни система от мембрани или плоскости предпазващи въпросните конструктивни елементи от пряко въздействие на агресивни среди. Вследствие на това правилният подбор на изискванията към бетоновите състави и качественото строителство са от критично важно значение за постигане на необходимият експлоатационен срок.

Заключение

Осигуряването на дълготрайността на тунелните облицовки и портали е комплексна задача, която изисква цялостен подход и отчитане на всички потенциални рискове от корозия (Pavlov P., Totev L, 2012). Чрез прилагане на подходящи методи за защита, спазване на приложимите стандарти и редовна поддръжка, може да се осигури необходимият дълъг и надежден експлоатационен живот на тези важни инфраструктурни обекти. Понастоящем инженерните изследвания са насочени към разработване на по-ефективни и икономични методи за защита от корозия, както и към създаване на ефективни системи за обследване, мониторинг и оценка, които да позволяват

ранно откриване на проблеми и предприемане на своевременни мерки.

Литература:

БДС EN 206-1. (2014). Бетон. Част 1: Спецификация, свойства, производство и съответствие.

БДС EN 1992-1-1. (2005 /NA:2011). ЕВРОКОД 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции, Част 1-1: Основни правила и правила за сгради.

Назърски Д. (1995). Дълготрайност на строителните материали, Университет по архитектура, строителство и геодезия, София, 1995 г.

Abbas, S. (2014). Structural and durability performance of precast segmental tunnel linings (Doctoral dissertation). The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.

ACI PRC-222-19. (2019). Guide to Protection of Metals in Concrete Against Corrosion.

ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)

ASTM C150/C150M-17. (2017). Standard specification for Portland cement. ASTM International.

Bakhshi, M., & Nasri, V. (2018). Durability Design of Segmental Linings for Intended Service Life of Tunnels. Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures.

Brenna, M., Dolara, A., Leva, S., & Zaninelli, D. (2010). Effects of the DC stray currents on subway tunnel structures evaluated by FEM analysis. Power and Energy Society General Meeting: IEEE.

BSI. (2016). Tunnel design. Design of concrete segmental tunnel linings, code of practice. BSI PAS 8810.

DAUB (2013): Lining segment design. Recommendations for the design, production, and installation of segmental rings. German Tunnelling Committee (DAUB).

Dolara, A., Foiadelli, F., & Leva, S. (2012). Stray current effects mitigation in subway tunnels. *IEEE Transactions on Power Delivery, 27*(4), 2304-2311.

ITA (2011). Guidelines for tunnelling risk management. International Tunneling Association.

Pavlov P., Totev L. (2012). Einsatz einer Tunnel-Bohrmaschine bei der Auffahrung des zweiten U-Bahn-Tunnels der Sofioter Metro - In: Scientific Reports on Resourse Issues 2012. Volume 2. Freiberg, Germany, p. 228-234. ISSN 2190-555X.

PCA (2002). Types and causes of concrete deterioration. Portland Cement Association.

Tang, K. (2017). Stray current induced corrosion of steel fiber reinforced concrete. Cement and Concrete Research, 100, 445-456.

Wang, C., Li, W., Wang, Y., Xu, S., & Fan, M. (2018). Stray current distributing model in the subway system: A review and outlook. *International Journal of Electrochemical Science, 13*, 1700-1727.

https://ronacrete.co.uk/carbonation-reinforced-concrete

https://www.ctlgroupqatar.com/single-post/2019/02/02/chloride-attacks-on-concrete-structures

EXTRACTION OF BISMUTH FROM POLYMETALLIC ORES: METHODS, CHALLENGES, AND PERSPECTIVES

Gospodinka Gicheva, Alexandar Chanachev

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

ABSTRACT. Bismuth (Bi) is a critical metal with applications in pharmaceuticals, electronics, and green technologies. Due to its scarcity in nature, efficient recovery from polymetallic ores (e.g., lead, copper, and tin concentrates) is essential. This review examines current hydrometallurgical, pyrometallurgical, and electrometallurgical techniques for bismuth extraction, focusing on selective leaching, solvent extraction, and electrolytic refining. Challenges, such as low recovery rates and environmental concerns, are discussed, along with emerging bioleaching and membrane separation methods. The paper outlines future research directions to improve sustainability and economic viability.

Key words: bismuth recovery, polymetallic ores, sustainability.

ИЗВЛИЧАНЕ НА БИСМУТ ОТ ПОЛИМЕТАЛНИ РУДИ: МЕТОДИ, ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И БЪДЕЩИ НАСОКИ

Господинка Гичева, Александър Чаначев

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

РЕЗЮМЕ. Бисмутът (Bi) е критичен метал с приложения във фармацевтиката, електрониката и зелените технологии. Поради неговата рядкост, ефективното му извличане от полиметални руди (напр. оловни, медни и калаени концентрати) е от съществено значение. Този обзор разглежда съвременните хидрометалургични, пирометалургични и електрометалургични техники за извличане на бисмут, като се фокусира върху селективното излужване, екстракцията с разтворител и електролитно рафиниране. Обсъждат се предизвикателства като ниските нива на извличане и екологичните проблеми, както и нововъзникващите методи за биоизлужване и мембранно разделяне. Статията представя и бъдещи насоки на изследванията за подобряване на устойчивостта и икономическата ефективност.

Ключови думи: извличане на бисмут, полиметални руди, устойчивост.

Introduction

The world economy and industry and their requirements have changed over time. The transition towards a green and sustainable economy has increased the demand for some specific raw materials needed for the production of solar cells and batteries (Rhaman et al., 2021). Shifting the emphasis toward these materials and the present geopolitical situation in the world affecting the supply chain lead to the creation of the Critical Raw Materials Act. Demand for Bi is increasing, mostly as a non-toxic substitute for Pb in chemicals. Bismuth is primarily recovered as a byproduct of lead, copper, and tungsten processing. Polymetallic ores often contain Bi in concentrations of 0.1–5%, necessitating selective extraction methods. Growing demand for Bi in low-melting alloys, catalysts, and radiation shielding underscores the need for efficient recovery technologies (Liu and Handschuh-Wang, 2025). Bismuth was classified as a critical raw material by the European Commission in 2017 and a critical mineral by the USA in 2018. Bi is traditionally used in medicine as an ingredient in some drugs, in cosmetics as a pigment in paint for eye shadows, hair sprays, and nail polish, in electronics, and for alloys as non-toxic substitute for lead. A new emerging application of Bi has reawakened interest in its production and supply. Reports on development of Bi-based batteries have been published (Phung et al., 2024), showing successful synthesis of novel Bi_2O_3@$NaBi(MoO_4)_2$ nanocomposites (NCs) – comprising integrated Bi_2O_3 and $NaBi(MoO_4)_2$ nanostructures – and their evaluation as anode materials for lithium-ion batteries (LIBs) for the first time. By optimising the reaction time, the authors managed to precisely control the NCs' morphology, composition, and phase state. These NC-based anodes demonstrate exceptional electrochemical performance in LIBs, including: high reversible capacity (1052 $mAh*g^{-1}$ for Bi_2O_3@$NaBi(MoO_4)_2$-1h and 1034 $mAh*g^{-1}$ for Bi_2O_3@$NaBi(MoO_4)_2$-3h after 200 cycles); outstanding capacity retention (110% and 129%, respectively) and superior rate capability, long cycle life, low charge-transfer resistance, and pseudocapacitive behaviour. The research in that area is ever increasing and Yang et al. (2025) published a review summarising the current progress of Bi-based materials in nickel bismuth batteries as viable alternatives to traditional lithium-ion batteries, offering enhanced safety, eco-friendliness, and cost-efficiency. Man et al. (2025) also reported on the prospect of bismuth and its compounds in sodium-ion batteries. This review examines promising anode material candidates for sodium-ion batteries (SIBs), with particular focus on bismuth-based anodes. These materials distinguish themselves through their exceptional theoretical capacity and comparatively low volume expansion relative to other alloy-type anodes. The analysis provides a comprehensive understanding of bismuth's sodium storage mechanisms, employing both *ex-situ* structural characterisations and density functional theory (DFT) calculations. An explanation for the remarkable rate capability of bismuth metal anodes was provided and it underscores why they have become a preferred choice among battery researchers.

Another novel perspective field where bismuth finds its application is as a materials for the photocatalytic reduction of both organic and inorganic pollutants (Perumal et al., 2022; Kumar et al. 2024). Sun et al. (2023) summarised the available data for the photocatalytic reduction of hexavalent chromium in water. The review highlights significant advancements in enhancing the photocatalytic Cr(VI) reduction efficiency of Bi-based materials through established modification approaches, including heterojunction formation, elemental doping, and defect tuning. Performance evaluation revealed that hierarchically

nanostructured $BiVO_4$ with optimised particle sizes (5–10 nm) exhibits superior catalytic activity among Bi-based materials. The unique “shuriken”-like morphology of $BiVO_4$ enhances light harvesting through efficient multiple reflections and scattering. Comparative analysis demonstrates that $BiVO_4$ outperforms other promising photocatalysts like $Ag@TiO_2$ in Cr(VI) reduction, highlighting the potential of Bi-based materials in this field.

But still, practical implementation faces substantial challenges. It was estimated that under ideal conditions (100% collection efficiency), reducing 1 mole of Cr(VI) to Cr(III) would require a minimum solar array area exceeding 5000 m² (>6000 MJ energy input). This result indicates that current Bi-based materials remain insufficient for real-world aqueous Cr(VI) remediation.

Tabassum et al. (2025) investigated bismuth oxyhalides (BiOX) as a highly promising class of photocatalysts, attracting widespread attention due to their unique layered structure and versatile applications in energy conversion. These nanomaterials exhibit exceptional physicochemical properties, including facet-dependent internal electric fields (IEFs), pH-responsive crystal facet exposure, and phase transitions. Their distinctive layered architecture further enhances their potential for environmental remediation. A key advantage of BiOX photocatalysts lies in their reusability, as demonstrated by their stability over multiple reaction cycles – a critical factor that sets them apart from many conventional catalysts.

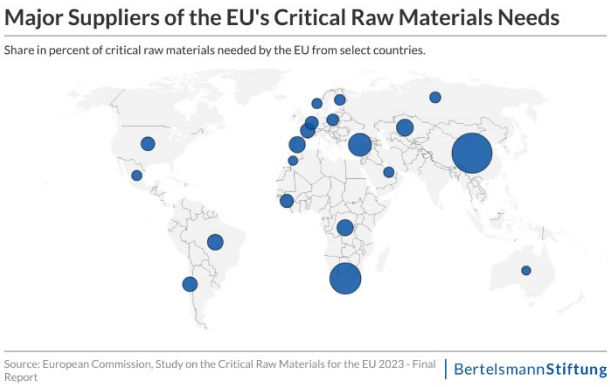


Fig. 1. Major Suppliers of the EU's Critical Raw Materials Needs (Source: European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report)

Despite significant progress in energy production and environmental applications, challenges remain in optimising BiOX for large-scale deployment. Most reported BiOX-based systems are still confined to laboratory settings, necessitating further research to bridge the gap between fundamental studies and real-world implementation. Given their low toxicity, layered morphology, and exceptional photocatalytic efficiency, BiOX materials hold immense promise for industrial-scale applications.

Deady et al. (2022) investigated thoroughly the bismuth geology and chain of supply. They surmised that the global supply chain has significantly localised graphically, with primary production centered at Asia (Vietnam's Núi Pháo mine and as a byproduct of lead and tungsten processing in China).

This constrained supply framework has created complete import dependence for major economies; e.g. the European Union requires 100% of its high-purity (≥99.8%) refined bismuth imports to meet industrial demand and the United States has maintained total import reliance since 1997 following the closure of its last primary bismuth refinery. These supply chain vulnerabilities, combined with current end-of-life recycling rates (which remain below 1%), collectively contribute to bismuth's classification as a critical raw material across multiple strategic assessments.

Bismuth minerals found in hydrothermal and magmatic environments typically occur in four principal categories: native bismuth and its alloys with gold and silver; sulfides and sulfosalts including bismuthinite (Bi_2S_3); oxides (bismite) and oxysalts, such as bismutite [$(BiO)_2CO_3$]; and selenides and tellurides (tellurobismuthite).

Bismuthinite is the most significant primary bismuth ore, though substantial quantities are also extracted from Bi-bearing galena deposits. Gold and bismuth are frequently distributed similarly during ore formation processes. Bismuth is mainly obtained as a byproduct during the mining of lead (Pb), tungsten (W), copper (Cu), or gold (Au), with its extraction techniques varying according to the ore's mineralogical characteristics. Despite being a frequent component alongside these more abundant metals, bismuth often remains as waste in many mining operations. Some of the most common sources for Bi are: lead concentrates (Pb-Bi) forming a major source (~60%) of global Bi production; copper smelter flue dust, which contains Bi_2O_3 and Bi_2S_3; and tin processing residues (Bi-Sn alloys in solder scrap).

Conventional methods for extraction

Hydrometallurgical processes

Acid leaching. Bismuth was successfully recovered by leaching from HCl solution using copper powder as an alternative to conventional hydrolysis. It was based on the extraction of bismuth (Bi^{3+}) from a hydrochloric acid (HCl) system by cementation with copper (Cu^0) powder (Shen et al., 2019). Thermodynamic and cyclic voltammetry (CV) analyses were performed to confirm the spontaneous nature of the cementation reaction between Cu^0 and Bi^{3+}. Batch experiments conducted in order to find the optimal conditions demonstrated 99% bismuth recovery under the following parameters: HCl concentration 6 mol L^{-1}, temperature 60°C, Cu^0/Bi^{3+} molar ratio 4, stirring rate 500 rpm, and reaction time 30 min. It is important to keep in mind that arsenic (As) and antimony (Sb) impurities inhibit cementation due to the predominant formation of Cu_2Sb and Cu_3As intermetallics. It was found that Cu^0-Bi^{3+} cementation followed first-order kinetics between 20–60°C, with an activation energy of 8.58 kJ mol^{-1}, indicating a diffusion-controlled process. Bi is dissolved as $BiCl_3$ (pH < 1), while impurities (Pb, Cu) precipitate as sulphates or chlorides.

Recovered bismuth consisted of bulk crystalline particles (elemental Bi). Residual Cu^+ in the solution was recovered as copper sulfides via deep sulphidation, suitable for direct copper smelting. This highlights the potential of Cu^0 cementation for sustainable Bi^{3+} extraction.

$$Bi_2O_3+6HCl \rightarrow 2BiCl_3+3H_2O$$

In another study, a hydrometallurgical process was developed for the simultaneous recovery of bismuth and arsenic from copper smelter flue dusts using H_2SO_4-NaCl solution (Chen et al., 2012). The dusts were first leached using the above

mentioned solution, achieving high extraction efficiencies of approximately 95% for bismuth and 88% for arsenic. The dissolved bismuth and arsenic were subsequently separated through an alkaline leaching step, which proved highly effective, resulting in arsenic separation of ~97% transferred into the alkaline solution, while more than 99.5% of bismuth remained in the solid residue.

$Bi_2O_3 + 3H_2SO_4 + 6NaCl \rightarrow 2BiCl_3 + 3Na_2SO_4 + 3H_2O$

After additional refining, valuable products like arsenic-rich alkaline solution were processed into sodium arsenate and the bismuth-containing residue was converted to sponge bismuth (purity >90%). As an overall result, the recovery rates reached ~90% for bismuth and ~42% for arsenic. The major advantages of the process that are worth mentioning are the high selectivity in bismuth-arsenic separation and the value-added product generation (sodium arsenate and high-purity sponge bismuth). The H_2SO_4-NaCl leaching system demonstrated excellent metal extraction efficiency and the integrated approach offers a sustainable solution for recovering critical metals from copper smelting by-products while minimising waste generation.

Alkaline leaching. A novel method for alkaline pressure oxidative leaching process has been developed by He et al. (2019) which effectively removes arsenic (As), antimony (Sb), and lead (Pb) from bismuth-rich and arsenic-rich lead anode slimes, while simultaneously enriching with bismuth (Bi), gold (Au), and silver (Ag). The authors investigated the effect of temperature, liquid-to-solid (L/S) ratio, leaching time, and reagent concentration effects and established the optimal conditions: leaching time 2 hours, L/S ratio 7:1, $NaNO_3$ addition - 20 wt% of slime mass, temperature 180°C, NaOH concentration 150 g/L, and agitation speed 300 rpm. The follow-up analysis revealed removal efficiencies of 95.36% for arsenic, 79.98% for antimony, and 63.08% for lead. XRD characterisation revealed that the leaching residue primarily contains metallic bismuth (Bi), bismuth oxide (Bi_2O_3), lead antimonate ($Pb_2Sb_2O_7$), as well as trace amounts of sodium hexahydroxoantimonate ($NaSb(OH)_6$). Lead and arsenic have been removed as the complex compounds of sodium arsenate decahydrate ($Na_3AsO_4 \cdot 10H_2O$) and lead antimonate ($Pb_2Sb_2O_7$). Using XPS analysis confirmed increasing yields of high-valence Sb and Pb species with $NaNO_3$ addition since the oxidative environment (maintained by $NaNO_3$) proved crucial for achieving high removal efficiencies. This method provides an effective separation of impurity elements (As, Sb, Pb) from valuable metals (Bi, Au, Ag) and fine oxidation state control through reagent addition. The process represents a significant advancement in the treatment of complex anode slimes, offering improved metal recovery and purification capabilities. As one can summarise, the alkaline medium (NaOH) facilitated selective dissolution of target impurities and both temperature and agitation play critical role for reaction kinetics.

Solvent extraction (SX). A systematic approach was developed by Yang et al. (2009) for the selective separation and co-extraction of bismuth (Bi) and molybdenum (Mo) from low-grade bismuth glance concentrate. The integrated process comprises the following key stages: hydrochloric acid leaching (initial dissolution of target metals), purification and deoxidisation (removal of impurities and redox conditioning), solvent extraction (Bi) (selective recovery of bismuth using N235 extractant), lime roasting (conversion of Mo into a leachable form), leaching and solvent extraction (Mo), and final recovery of molybdenum. Each stage was optimised to maximise collective recovery efficiency. Solvent extraction with N235 achieved over 99% Bi recovery and over 98% Mo recovery. N235 is tertiary amine with general formula R_3N where R = C8–C10. This trialkyl (R_3N) amine is a widely-used extractant for the extraction of Zn, rare earth, molybdenum, and vanadium. Process conditions were fine-tuned for high selectivity and yield, demonstrating industrial feasibility.

Moriya et al. (2001) examined the extraction behaviour of bismuth(III) with 2-bromoalkanoic acids in non-donating solvents. Since the extraction mechanisms of bismuth(III) using carboxylic acids (HL) have remained unclear due to complications from hydroxide precipitation, it was investigated in both benzene and hexane systems under highly acidic aqueous conditions (I = 1.0 M $(H,Li)NO_3$). The extraction equilibria were systematically analysed by examining nitric acid concentration effects and bismuth(III) distribution in the organic phase. It was identified that benzene exclusively formed $BiL_3(HL)_3$ complexes, while hexane facilitated both monomeric ($BiL_3(HL)_4$) and oligomeric (Bi_3L_9HL) species. Despite the investigation, the underlying reason for this solvent-specific speciation still remains unclear. This work successfully demonstrates the liquid-liquid extraction of bismuth(III) using 2-bromoalkanoic acid/non-donating solvent systems while effectively preventing hydroxide precipitation. The solvent-dependent speciation patterns provide new insights into the complexation behavior of Bi(III) with carboxylic acid extractants.

Pyrometallurgical methods

Smelting. The Kroll-Betterton process represents a metallurgical technique for purifying lead bullion through the removal of bismuth and antimony contaminants. This refining method operates by introducing calcium and magnesium into molten lead (typically at ~380°C), where they form high-melting-point intermetallic compounds (notably $CaMg_2Bi_2$) with the impurities (Gupta, 2003). These solidified compounds separate as a surface dross that can be physically removed, enabling production of lead with exceptionally low bismuth concentrations (<0.01%). It targets residual bismuth/antimony removal after prior extraction of precious metals (Au, Ag) and copper and enables bismuth recovery via subsequent chlorination of skimmed dross. The method proves particularly valuable when processing lead bullion requiring strict bismuth control while maintaining cost efficiency compared to electrochemical approaches. The skimmed byproducts retain value through potential bismuth reclamation. Mallaley et al. (1990) presented an investigation of bismuth removal via the Kroll-Betterton Process through calcium and magnesium treatment. It was observed that the mass ratio of calcium to magnesium can be adjusted to minimise overall processing expenses while maintaining effective bismuth removal. The metal losses occur primarily through particle abrasion during dissolution in the molten lead, and bismuth recontamination happens when processed bullion contacts residual crust material during bailing operations. At approximately 320°C, the measured concentrations of bismuth, calcium, and magnesium in the bullion yield a solubility product value that closely matches established literature data. Their study demonstrates that while the Kroll-Betterton process effectively reduces bismuth content, process optimisation requires careful consideration of metal

ratios and operational parameters to minimise costs and maximise efficiency.

Electrometallurgy

Electrorefining. Hernández-Pérez et al. (2024) studied the selective electrodeposition of antimony and bismuth from highly concentrated hydrochloric acid solutions, which simulate the composition of ion exchange resin eluates used in purifying spent electrorefining baths. Preliminary voltammetric analysis revealed that the small difference between the reduction potentials of antimony and bismuth makes their separate recovery extremely difficult. This finding was supported by potentiostatic electrolysis tests conducted at low cathodic potentials (e.g., −0.25V vs. Ag/AgCl), below bismuth's reduction potential.

At current densities exceeding *i*$_l$, selectivity and current efficiency for antimony deposition declined sharply due to increased cathodic potentials, promoting bismuth deposition and hydrogen evolution. Galvanostatic tests with varying antimony-bismuth ratios showed that higher bismuth concentrations improved its deposition efficiency but reduced selectivity. At high current densities (4.5 mA cm^{-2}), elevated cathodic potentials favoured the hydrogen evolution reaction (HER) when bismuth levels were low. In contrast, with abundant bismuth, overall electrodeposition efficiencies exceeded 75%, though unselective co-deposition occurred.

Green method for extraction of Bi and Pb

Most of the traditional methods of separating bismuth-rich melt from the fire smelting of Bi slags have a number of disadvantages. They can be harmful to the environment and have a low recovery rate of metals. They pose a number of risks to human health and contain a series of complex operations. This necessitates the search for a new green approach, like the extraction of Bi and Pb from the bismuth-rich melt by super-gravity. This method has a number of advantages, such as high separation efficiency, continuous operation, no emission of waste residues, effluents, and dust, which are expected to provide a new direction for green extraction of Bi and Pb from the bismuth-rich melt (Wen et al., 2020).

Emerging Technologies

Membrane Separation

Polymer inclusion membranes (PIMs). Polymer inclusion membranes (PIMs) represent a significant advancement in the development of sustainable separation, recovery, and analytical techniques for environmentally and economically valuable species. Beyond the apparent benefits of liquid membranes, PIMs offer superior stability compared to supported liquid membranes (SLMs). This enhanced stability arises from the structure of membrane components within the polymer matrix, as opposed to the pore-based capillary forces that govern SLMs.

A key advantage of PIMs is their tunable extraction properties, which can be tailored by adjusting the composition and ratio of their primary constituents: the base polymer and the extractant. In certain formulations, the choice and concentration of plasticiser further influence membrane performance by enhancing mechanical properties and improving compatibility among components. This adaptability makes PIMs a versatile and efficient platform for advanced separation processes. Ghaderi et al. (2021) reported the development of a novel polymer inclusion membrane (PIM) for efficient bismuth(III) extraction from hydrochloric acid solutions. The optimised membrane composition consisted of 40 wt% cellulose triacetate (CTA) as base polymer, 25 wt% trioctylamine (TOA) as extractant and 35 wt% tri-n-butyl phosphate (TBP) as plasticiser. Contact angle measurements confirmed appropriate membrane hydrophobicity and stress-strain tests demonstrated that TBP/TOA addition significantly improved membrane elasticity and reduced tensile strength compared to pure CTA films.

Extraction performance of the novel PIM achieved quantitative Bi(III) extraction (from 20 mg/L solutions in 0.3 M HCl) using 3.5 cm diameter PIM segments, 120 min contact time, and 160 rpm orbital shaking. The proposed extraction mechanism primarily involved $[TOAH^+]_2[BiCl_5^{2-}]$ ion-pair formation. Effective Bi(III) stripping (99% recovery) using a 2 M Na_2CO_3 solution was observed. The PIM demonstrated exceptional selectivity for Bi(III) over the competing metal ions (Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Co^{2+}, Cd^{2+}, Fe^{3+}, Cr^{3+}, Mo^{6+}, W^{6+}) and anionic species (SO_4^{2-}, NO_3^-), while outperformed PVC/DEHPA membranes in Fe(III)/Bi(III) separation. The membrane maintained its composition through 4 extraction/stripping cycles and substituting TBP with NPOE or DBP extended stability to ≥10 cycles.

The PIM developed in this study showed strong potential for bismuth recovery from industrial streams, offering high selectivity, effective regeneration, and adaptability through plasticiser optimisation.

Supported liquid membranes (SLMs). Supported liquid membranes (SLM) for recovery of bismuth from aqueous solutions was reported by Reyes-Aguilera et al. (2008). The liquid–liquid extraction experiments revealed that each mole of Bi(III) interacts with two moles of Cyanex 921 (tri-n-octylphosphine oxide (TOPO) extractant) in the solvated complex extracted into the organic phase. Additionally, the recovery of Bi(III) using a supported liquid membrane (SLM) was found to be viable. Introducing HCl to the feed solution supplies chloride ions, which combine with Bi(III) to form neutral complexes, thereby enhancing SLM performance. Optimal Bi(III) recovery rates were achieved with a 0.5 M HCl concentration in the feed solution. Cyanex 921 was identified as a suitable extractant for Bi(III) recovery via SLM, as it does not require high concentrations to achieve efficient extraction – yielding recovery rates as high as 90%.

Hybrid Processes

Leaching-SX-Electrowinning. A combined chloride leaching and electrowinning method was developed by Che et al. (2020) for the selective extraction of bismuth from Pb-Bi slag. Thermodynamic studies revealed a notable solubility difference between $PbSO_4$ and Bi_2O_3 in chloride media. A detailed investigation was then conducted to assess the influence of different parameters on bismuth leaching efficiency using HCl-$CaCl_2$ solutions. The results demonstrated that Bi leaching was primarily affected by $CaCl_2$ concentration and the liquid-to-solid (L/S) ratio, while temperature and reaction time had minimal impact. The optimal leaching conditions were identified as 100 g/L $CaCl_2$, an L/S ratio of 4 mL/g, a temperature of 50°C, and a duration of 1 hour.

Following leaching, bismuth recovery from the solution was examined via electrowinning. Cyclic voltammetry measurements established the reduction potential for Bi at −0.239 V. The experiments showed that high-purity metallic bismuth (99.5%) could be achieved at 50°C with a cathode current density of 150 A/m², yielding a current efficiency of approximately 85.46%. Based on these findings, a closed-loop process was proposed for efficient bismuth recovery from Pb-Bi slag.

Challenges

Although it has significant applications in biology, medicine, and industry, it is important to consider the biological impact of bismuth and the residual products of its production. Bismuth is considered to be nontoxic (15 g can be tolerated by an adult), but the long-term use of bismuth may result in side effects and even toxicity to humans. There are a few cases caused by occupational exposure to bismuth in the manufacturing industry, but most of the poisoning incidents occur in the form of accidental over-dosage of bismuth drugs. The toxicity of bismuth depends on both the individual case and the type of compound and its amount (Yang & Sun, 2011).

Bismuth(III) occurs in different chemical forms: from metal to oxides, hydroxides, and various inorganic salts, such as nitrate, phosphate, sulphide, sulphate, carbonate, orthosilicates, halides, and others. In solutions, its salts undergo extensive hydrolysis, forming oxy compounds and polynuclear aggregates, and these compounds exhibit flexible coordination geometries, leading to a broad spectrum of applications, from alloys and metallurgic additives to thermo- and ferroelectric materials, pigments, and catalysts (Mehring, 2016). Bismuth is both non-toxic and relatively inexpensive heavy metal, it is used in place of other related heavy metals (as a substitute for lead in plumbing fixtures) (Carlin, 2011). Bi^{3+} salts are used for medical purposes, mainly because of their acid−base, antibacterial, and antiviral properties (Briand & Burford, 1999) They are considered non-toxic, ecologically friendly, easy to work with, and insensitive to water and air (Cunha et al., 2002). Recent studies of the physicochemical properties of Bi compounds have resulted in the synthesis of Bi-based materials with different crystallographic structures and with micro- and nanometer sizes.

Perspectives

A constant need for cost-efficient and sustainable methods for critical raw materials like bismuth drives the efforts of researcher towards the development of new superior methods for extraction. Some of them include promising new perspectives, like ionic liquid leaching (Emam & El-Hefny, 2023), biorecovery (Saddique et al., 2023) and circular economy (Granvik et al., 2025).

Conclusion

While conventional methods dominate Bi recovery, innovations in solvent extraction and bioleaching promise cleaner, more efficient alternatives. Future work should optimise hybrid processes and reduce reliance on harsh reagents. Reducing the consumption and emphasising on the recycling will also benefit the price and availability of bismuth.

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

Anderson, C. G. (2012). The metallurgy of antimony. *Geochemistry*, *72*, 3–8. https://doi.org/10.1016/j. chemer.2012.04.001

Briand, G. G. & Burford, N. (1999). Bismuth compounds and preparations with biological or medicinal relevance. *Chemical Reviews, 99*(9), 2601-58. doi: 10.1021/cr980425s.

Carlin, J. F. (2009). Bismuth Minerals Yearbook. Volume I. - Metals and Minerals, Volume 2011, U.S. https://doi.org/10.3133/mybvl

Che, J., Chen, Y., Ma, B., Wang, C., Zhang, W. (2020). Recovery of metallic Bi from Pb Bi slag: An integrated process of chloride leaching and electrowinning. *Hydrometallurgy, 193*, 105321. doi:10.1016/j.hydromet.2020.105321

Chen, Y., Liao, T., Li, G., Chen, B., Shi, X. (2012). Recovery of bismuth and arsenic from copper smelter flue dusts after copper and zinc extraction. Minerals Engineering, 39, 23–28. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.06.008

Cunha, S.; de Lima, B. R., de Souza, A. R. (2002). Bismuth nitrate pentahydrate: a new and environmentally benign reagent for guanidylation of N-benzoylthioureas. Tetrahedron Letters, 43 (1), 49−52. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)02067-6

Daminov, Artem S., Yukhin, Yuri M., Spirin, Konstantin E., and Logutenko, Olga. A Hydrometallurgical Process for the Separation of Lead and Bismuth from Lead Bismuthite SSRN: https://ssrn.com/abstract=4583424 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4583424

Deady, E., Moon, C., Moore, K., Goodenough, K. M., Shail, R. K. (2022). Bismuth: Economic geology and value chains, *Ore Geology Reviews 143*, 104722. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104722

Emam, Sh. Sh., El-Hefny, N .E. (2023). Bi-functional ionic liquid based on Aliquat 336 and Cyanex 572 for effective separation of Nd(III) and Ni(II) from chloride solution and recover Nd2O3 from waste Nd-Ni-Fe magnets, *Hydrometallurgy, 219*, 106064. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106064

European Commission. Communication from the Commission to the European Parliment, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. COM/2020/474 final. 2020a.

European Commission: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023: final report, *Publications Office of the European Union.* https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585; ISBN 978-92-68-00414-2.

European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. (2018). *Report on*

critical raw materials and the circular economy. Publications Office. doi:10.2873/167813. ISBN 978-92-79-94626-4

Ghaderi, N., Dolatyari, L., Kazemi, D., Sharafi, H. R., Shayani-Jam, H., Yaftian, M. R. (2021). Application of a polymer inclusion membrane made of cellulose triacetate base polymer and trioctylamine for the selective extraction of bismuth(III) from chloride solutions, *Journal of Applied Polymer Science* 2021, e51480. https://doi.org/10.1002/app.51480

Granvik, P., Hanski, J., Lähdesmäki, S., Jokilaakso, A., Huttunen-Saarivirta, E. (2025). Critical raw materials for green transition: Key parameters and feasibility index for sufficiency, *Resources, Conservation and Recycling, 218*, 108197. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108197

Gupta, C. K. (2003). *Chemical Metallurgy: Principles and Practice*, Wiley-VCH, pp. 811, (ISBN 3 527 30376 6)

He, Y., Xu, R., He, S., Chen, H., Li, K., Zhu, Y., & Shen, Q. (2019). Alkaline pressure oxidative leaching of bismuth-rich and arsenic-rich lead anode slime. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 26*(6), 689–700. doi:10.1007/s12613-019-1776-y/ https://doi.org/10.1007/s12613-019-1776-y

Hernández-Pérez, L., Muñoz-Pérez, A., Ortega, E. M., Pérez-Herranz, V., Montañés, M. T., & Martí-Calatayud, M. C. (2024). Increasing the sustainability of copper electrorefining: Selective electrodeposition of antimony in the presence of bismuth from highly concentrated hydrochloric acid effluents, *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*(2), 112005. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112005

Kumar, S., Premkumar, M., Giri, J., Hasnain, S. M. M., Zairov, R., Wu, J., Huang, Z. (2024). Bismuth-based nanoparticles and nanocomposites: synthesis and applications, *RSC Advances, 14*(53), 39523-39542. https://doi.org/10.1039/d4ra05637j

Liu, X., Handschuh-Wang, S. (2025). Bismuth – production, market and price development, and applications. *Canadian Metallurgical Quarterly, 1*–19. https://doi.org/10.1080/00084433.2025.2465085

Mallaley, K., Morris, D. R. (1990). Analysis of the Kroll-Betterton Process: The Removal of Bismuth from Lead Bullion. *Canadian Metallurgical Quarterly, 29*(1), 67–71. doi:10.1179/cmq.1990.29.1.67

Man, X., Min, X., Yan, Y., Gong, H., Dai, Y., Li, T., Xiao, P., Sun, Y., Yin, L., & Wang, R. (2025). Prospect of bismuth and its compounds in sodium-ion batteries: A Review, *Energy Storage Materials, 75*, 104076. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2025.104076

Mehring, M. (2016) Metal Oxido Clusters of Group 13−15 Elements, Structure and Bonding, In book: *Clusters – Contemporary Insight in Structure and Bonding, 174*, 201−268. DOI: 10.1007/430_2016_4

Moriya, Y., Sugai, M., Nakata, S., Ogawa, N. (2001). Extraction of Bismuth (III) with 2-Bromoalkanoic Acid in Nondonating Solvent from Highly Acidic Aqueous Solution. *Analytical Sciences, 17*(2), 297–300. doi:10.2116/analsci.17.297

Perumal, S., Lee, W., Atchudan, R. (2022). A review on bismuth-based materials for the removal of organic and inorganic pollutants, *Chemosphere, 306*, 135521. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135521

Phung,V. D., Tran, T. G., Nguyen, D. Q., Tran, N. H. T., Kim, K. J., Chun, D., Nguyen, T. L., Moon, J. (2024). Innovative design of anode materials for li-ion batteries: bismuth oxide/sodium bismuth molybdate nanocomposites *Ceramics International, 50*, 52302-52313, 10.1016/j.ceramint.2024.10.082

Reyes-Aguilera, J. A., Gonzalez, M. P., Navarro, R., Saucedo, T. I., Avila-Rodriguez, M. (2008). Supported liquid membranes (SLM) for recovery of bismuth from aqueous solutions, *Journal of Membrane Science, 310*, 13–19. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.10.020

Rhaman, M. M., Matin, M. A., Hakim, M. A., & Islam, M. F. (2021). Bandgap tuning of samarium and cobalt co-doped bismuth ferrite nanoparticles. *Materials Science and Engineering: B*, *263*, 114842

Saddique, Z., Imran, M., Javaid, A., Latif, S., Kim, T. H., Janczarek, M., Bilal, M., Jesionowski, T. (2023). Bio-fabricated bismuth-based materials for removal of emerging environmental contaminants from wastewater, *Environmental Research, 229*, 115861. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115861

Shen, Y., Zhang, H., Cao, H., Wu, L., Zheng, G. (2019). Efficient extraction of bismuth from hydrochloric acid solution by copper powder, *Hydrometallurgy 189* (2019), article 105121. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105121

Sun, Y., Szulejko, J. E., Kim, K.-H., Kumar, V., Li, X. (2023). Recent advances in the development of bismuth-based materials for the photocatalytic reduction of hexavalent chromium in water, *Chinese Journal of Catalysis, 55*, 20-43. https://doi.org/10.1016/S1872-2067(23)64553-X

Tabassum, M., Aima-tul-ayesha, Yang, B., Jia, X., Zafar, M. N. (2025). Progress on synthesis, characterisation, and photocatalytic applications of bismuth oxyhalide based nanomaterials in cleaner environment and energy - A review, *Journal of Cleaner Production, 494*, 144868. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144868

Yang, J., Yang, J., Tang, M., Tang, C., & Liu, W. (2009). The solvent extraction separation of bismuth and molybdenum from a low grade bismuth glance flotation concentrate. *Hydrometallurgy, 96*(4), 342–348. doi:10.1016/j.hydromet.2008.12.006

Yang, K., Zhu, H., Zhang, L., Li, W., Sun, L. (2025). Current status and enhancement strategies for Bi-based materials in nickel bismuth batteries, *Chemical Communications, vol. 61* (56), 10228-10235. https://doi.org/10.1039/d5cc01954k

Yang, N. & Sun, H. (2011). Bismuth: Environmental Pollution and Health Effects. Encyclopedia of Environmental Health, Elsevier B.V., 414–420. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00374-3

Wen, X., Yang, Y., Bao, Q., Guo, L., Guo, Z. (2020). A green method for extraction of Bi and Pb from bismuth-rich melt by super-gravity, *Chemical Engineering Research and Design, 164*, 209-218. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.027

MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC AEROSOL AND ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER HEIGHT IN SOFIA AND KRUMOVGRAD IN JULY 2017

Nikolay Kolev[1], Plamen Savov[1], Maya Vatzkitcheva[1], Maria Kolarova[2], Lambo Lambov[3], Zhivko Vasilev[3]

[1]University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nic_k@abv.bg ; (nic_k@mgu.bg)
[2] National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH)
[3] Dundee Precious Metals Krumovgrad EAD, Bulgaria

ABSTRACT. This study presents results from complex experiments in the city of Sofia and the town of Krumovgrad to assess the relationship between atmospheric boundary layer and optical and microphysical characteristics of atmospheric aerosol using remote sensing devices, in-situ measurements, and model data. The height of the atmospheric boundary layer is an integral characteristic of the potential of the atmosphere to be cleaned of impurities. The height of the atmospheric boundary layer is determined from high temporal and spatial resolution data obtained from a ceilometer. Experimental results from measurements conducted on selected days with convective conditions in July 2017 were used to illustrate the relationship between meteorological parameters, aerosol structure, and atmospheric boundary layer height obtained from observations and modeling. The data obtained from the ceilometer and the laser particle counter are analysed to determine the diurnal structure and formation of the aerosol layer over Sofia and Krumovgrad. The HYSPLIT model was applied along with WRF-GDAS to track the reverse transport trajectories and the modelled height of the atmospheric boundary layer. The results of a complex study of atmospheric aerosol and the height of the atmospheric boundary layer in Sofia and Krumovgrad in July 2017 show that the observed height of the atmospheric boundary layer varied from 1000 to 2000 m for the experimental days. During the experimental studies, the measured particle concentrations (PM10) in Sofia ranged from 20 to 40 μg/m^3, and those in the Krumovgrad region were between 2 and 10 μg/m^3. The latter can be defined as background for this area, since the measurements were made before the start of the Ada Tepe mine operation.

Key words: ~~fine dust particles~~ particulate matter, atmospheric boundary layer, dispersion, meteorological parameters.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА АТМОСФЕРНИЯ АЕРОЗОЛ И ВИСОЧИНАТА НА АТМОСФЕРНИЯ ГРАНИЧЕН СЛОЙ В СОФИЯ И КРУМОВГРАД ПРЕЗ ЮЛИ 2017 Г.

Николай Колев[1], Пламен Савов[1], Майя Вацкичева[1], Мария Коларова[2] , Ламбо Ламбов[3] , Живко Василев[3]

[1] Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
[2] Национален институт по метеорология и хидрология (НИМХ)
[3] Дънди Прешъс Металс Крумовград ЕАД, България

РЕЗЮМЕ. Изследването представя резултати от комплексни експерименти в София и Крумовград за оценка на връзката на атмосферния граничен слой и оптични и микрофизични характеристики на атмосферния аерозол с помощта на устройства за дистанционно наблюдение, измервания на място и моделни данни. Височината на атмосферния граничен слой е интегрална характеристика на потенциала на атмосферата да се очиства от примеси. Височината на атмосферния граничен слой се определя от данни с висока времева и пространствена разделителна способност, получени от облакомер. Експериментални резултати от измервания, проведени през избрани дни с конвективни условия през юли 2017 г. бяха използвани за илюстриране на връзката между метеорологичните параметри, аерозолната структура и височината на атмосферния граничен слой, получена от наблюдения и моделиране. Данните, получени от облакомера и лазерния брояч на частици, се анализират, за да се определи дневната структура и формирането на аерозолния слой над София и Крумовград. Приложен е моделът HYSPLIT съвместно с WRF-GDAS за проследяване на обратните траектории на пренос и моделната височината на атмосферния граничен слой. Резултатите от комплексното изследване на атмосферния аерозол и височината на атмосферния граничен слой в София и Крумовград през юли 2017 показват, че наблюдаваната височина на атмосферния граничен слой варира от 1000 до 2000 m за изследваните дни. Проведените експериментални изследвания показват, че измерените концентрации на частици (PM10) в София са от 20 до 40 μg/m^3, а в района на Крумовград са между 2 и 10 μg/m^3. Последните могат да се определят като фонови за този район, тъй като измерванията са направени преди началото на експлоатацията на мината Ада тепе.

Ключови думи: фини прахови частици, атмосферен граничен слой, дисперсия, метеорологични параметри.

Въведение

Атмосферният граничен слой (АГС), с долна граница на земната повърхност и горна достигаща до 1000 – 2000 m, е най-ниската част от тропосферата, която е директно повлияна от земната повърхност, която й въздейства във времеви интервал от около един час или по-малко. Това въздействие включва триене, изпарение и кондензация, топлообмен, излъчване на замърсители и промени в характера на въздушния поток под действието на грапавостта и на релефа. (Stull, 1988; Oke, 1987). Замърсяването на въздуха в градска среда е свързано с физични и химични процеси, вариращи в широк пространствен и времеви диапазон. На разстояния от 10 до 30 километра в хоризонтално направление, природата на АГС е тази, която определя разпространението на замърсителите от източници, разположени близо до земната повърхност (Oke, 1987; Savov et al., 2021). Прахта (фините прахови частици - ФПЧ) е един от основните замърсители на въздуха, като основните й източници са промишлеността, транспорта и енергетиката. (Kolev et al., 2019, 2024). Естествено тя има вредно влияние върху човешкото здраве, което зависи главно от размера и химичния състав на праховите частици. Аерозолите представляват аеродисперсни системи - смес от атмосферен въздух и диспергирани в него фини частици в твърдо или течно агрегатно състояние. Главна част от праховите аерозоли остават в тропосферата като 80% от тях се локализира на височина до 1-2 km (т.е. в атмосферен граничен слой). Основните параметри, определящи поведението на праха и неговото хигиенно значение са: концентрация, размери, форма, специфично

тегло и химичен състав на дисперсната фаза. ФПЧ10 се емитират главно от индустриалните инсталации и от автомобилния транспорт, а през зимния период, значителен принос има и употребата на твърди горива за отопление (Zeng et al., 2017; Tang et al., 2019; Vatzkitcheva et al., 2020).

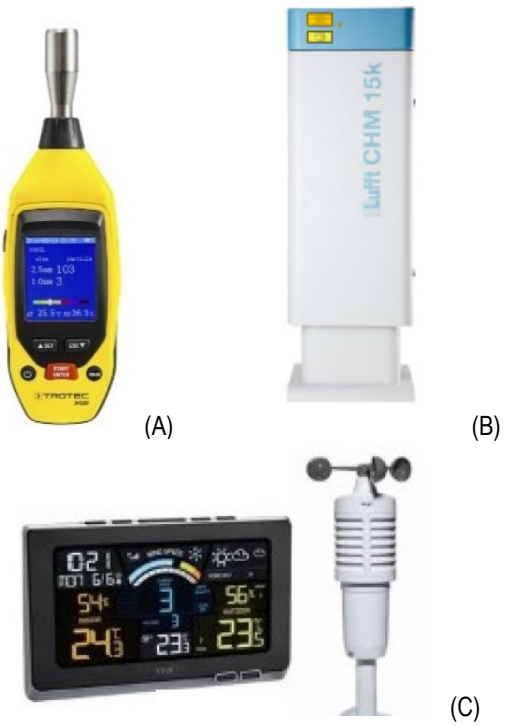
Експериментални данни

Измерванията са проведени от 06.07.2017 г. до 10.07.2017 г. в района на гр. София и гр. Крумовград. Масовата концентрация на ФПЧ е измерена с преносими лазерни броячи на частици BQ20 – Trotec (Фиг. 1A), 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. Концентрациите се измерват през деня като скоростта на вземане на проби е 0,9 l / min.

Измервания с облакомер Ceilometer (CHM 15k), (Фиг. 1.B), разположен в Борисовата градина 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).

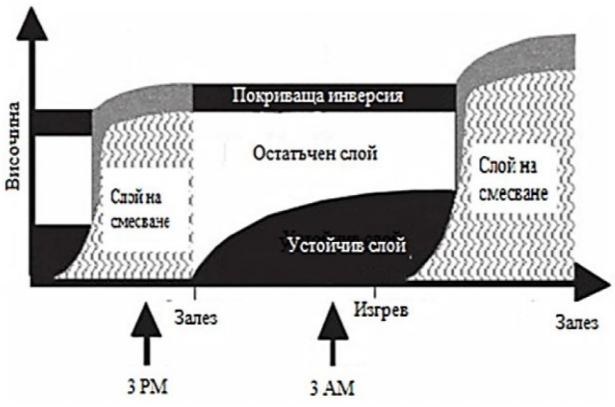
Метеорологичните параметри са измервани със станция PCE-FWS 20-1, (Фиг. 1C), позволяваща точно измерване на посоката и скоростта на вятъра чрез анемометър, на температурата и относителна влажност на въздуха - чрез термохигрометър. Измерваните параметри са: температура в градуси по Целзий, относителна влажност в % RH, атмосферно налягане в hPa, посока и скорост на вятъра съответно в deg и m/s.

Използвани са моделите HYSPLIT и WRF-GDAS, разработени от ARL-NOAA, с помощта на които се определя по модели данни височината на АГС за двата града и се сравнява с резултатите, получени от сейлометъра.



(A) (B) (C)

Фиг. 1. Уреди за измерване: А) лазерен брояч на ФПЧ; В) сейлометър CHM 15k (облакомер) и С) метеорологична станция;



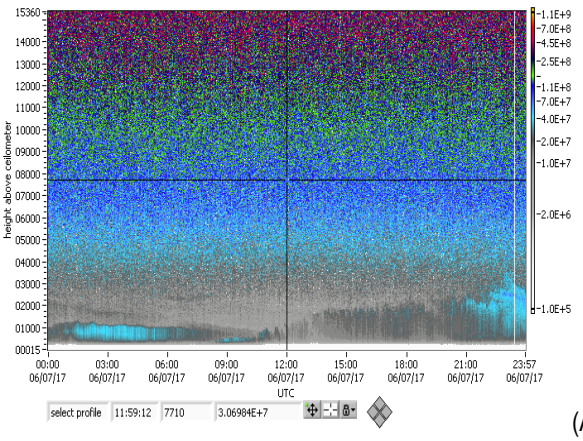
Фиг. 2. Еволюция на височината на атмосферният граничен слой през денонощието (Stull, 1988)

На фигура 2 е представена схема на развитието на атмосферния граничен слой във височина през денонощието на Роланд Стулл (Stull, 1988). По време на развитието на денонощния цикъл на височината на АГС, могат да се разграничат три основни слоя: слой на смесване (СС), устойчив слой (УС) и остатъчен слой (ОС).

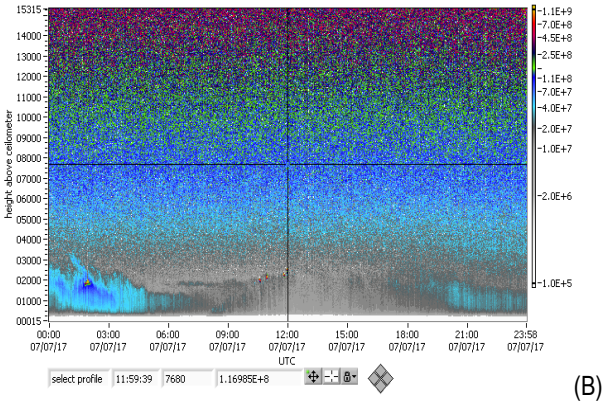
Слой на смесване в ясни и слънчеви дни без вятър, слънцето нагрява земята и създава интензивни конвективни потоци от топъл въздух - развива се интензивно СС. При тези условия той достига най-голяма височина през лятото от 1800-2000m в следобедните часове. През този период СС навлиза в т. нар. свободна атмосфера, разположена над него. Устойчив слой се появява вечер след залеза на слънцето, земната повърхност изстива и охлажда и съседните слоеве въздух, формират се т. нар. температурни инверсии. Остатъчен слой се формира около час след залеза на слънцето, вертикалните движения на въздуха силно се редуцират и се образува ОС. Характерно за ОС е, че концентрацията на примеси в него е подобна на тази на СС от предния ден. При изгрева на слънцето ОС може да бъде погълнат от УС при определени метеорологични условия. (Савов, 2022).

Дискусия и анализ на данните

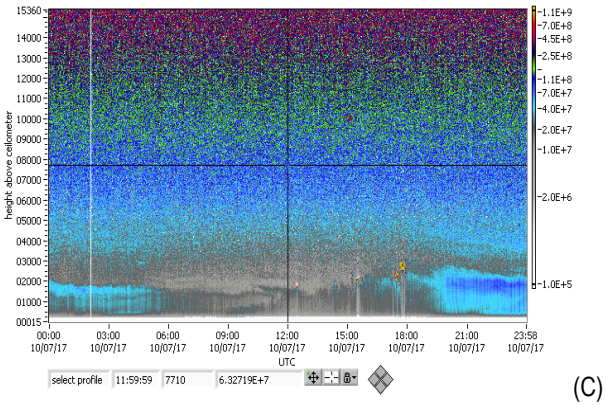
Данните от измерванията и анализа са за периода 06.07.2017 г. -10.07.2017 г., като са разгледани по-задълбочено три дни с подходящи условия.



(A)



(B)

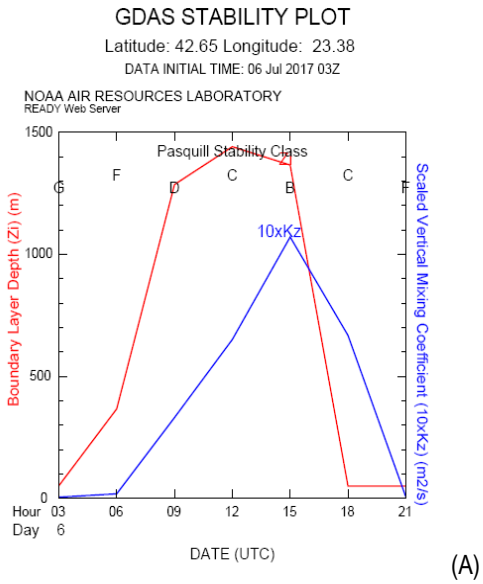


(C)

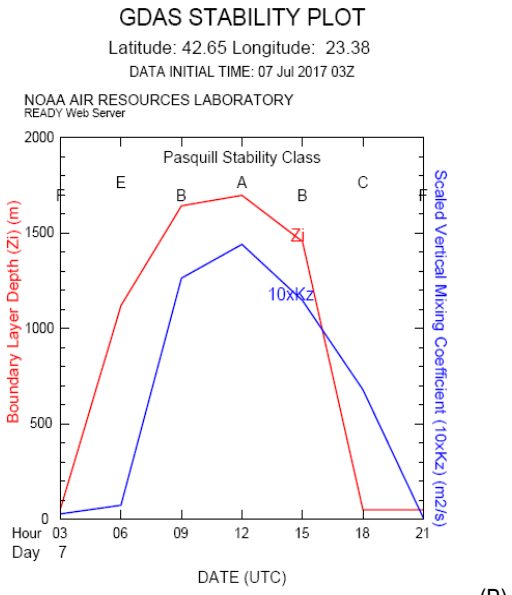
Фиг. 3. Сигнал от облакомер CHM 15к, получени на 06.07.2017 (A), 07.07.2017 (B), 10.07.2017 (C) в София

На фигура 3 е дадена височината на атмосферния граничен слой на атмосферата в района на София (42.65N, 23.38E), Борисова градина, определена от данни на облакомер Ceilometer (CHM 15k), за три ясни слънчеви дни със скорост на вятъра 1-2 m/s. На (Фиг. 3.A) от 06.07.17 г. височина на АГС в 12:00 UTC (+ 3 часа локално време) е около 1300 m. На (Фиг. 3B) от 07.07.17 г. височина на АГС в 12:00 UTC е около 1600 m и на третата графика от 10.07.17 г. височината на АГС е около 1700 m.

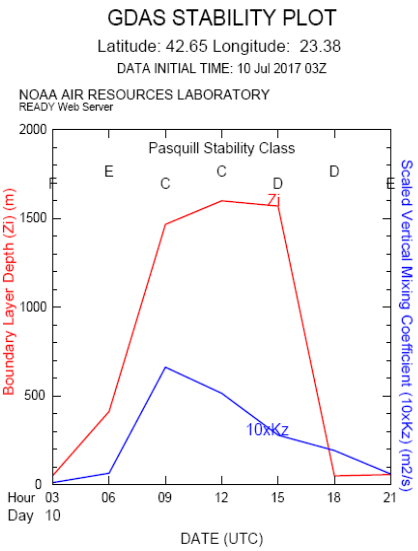
На фигура 4 са представени височините на атмосферния граничен слой по модели данни (WRF-GDAS американски модел, разработен от ARL-NOAA) за трите дни в района на град София. Височината на АГС за 06.07.17 г. е съответно 1400 m за 12:00 UTC, за втория ден от изследването 07.07.17 г., височина на АГС е 1700 m за същият период от време и за третият ден на 10.07.17 г. височината на АГС е 1600 m. Между моделните данни и данните, получени от облакомер Ceilometer (CHM 15k) за височина на АГС, има малка разлика от 100 – 200 m, което е грешка в рамките на 5-10%, сравнително добър резултат при ясни слънчеви дни без вятър.



(A)



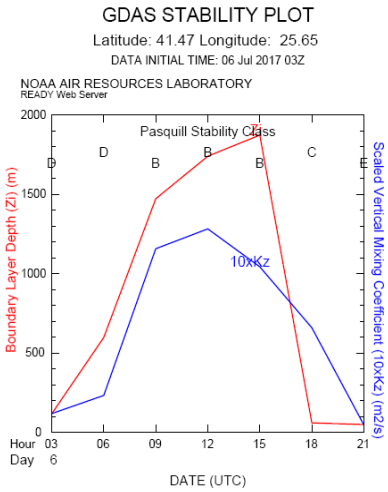
(B)



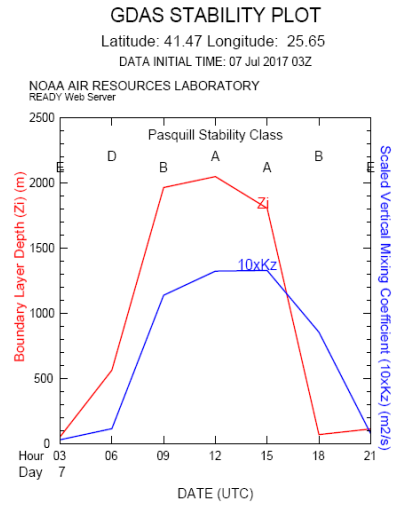
(C)

Фиг. 4. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС на 06.07.2017 (A), 07.07.2017 (B), 10.07.2017 (C) за (42.65N, 23.38E) София

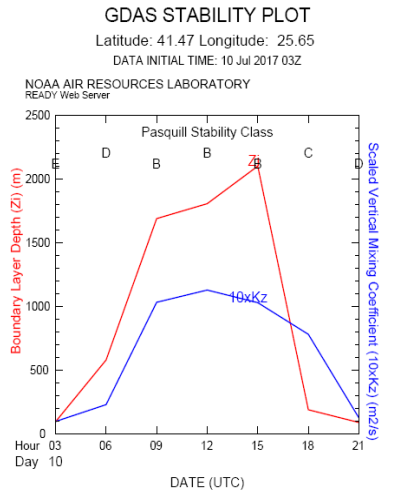
На фигура 5 са представени резултати за височината на атмосферния граничен слой (АГС) в Крумовград (41.47N, 25.65E) по модели данни за три дни на месец юли 2017 г. На фигурата (Фиг. 5D) 06.07.2017 г. е представена АГС с максимална височина 1900 m в 15:00 UTC + 3 часа за българско часово време и съответно на фигура (Фиг. 5E) е представена АГС за 07.07.2017 г. в 12:00 UTC с максимална височина от 2000 m. На третата фигура (Фиг. 5F) височината на АГС в 15:00 UTC е 2100 m.



(D)



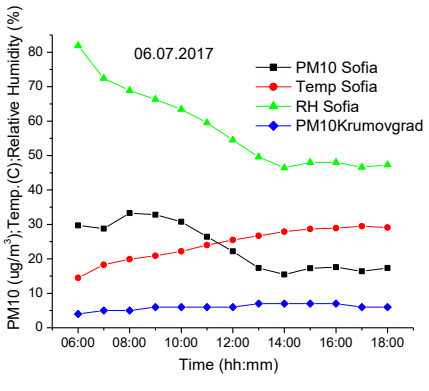
(E)



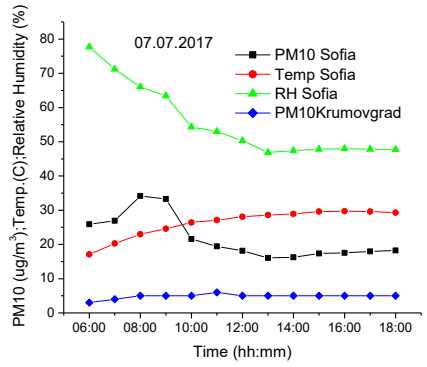
(F)

Фиг. 5. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС на 06.07.2017 (D), 07.07.2017 (E), 10.07.2017 (F) (41.47N, 25.65E) Крумовград

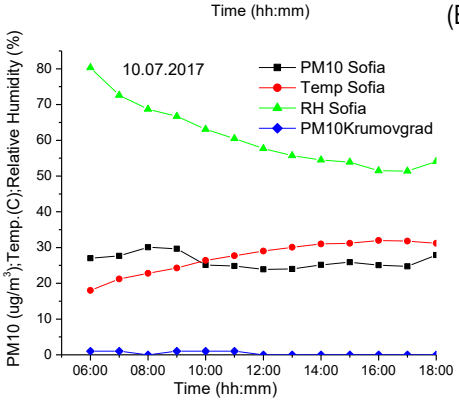
Разликите във височината на атмосферния граничен слой по данни от WRF-GDAS, разработени от ARL-NOAA, с помощта на които се определя по модели данни височината на АГС в София (42.65N, 23.38E) и Крумовград, (41.47N, 25.65E) е в интервала 200 – 300 m и се дължи на разликите в географската ширина и дължина на двата града за трите сравнявани дни. (Draxler, 1979; Draxler, et al. 1998; Stein et al., 2015).



(A)



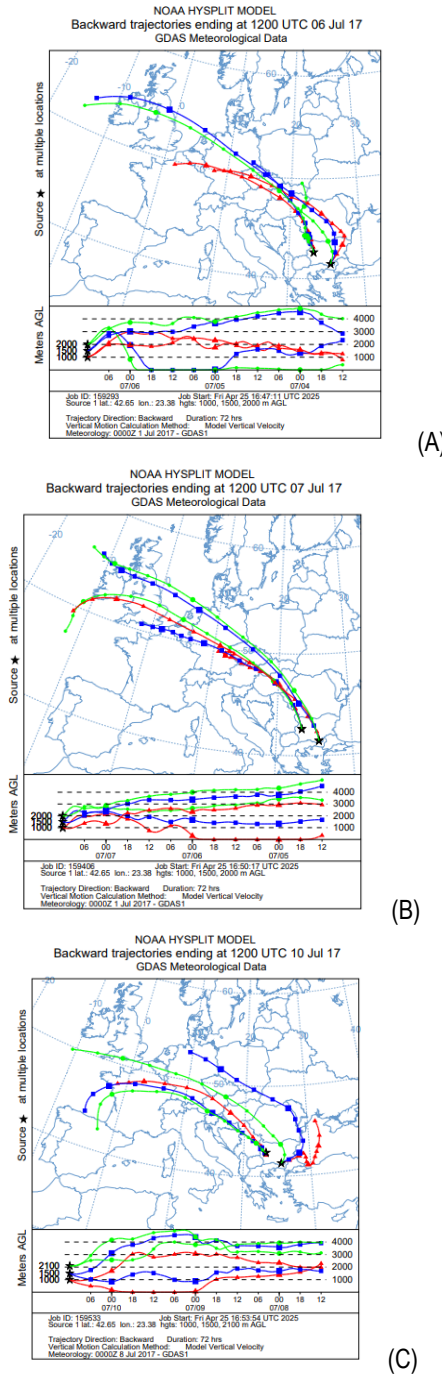
(B)



(C)

Фиг. 6. Концентрация фини прахови частици PM10, температура и относителна влажност на 06.07.2017 (A), 07.07.2017 (B), 10.07.2017 (C) в София и Крумовград

На фигура 6 е представена масовата концентрация на ФПЧ с размери 10 μm, температура и относителна влажност на атмосферата за София и Крумовград. Концентрацията на (PM10) за София варира в диапазона от 36 μg/m^3 в 09:00 ч до 19 μg/m^3 в 16:00 ч за 06.07.2017 г., от 38 μg/m^3 сутрин до 20 μg/m^3 следобед за 07.07.2017 г. и от 33 μg/m^3 сутрин до 27 μg/m^3 следобед за 10.07.2017 г., температурата е в интервала от 16°C до 30°C, а относителната влажност е от 82% до 48%. Концентрацията на PM10 за Крумовград е в диапазона от 6 μg/m^3 до 4 μg/m^3 за 06.07.2017 г., от 5 μg/m^3 сутрин до 2 μg/m^3 следобед за 07.07.2017 г. и от 3 μg/m^3 сутрин до 1 μg/m^3 следобед за 10.07.2017.



(A)

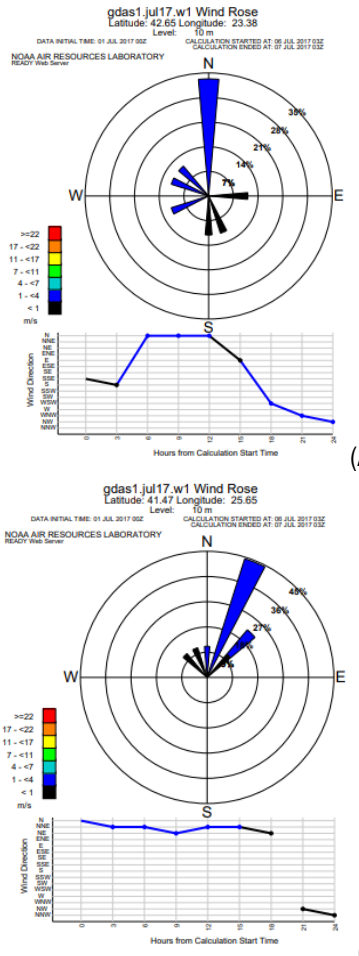
(B)

(C)

Фиг. 7. Обратни траектории на въздушните маси, изчислени от модела HYSPLIT, завършващи над София и над Крумовград на: 06.07.2017 (А), 07.07.2017 (В), 10.07.2017 (С), на височини 1000, 1500 и 2000 m

На фигура 7 са представени обратни траектории на въздушните маси, изчислени от модела HYSPLIT, завършващи над София и над Крумовград на: 06.07.2017 г. (А), 07.07.2017 г. (В), 10.07.2017 г. (С), на височини 1000, 1500 и 2000 m. Преносът на въздушните маси за 72 часа е от север и северзапад от Атлантическия океан, Великобритания, Германия, Чехия, Унгария, Румъния и България, а за 10.07.2017 г. той е от Франция, Германия, Чехия, Унгария, Румъния и България. Метеорологичната обстановка по време на експеримента е следната: За 06.07.17 г.: след изтеглянето на циклона на изток преносът на 500 hPa над страната е от запад, а впоследствие - от северозапад. Приземното барично поле е антициклонално. Времето е предимно слънчево, а температурите бързо се повишават. Максималните са между 30 и 35°C. На 07.07.17 г.: Приземното барично поле над страната е слабо градиентно, антициклонално. Атмосферното налягане бавно се понижава и от североизток прониква студен въздух, преминава слабо изразено атмосферно смущение. Температурите се понижават с 1 - 2°C. На 10.07.17 г.: Приземното барично поле остава антициклонално. Температурите отново се повишават и максималните достигат 33 - 38°C (Месечен бюлетин на НИМХ, юли 2017 г.).

Стойностите на метеорологичните параметри по време на експеримента ни дават основание да предположим, че класът на устойчивост на атмосферата е B, C, D и E. При дисперсионното моделиране, способността на атмосферата за движение във вертикална посока се определя чрез въведените за целта категории на устойчивост на атмосферата. В качествено отношение тези категории са известни със следните означения: B, C – неустойчива атмосфера; D – неутрална атмосфера; E – слабо устойчива атмосфера (Draxler, 1979). Състоянието на атмосферното замърсяване и способността на атмосферата да се самоочиства е пряко свързана с конкретна стратификация и клас на устойчивост на приземната атмосфера.



(A)

(B)

Фиг. 8. Роза на вятъра за района на София (А) и за района на Крумовград (В) на 06.07.2017г. по моделни данни от модела WRF-GDAS

На фигура 8 е представена роза на вятъра за района на София и за района на Крумовград на 06.07.2017 г. по моделни данни от (WRF-GDAS модела за метеорологични изследвания и прогнозиране - Глобална система за асимилация на данни, разработени от Лабораторията за въздушни ресурси на Националната администрация за океани и атмосфера (NOAA) САЩ) Скоростта на вятъра е между 1 - 4 m/s, като преобладава вятърът от северна и североизточна посока.

Заключение

Това изследване представя резултати от комплексни експерименти в София и Крумовград за оценка на връзката на АГС и оптичните и микрофизични 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 1000 до 2000 m за експерименталните дни. По време на експерименталните изследвания измерените концентрации на частици (PM10) в София са от 20 до 40 μg/m^3. За района на Крумовград те са между 2 - 10 μg/m^3, които могат да се разглеждат като фонови, тъй като измерванията са направени преди началото на експлоатацията на мината „Ада тепе“.

Резултатите от експеримента в София и Крумовград през месец юли 2017 г. показват връзката на АГС и микрофизични характеристики на атмосферния аерозол с помощта на устройства за измервания на място и моделни данни. От анализа на експерименталните данни на аерозола в атмосферата, могат да се направят *няколко извода:* Височината на атмосферния граничен слой оказва силно влияние върху концентрацията на фини прахови частици, като с повишаване на височината на АГС концентрацията на PM10 бързо намалява. Върху разсейването на емитираните замърсители в приземния слой на атмосферния въздух влияят и редица други фактори като особености на релефа, метеорологичните и климатични условия, гъстота и височина на застрояване, възраст и състояние на МПС и др. Измерените нива на масовата концентрация на финитe прахови частици в диапазона 10 - 20 μm за района на София са 4 – 5 пъти по високи от концентрациите на ФПЧ10 за района на Крумовград. Височината на атмосферния граничен слой над Крумовград, по моделни данни, е по висока от височината на АГС над София за същите дни с 200 – 300 m, като това се дължи вероятно на по-южното разположение на града спрямо София и по-високите температури на въздуха, които генерират по-висок слой на АГС.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на: Дог. ГПФ №256, НИС-МГУ, за 2025 г. „Изследване на вибрациите, вследствие на взривните работи и влиянието на термичното поле, генерирано от подложната повърхност, върху дисперсията на фини прахови частици в атмосферата на открити рудници и кариери“. Ръководител: проф. д-р П. Савов.

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 Дънди Прешъс Металс, Крумовград ЕАД, България за предоставените данни, информация и подкрепата на мината „Ада тепе“, Крумовград.

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).

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.

Tang, L, Qu, J.B., Mi, Z.F., Bo, X., Chang, X.Y., Anadon, L.D., Wang, S.Y., Xue, X.D., Li, S.B., & Wang, X. (2019). Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards. *Nat. Energy*, *4*, 929–938.

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 (2017). Месечен хидрометеорологичен бюлетин на НИМХ, юли 2017, София.

Савов, П. (2022) *Атмосфера и околна среда*. МГУ 2022, 168 стр.

ORGANISATION AND MANAGEMENT OF PROCESSES IN DEVELOPING THE *MILIN KAMAK* DEPOSIT

Alexander Krilchev

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

ABSTRACT. Vein deposits in Bulgaria represent about 70% of the total number of ore deposits. So, this type is defined as the main one for Bulgaria’s ore mining. The specific characteristics of this type of deposit, which distinguishes it from the others, are complex morphology, high variability of output and content of useful components, changes in mineralisation, the presence of tectonic disturbances, etc. These characteristics largely influence the choice of the exploration and preparation system, the development system, the choice of mechanisation, the choice of rock pressure control devices, etc. Economic, environmental, social, regulatory, and legal aspects are also of great importance in the development of such types of deposits. The *Milin Kamak* deposit is an epithermal, vein-type deposit with proven industrial quantities of silver-gold ore. Several ore zones have been defined, with east-west and northeast-southwest trends, representing old faults that played the role of ore-conducting and ore-hosting structures.

Key words: deposit, ore, mineral, concentrate, reserves, workings, shaft, drifts.

ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ РАЗРАБОТВАНЕ НА НАХОДИЩЕ „МИЛИН КАМЪК“

Александър Крилчев

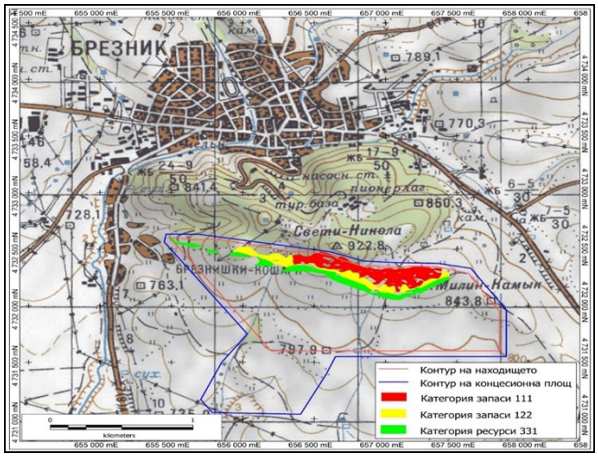
[1]Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Жилните находища в България представляват около 70% от общият брой на рудните находища. Това определя този тип като основен за нашия рудодобив. Специфичните характеристики на този тип находища, по които те се различават от останалите са сложна морфология, голяма изменчивост на мощността и съдържание на полезните компоненти, промени в орудяването, наличие на тектонски нарушения и т.н. Тези характеристики до голяма степен оказват влияние върху избора на система на разкриване и подготовка, системата на разработване, избора на механизация, избора на крепеж за управление на скалният натиск и т.н. Важно значение при разработването на такъв тип находища оказват и икономическите, екологични, социални, регулаторни и правни аспекти. По генезис находище „Милин камък“ е епитермален, жилен тип с доказани промишлени количества от сребърно-златна руда. Дефинирани са няколко рудни зони с протежение изток-запад и североизток-югозапад, представляващи стари разломни нарушения, играли ролята на рудопроводящи и рудовместващи структури.

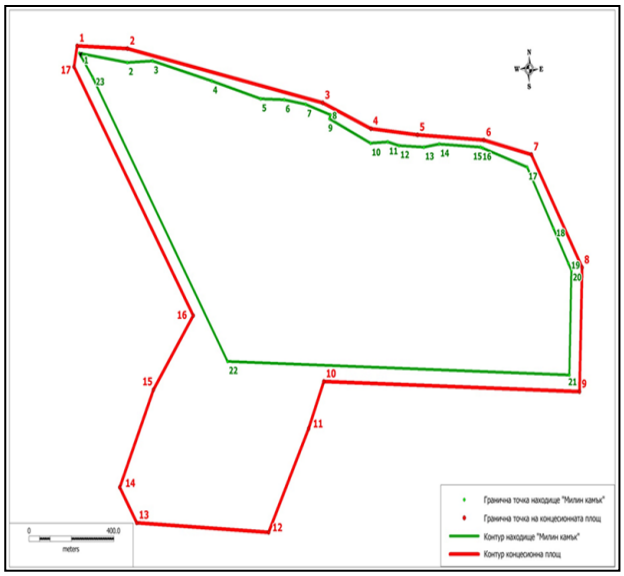
Ключови думи: находище, руда, полезно изкопаемо, концентрат, запаси, минни изработки, шахта, галерии

1. Въведение

Находище „Милин камък“ е разположено в района на Западното Средногорие и се намира югоизточно от гр. Брезник. Разстоянието до областния център - гр. Перник, е около 25 km. Най-близкото населено място – гр. Брезник отстои на 750 m на север от находището. Третокласен път III-811 „Перник – Брезник – Арзан – Сливница“ от републиканската пътна мрежа е на около 330 m на запад от находището. На изток от находището преминава второкласен път II-63 „Перник – Брезник – Трън“. Площта на находището и схемата на концесионната площ са показани на фиг.1 и фиг.2.

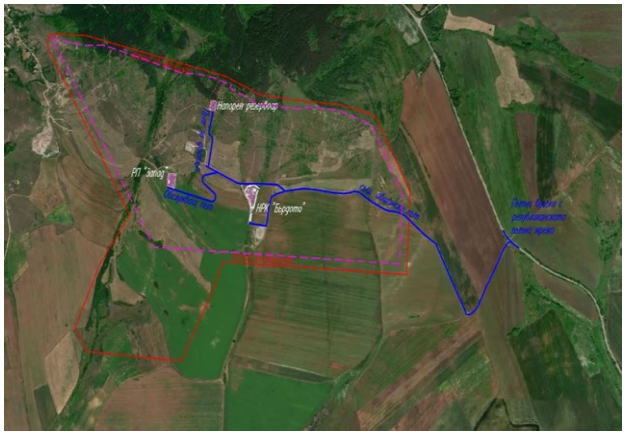


Фиг.1. Обзорна карта на находището с контура на концесионната площ



Фиг. 2 Находище „Милин камък“

Пътният достъп до концесионната площ и находището се осъществява от второкласен път II-63 „Перник – Брезник – Трън“ и локално отклонение от него на запад към площта с дължина около 2 500 m - фиг. 3.



Фигура 3 Схема на пътен достъп

2. Геологопроучвателна дейност

През периода 2016-2024 г. са извършени:

2.1. Геофизични измервания (магнитотелурика с контролиран източник на ток (CSAMT), предизвикана поляризация (IP), наземни измервания на тоталния вектор на земното магнитно поле (TMI))

2.2. Геоложко картиране.

За посочения период са извършени картировъчни работи в района на находището, вследствие на което се направи детайлизация в периферните части на района на находището. Прокарани са общо 51 броя канави с дължина 3384 m. По отношение на проучвателните сондажни работи са прокарани 409 броя наземни сондажи с обща дължина 67330 m и 124 броя подземни сондажи с обща дължина 2557 m. За детайлно проучване на находището са прокарани подземни минни изработки – Наклонена шахта „Бърдото“ с дължина 393.9 m и две проследяващи галерии с обща дължина 606 m.

3. Хидрогеоложки условия

3.1. Повърхностни води

Находище „Милин камък“ попада в пределите на Западнобеломорски район за басейново управление на водите. Съгласно хидроложкото райониране на България територията се намира в област с континентално климатично влияние на оттока, което обуславя неговия максимум през месеците май и юни, и минимум – през месеците август и септември. Основната хидрографска единица се явява р. Конска, събираща водите си от планините Вискяр, Люлин, Любаш и Черна гора. Реката протича на около 2 – 3 km югозападно от площадката на рудника. Има постоянен воден отток, с неравномерен дебит през различните годишни сезони. В границите на концесионната площ на находище „Милин камък“ преминават два повърхностни водни обекта – р. Дабовица и р. Дълбоки дол, които са част от повърхностно водно тяло „р. Конска (от кота 840 m) с десния си приток – р. Селска, до вливане в р. Струма“. Посочените водни обекти се характеризират с временно съсредоточаване на води в тях.

3.2. Подземни води

По отношение на подземните води те се намират само в най-горната изветрителна зона на разкритията и почвения слой. Тези води, формирани в зоната на екзогенната напуканост, имат плитка циркулация и активен водообмен.

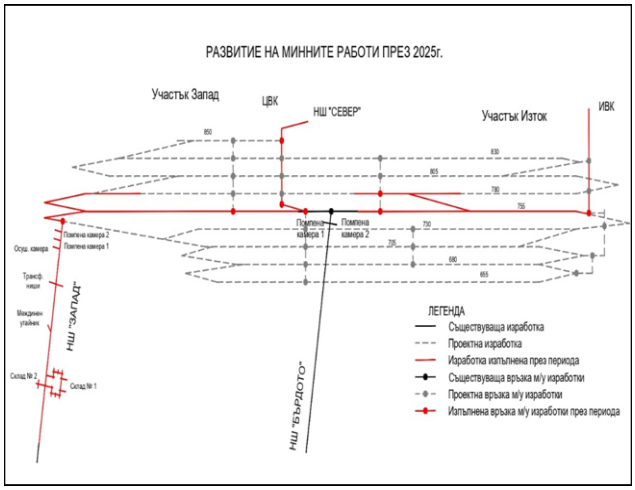
Имат спорадичен, често временен характер. Те са ненапорни, порово-пукнатинни. Подхранването им се осъществява от паднали атмосферни валежи и снеготопене, а дренирането – в хидрографската мрежа и от извори с малки дебити. Често през сухите сезони повечето от изворите пресъхват. В дълбочина напукаността и водопропускливостта на скалите намалява и те се явяват съществен водоупор, затрудняващ проникването на води в дълбочина.

4. Развитие на минните работи

4.1. Разкриване и подготовка на рудничното поле

Начинът на разкриване на находището е чрез два броя наклонени шахти – НШ „Бърдото“ и НШ „Запад“. Достъпът до тях е механизиран. За нуждите на вентилацията ще се прокара и НШ „Север“. По този начин се осигуряват три изхода на повърхността от рудника. С прокарването на наклонените шахти рудничното поле условно се разделя на два участъка – участък „Изток“ и участък „Запад“.

Шахтите „Бърдото“ и „Запад“ се явяват главни разкриващи изработки с директен транспортен достъп от промишлената площадка до главните етажни изработки. Те ще изпълняват основни функции при разработване на находището –достъп до работните места, извоз на добитата руда и скална маса от проходката, доставка на материали, осигуряване на вентилация, водоотлив и др. През 2025 г. се предвижда извършване на миннопроходческа дейност, изразяваща се в прокарване на капитални, подготвителни и спомагателни изработки (товарища и разтоварища, ниши и разсечки, помпени камери и утаители, складове), прокарване на централен и източен вентилационни комини (ЦВК и ИВК) до хор. 755 и стартиране монтирането на Главна вентилаторна уредба (ГВУ). Развитието на минните работи през 2025 година е показана на фиг. 4



Фигура 4.

Общото количество на планираните миннопроходчески дейности за 2025 г. е показано в Таблица №1.

Таблица 1. *Проектни дължини на изработките, предвидени за изпълнение през 2025 г.*

Изработка	*Дължина*	*Обем изкоп*
	m	m^3
НШ Запад	510	9140
НШ Север	110	3085
Вентилационни комини	195	2050
Етажни галерии	1295	22746
Наклонки за връзка на етажни галерии	670	13025
Спомагателни изработки	540	12088
Достъпи	340	5265
Всичко за 2025 г.	3 680	67 400

4.2. Технологии за добив. Системи на разработване, параметри

След проучване и извършена експертна оценка е определено, че най-подходящи системи за конкретните условия са „Системи на разработване със запълване на иззетото пространство“ и техните варианти. Предимството на тези системи е относителната простота на изпълнение. Подходящи са за разработване на зони с различна мощност и има възможност да се изземват руди със сложна морфология и лесно да се проследяват рудните тела с голяма изменчивост на дебелината и западането. При тази система лесно се преодоляват безрудни участъци и има възможност за разработване на паралелни структури. Друго предимство е значително намаленото количество скална маса от проходческата дейност за депониране, тъй като същата се връща в иззетото пространство под формата на запълващ материал.

През 2025 г. се предвижда подготовка за прилагане на следните системи за разработване на находището:

- система с хоризонтални слоеве, цялостно отбиване на рудата и запълване на иззетото пространство;
- система с хоризонтални слоеве, селективно отбиване на рудата и запълване на иззетото пространство;
- система с подетажни изработки, отбиване на рудата с дълги взривни дупки и запълване на иззетото пространство.

.

4.3. Схеми на подготовка и ред на изземване на добивните блокове

Подготовката и отработването на блоковете ще се извършва по предварително изготвени и утвърдени Технологични (работни) проекти. При прилагането на различните системи за разработване на находището ще бъдат използвани сходни схеми на подготовка. Във фланговете на добивните блокове ще бъдат прокарвани достъпи от главните етажни галерии. Достъпите ще достигат първоначално до най-долния слой на блока, а с напредване на добивните работи във височина, достъпите ще бъдат коригирани до следващите слоеве. Изработките са наклонени с направление перпендикулярно на главната етажна галерия и добивните блокове. Дължината им зависи от отстоянието на блока до етажната галерия или при отдалечени блокове - от предходния блок. При разработване на самостоятелни (единични) блокове и при възможност складовете за руда се прокарват от достъпите със сечение 12 m^2, а складовете за скална маса - от главната етажна галерия, със сечение 21.8 m^2 или 25.5 m^2. При отработване на сближени блокове по простирание, с цел намаляване на сроковете, обемите и разходите за подготвителни работи между блоковете, се прокарва един достъп, който служи и за двата блока. Така се създава възможност за намаляване на разстоянията за преместване на машините и увеличаване на производителността. Отбития безруден материал при връзките между нарезните изработки и лентите на блоковете ще се използва за запълване. В този случай блоковете се изземват едновременно. При разработване на група от блокове, се извършва групова подготовка (за всички блокове), като достъпите се прокарват с увеличено сечение от 15 m^2 до първия блок. Увеличеното сечение ще позволява достъп до блока на извозната механизация. По този начин се съкращава транспортното разстояние на товарачните машини от забоя до местата за товарене и времето за престой в очакване на извозната механизация. В края на увеличените достъпи се изграждат спомагателни изработки – временни складове за руда със сечение 12 m^2 и временни складове за скална маса със сечение 21.8 m^2. От достъпите се прокарват нарезни изработки по цялата дължина на блока. Изработките осигуряват връзка между двата достъпа и фронт за добивни работи. Изземването на добивните блокове е във възходящ ред - от хоризонт 755 към хоризонт 850 като главните хоризонти (етажи) са през 25 m. След погасяване на запасите над хоризонт 755 добивните работи ще се развиват във възходящ ред - от хоризонт 630 към хоризонт 755. По отношение на добивните работи за всеки хоризонт изземването по етажите ще бъде смесено – в прав и в обратен ред. Добивът от етаж започва след осигуряване на втори изход за хоризонта и възможност за проветряване. Изходите от етажите ще бъдат осигурени след прокарване на транспортните връзки (наклонки) и връзката им с вече изградените изработки.

През 2025 г. не се предвижда изземване на добивни блокове, а само извършване на подготвителни и нарезни работи.

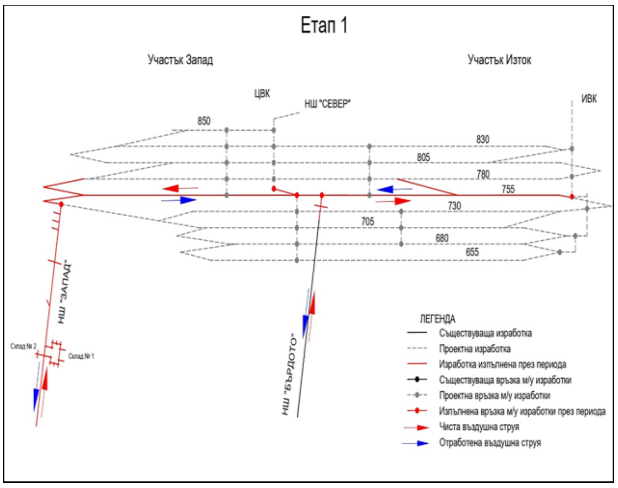
4.4. Рудничен транспорт

Концепцията за строителство и експлоатация на рудника предвижда основните процеси по минно-проходческата и добивна дейност да бъдат механизирани. За обезпечаване на предвидените дейности по строителство на новите минни изработки и поддръжка на досега изградените ще се използва високотехнологично специализирано самоходно мобилно оборудване:

- еднолафетни и двулафетни пробивни карети;
- подземни челни товарачи с обем на кофата 3,5÷3,7m^3;
- подземни минни камиони с товароносимост 20 и 30t;
- торкретиращи машини и минни бетоновози;
- емулсионни зарядни машини;
- спомагателно подземно самоходно оборудване - телехендлери, обслужващи камиони, автогрейдер, специализиран автомобил за ГСМ, специализиран автомобил за доставка на взривни материали;
- специализиран автомобил за аварийно-спасителни дейности – тип „линейка“.

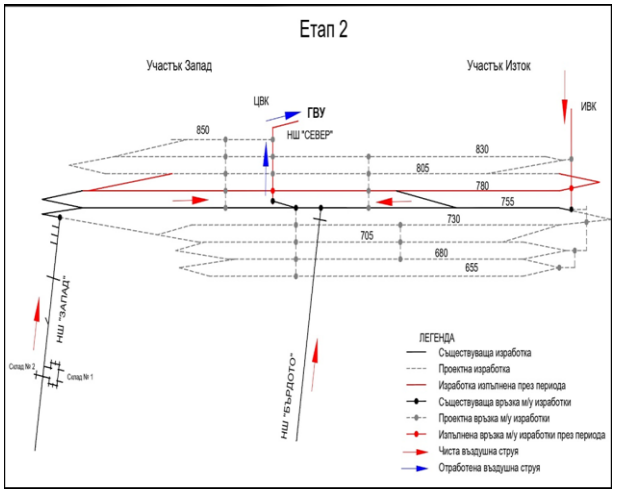
4.5. Руднична вентилация

Първи етап (фиг. 5) представлява прокарването на наклонените шахти, разкриване на хоризонт 755, прокарване на наклонени изработки до хоризонт 780. Той се разглежда до прокарването на вентилационните комини и сбиването им с хоризонт 755. За проветряването на минните изработки по време на прокарването ще се използват 2 броя монтирани осови вентилатори за местно проветряване, позиционирани на устието на НШ „Бърдото“ и ще бъдат допълнително монтирани още 2 броя аналогични вентилатора на устието на НШ „Запад“. За проветряването на НШ „Север“ ще се монтира 1 брой осов вентилатор на устието. Всички вентилатори ще работят на нагнетателен режим. Чистият въздух се доставя до забоите в изработките посредством гъвкави тръбопроводи с диаметър от 1200 mm, 900 mm и 700 mm, и дължина на звеното до 20 m.



Фигура 5. Вентилационна схема за проветряване по време на Първи етап на строителство на рудника

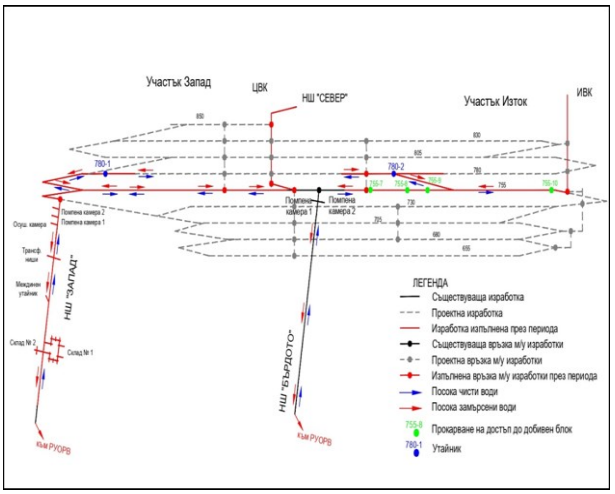
Като Втори етап (фиг. 6) на строителство ще се разглежда рудникът след прокарването на Централен вентилационен комин и Източен вентилационен комин и свързването на комините с етажната галерия на хоризонт 755. Схемата ще е смукателно – флангова, като въздухът ще постъпва през източния вентилационен комин (ИВК), НШ „Запад“ и НШ „Бърдото“ до хор. 755, а от там по „Етажна галерия - 755“ до ЦВК, където ще бъде отведен на повърхността от главна вентилаторна уредба (ГВУ). Прокарването на етажните галерии на хоризонт 780 ще се извършва с местна вентилация с вентилатори 30 kW и 45 kW. Управлението на вентилаторите и количествата въздух се извършва посредством честотни регулатори, монтирани в контейнерите под тях и ограничители, поставени на вентилационните въздуховоди вентилаторна уредба (ГВУ). Прокарването на етажните галерии на хоризонт 780 ще се извършва с местна вентилация с вентилатори 30 kW и 45 kW. Управлението на вентилаторите и количествата въздух се извършва посредством честотни регулатори с цел управление и повишаване на тяхната ефективност. (Динчев З. 2017)



Фигура 6. Вентилационна схема за проветряване по време на Втори етап на строителство на рудника

4.6. Рудничен водоотлив

Генерираните води в рудника ще се събират в помпени камери изградени в дъното на наклонените шахти. В камерите ще бъдат монтирани главните водоотливни уредби (помпи), посредством които водите ще бъдат отвеждани до резервоар за управление на оборотни руднични води (РУОРВ) на повърхността. Той служи за утаяване на твърди частици, като след утаяването им водите отново се връщат в работния цикъл. В случай на необходимост е направена и тръбна разводка за ползване на вода от напорните резервоари за промишлена вода. При запълване на утаителната камера едрите неразтворени частици се изгребват и депонират на открит склад за руда. Резервоарът е земно-насипен тип, като се ползва депонираният скален материал от подобектите и материалът, който е добит на място, при подготовка на земната основа.



Фигура 7 Управление на водите

5. Преработка и обогатяване на рудата

На този етап не се извършва промишлена преработка на руда, тъй като не са изградени преработвателни мощности. През 2025 г. се предвижда:

- избор на доставчици за спомагателно технологично оборудване;
- доставка на основно и спомагателно оборудване към Обогатителен комплекс;
- продължава изготвянето на технически (и работен) проект за сгради и съоръжение към Обогатителен комплекс;
- изследване на приложимостта на сортировъчна машина за сортиране на рудата от находище „Милин камък“.

6. Взривни работи

Към настоящият етап на извършване на минни дейности взривните работи се извършват чрез използване на патронирани взривни вещества, а зареждането на взривните дупки е ръчно. Взривяването се извършва чрез използване на неелектрическа система на инициране. В бъдеще е предвидено зареждането на взривните дупки ще бъде в два варианта - ръчно (патронирано) и механизирано (емулсионно) в зависимост от използваното взривно вещество (ВВ). Всички ВВ са от II група по степен на опасност и са водоустойчиви. При използване на емулсионни взривни вещества (ЕВВ) от зарядна машина за боевик (донорен заряд) ще се използва патронирано ВВ, тротилова пресовка или бустер. Инициирането на зарядите ще се извършва с неелектрическа система детонатори „Exel“ LP, а свързването им - с „Exel“ В-конектори. Първоначален импулс ще се подава по вълновод от ел. детонатор тип ЕДСП със задействане на електро-взривната мрежа от взривна машинка (динамоексплозьор) или директно на магистралния вълновод с импулсна машинка за неелектрически системи (стартова машина) от безопасно разстояние. Относителният разход на ВВ варира от 1,82 kg/m^3 до 2,2 kg/m^3 за различните сечения по проходка и от 1,72 kg/m^3 до 1,82 kg/m^3 за проширенията за кръстовете.

7. Управление на скалния натиск

За изпълнение на дейностите по укрепване на минните изработки ще се използват пробивни машини за монтаж на анкерите и мрежи, торкретиращи машини за пръскане на торкрет бетон и минни бетоновози за доставка на сместа за торкретиране. Предвижда се изграждането на якостния модел на находището, който ще бъде част от геотехническия модел на находището. При прокарването на минните изработки, е предвидено да се използват пет размера сечения (22,5 m^2, 17,5 m^2, 15,0 m^2, 12,0 m^2 и 10,5 m^2), за които са изработени основни типове крепежи за различните инженерно-геоложки условия.

Заключение

Разработването на жилни находища на полезни изкопаеми е тежък, комплексен и предизвикателен процес. Това изисква сложен баланс между икономическата рентабилност, технологичната осъществимост, екологичните стандарти и социалната отговорност. Инвестирането в иновативни технологии и устойчиви практики може да помогне за преодоляване на някои от тези предизвикателства.

Литература

Динчев З. (2017). Контрол на системи за местно проветряване. *Годишник на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски" том 60, свитък II*. ISSN: 2535-1184).

Истатков, С. Подземно разработване на рудни находища.

Чонков, Т. Подземно минно строителство.

Назарчик, А.Ф, Рафиенко Д.Н, Мухин М.Е, Агошков М.И, Мамсуров М.А Системи на разработване на жилни находища.

Kostadinova N. (2020). Jet fans efficiency in tunnel emergency situations, Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials (https://seprm.com) Volume 1. pp. 47-52 ISSN 2738-7100 (print), ISSN 2738-7151(online).

Makedonska, D., M. Michaylov. (2019). Need for fixed fire fighting systems in road tunnels. University of mining and geology “St.Ivan Rilski”, Journal of mining and geological sciences, Volume 62, pp. 60-65, ISSN 1312-1820.

Nikolova, D., S. Dobrev, K. Ruskov. (2019). Mineralization in Ore Zone 1, Milin Kamak deposit, Western Srednogorie,Bulgaria. – Journal of Mining and Geological Sciences, 62, 1, 11–16. doi 10.52215/rev.bgs.2022.83.3.31.

Strahilov, D., Doichev, P., Dimitrov. I. (2022). Ore shoots formation in a sinistral strike-slip structural environmentinterpreted from the map of the Au-Ag Milin Kamak depositin the Breznic area, Southwest Bulgaria. - Rev. Bulg. Geol. Soc., 83, 3, 131-134. Doi 10.52215/rev.bgs.2022.83.3.131.

Vladkova Bl. (2019). Best Practices to Improve Construction Site Safety, in the specific conditions of processing plant building - 9th International Symposium on Occupational Health and Safety – SESAM 2019, October 3rd 2019, Petrosani, Romania. MATEC Web of Conferences 305, 00014, https://doi.org/10.1051/matecconf/202030500014.

Правилник за безопасността на труда при разработване на рудни и нерудни находища по подземен начин В-01-02-04.

Правилник по безопасност на труда при взривните работи.

Закон за подземните богатства.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A STAND FOR SPRINKLER NOZZLE TESTING

Diana Makedonska, Blagovesta Vladkova, Nadezhda Kostadinova, Zahari Dinchev, Borislav Valev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia
E-mail: diana.makedonska@mgu.bg, blagovesta.vladkova@mgu.bg, nadezhda.kostadinova@mgu.bg, dinchev@mgu.bg

ABSTRACT: Fires pose a serious threat to both human life and material assets, which is why the development of highly effective systems for their prevention and control is of paramount importance. As a result, there is a need to equip buildings and facilities with automatic fire protection systems for early detection and extinguishing of fire outbreaks, in particular with automatic firefighting systems (AFFS) using water or other firefighting agents (FFA). Sprinkler installations can completely extinguish an emerging fire or localise it, i.e. hold back the spread of fire until the arrival of operational units. In connection with the growing importance of fire safety, the design and construction of a test stand for sprinkler nozzles for extinguishing fires is essential to ensure the reliability and effectiveness of fire protection systems. These systems are crucial in protecting buildings and infrastructure from the destructive effects of fires by automatically triggering water jets upon detection of a fire or high temperature.

Key words: fire safety, sprinkler nozzles, firefighting.

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗГРАЖДАНЕ НА СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОТИВОПОЖАРНИ ДЮЗИ

Диана Македонска, Благовеста Владкова, Надежда Костадинова, Захари Динчев, Борислав Вълев
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ: Пожарите представляват сериозна заплаха както за човешкия живот, така и за материалните активи, поради което разработването на високоефективни системи за тяхното предотвратяване и контрол е от първостепенно значение. Вследствие на това възниква необходимостта от оборудване на сградите и съоръженията с автоматични системи за противопожарна защита, за ранно откриване и погасяване на възникнали огнища на горене, в частност с автоматични системи за пожарогасене (АСПГ), използващи вода или други огнегасителни вещества (ОГВ). Спринклерните инсталации могат напълно да погасят възникнал пожар или да го локализират, т.е. да задържат разпространението на огъня до пристигането на оперативните подразделения. Във връзка с нарастващото значение на противопожарната безопасност, проектирането и изграждането на стенд за изпитване на спринклерни дюзи за гасене на пожари е от съществено значение за осигуряване на надеждността и ефективността на противопожарните системи. Тези системи играят решаваща роля в защитата на сгради и инфраструктура от разрушителните последици на пожара, като автоматично задействат водни струи при откриване на огън или висока температура.

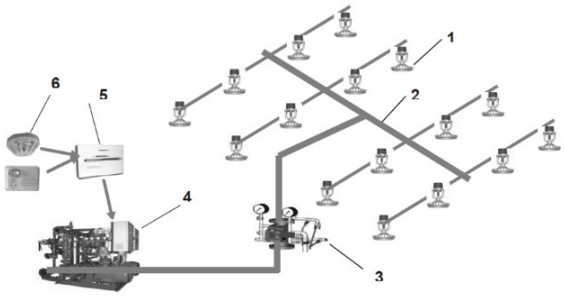
Ключови думи: пожарна безопасност, спринклерни дюзи, гасене на пожари.

Въведение

Под стационарна пожарогасителна инсталация (СПГИ) се разбира стационарна система, състояща се от определен запас пожарогасително вещество, свързана към една или повече стационарни дюзи, през които веществото се подава ръчно или автоматично, за гасене на огън.

Инсталациите за пожарогасене, като едно от техническите средства за пожарна защита, се използват в тези случаи, когато пожарите още в началния си стадий могат да получат интензивно развитие и да предизвикат взрив, разрушаване на конструкции, да нарушат нормалния режим на работа на отговорни системи на защитавания обект, да причинят големи материални загуби (Крилчев Ал., 2022).

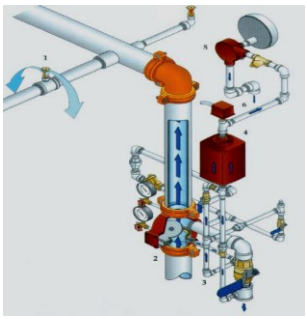
Една спринклерна система се състои от захранване с вода (водопровод или резервоар и помпена група) и една или повече спринклерни инсталации. Всяка спринклерна инсталация се състои от контролно-сигнален клапан и ред от тръби снабдени със спринклерни глави. Спринклерите се монтират на определени места под покрива или тавана и, когато се изисква, между стелажи, под лавици и др. места. Захранването с вода може да бъде активирано, т.е. системата приведена в действие за гасене на пожар или след отваряне на спринклер, разположен над огнището на пожара, или след сигнал от блока за управление, вследствие на задействан автоматичен или ръчен пожароизвестител.



Фиг. 1. Спринклерна система за пожарогасене 1-спринклер; 2-разпределителна тръба; 3-КСК; 4-помпена група; 5-блок за управление; 6-пожароизвестители

Спринклерните инсталации биват три вида: водни, въздушни и въздушно-водни. Водозапълнената система (фиг. 2) е най-разпространената система за спринклерно пожарогасене. При водните системи цялата тръбопроводната мрежа е винаги запълнена с вода. Тази система за пожарогасене се използва за обезпечаване на пожарната безопасност на складове, офиси и промишлени сгради, в които е изключена опасността от замръзване на водозапълнените тръбопроводи (Христова Т., 2011). При повишаване на температурата в защитаваното помещение, течността в стъклената термочувствителна ампула на спринклера (1) се разширява. Когато температурата достигне стойността на сработване, ампулата се разрушава, освобождавайки затварящата клапа на изходното отверстие на спринклера. Изтичащата вода повдига клапата (2) на контролно-сигналния клапан и

потича през тръбопровода (3) към забавящата камера (4). Когато тази камера се запълни, водата постъпва към водния гонг (5) и/или реле за налягане (6), което привежда в действие електрически сигнален звънец. За да се предотвратят лъжливи сигнали за тревога от промяна на налягането на водата, се използва забавяща камера, която има за цел да компенсира неголемия обем вода, протичащ през контролно-сигналния клапан при колебание на налягането.



Фиг. 2. Водна спринклерна система

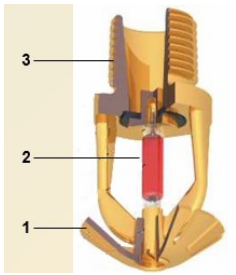


Фиг. 3. Въздушно - водна спринклерна система

В неотоплявани помещения се използват „въздушно-водни" системи (фиг.3). В показаната система се използва водо-въздушен контролно-сигнален клапан (2), който е предназначен да разделя запълнените с вода тръбопроводи от въздушната спринклерна система. Дискът на клапана служи за разделяне на двете среди: въздушната и водната. Когато въздушното налягане във въздушната система на тръбопроводите се понижи и се създаде разлика в наляганията, клапанът се отваря и водата запълва цялата спринклерна система. Клапанът може да функционира с водосигнален гонг и/или реле за налягане (4). За намаляване времето на сработване на клапана се използва допълнително устройство – акселератор (3).

Видове спринклери

За повишаване на ефективността и увеличаване степента на автоматизиране на процеса за откриване и гасене на пожарите са разработени огромно количество устройства и приспособления, направени са множество изобретения, но най-значителното събитие, позволило създаването на напълно автоматизирана система за пожарогасене, става изобретяването на спринклерния оросител. От тогава са минали повече от сто години. Под влияние на новите, по-завишени изисквания към пожарната безопасност, автоматичните спринклерни инсталации непрекъснато се усъвършенстват (Йорданов и др., 1998). За обезпечаване на надеждността и ефективността на работа в системите се въвеждат резервни помпи, изграждат се автоматични водоизточници и обратни клапани, усъвършенстват се изпълнителните механизми и възлите за управление, включват се допълнителни датчици и сигнализатори за протичащите огнегасителни вещества, наличие на необходимото налягане и т.н. Въпреки това, спринклерът на пръв поглед остава практически непроменен (фиг. 4.). Той, както и преди, се състои от термочувствително затварящо устройство, разрушаващо се под действието на температурата, корпус и розетка (дефлектор), разпределящ водата по защитаваната площ (Чочев, 2013).



Фиг.4. Общ вид на спринклер
1-дефлектор; 2. –термочувствителен елемент; 3- корпус

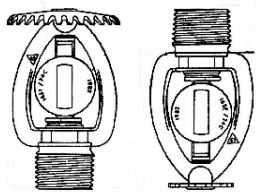
Спринклерите се явяват твърде важен елемент на спринклерните инсталации, тъй като ефектът от гасенето на пожара непосредствено зависи от това доколко своевременно ще се отворят и ще бъде ли подадено онова количество вода, което е необходимо за гасене на пожара (Чочев, 2013).

Спринклерите, въпреки голямото си разнообразие, имат и много сходства помежду си. Това позволява да бъде направена класификация на спринклерите по следните признаци:

- в зависимост от устройството за автоматично задействане;
- в зависимост от пространствената си ориентация;
- в зависимост от номиналната температура на задействане;
- в зависимост от времето за реакция, в зависимост от формата на подаваната струя гасително вещество;
- в зависимост от диаметъра на отвора.

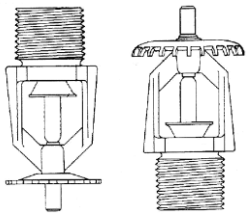
В зависимост от устройството за автоматично задействане се подразделят на:

- спринклер със стопяем елемент - спринклер, който се отваря след стопяване на предвидения за целта елемент (фиг. 5);



Фиг. 5. Спринклер със стопяем елемент

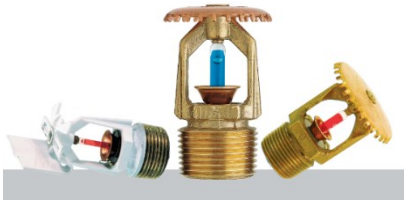
- спринклер със стъклена ампула - спринклер, който се отваря след разрушаване на ампула, пълна с течност (фиг. 6).



Фиг. 6. Спринклер със стъклена ампула

В зависимост от пространствената си ориентация (фиг. 7) те са:

- стоящ (изправен) спринклер - спринклер, при който дюзата насочва водата отдолу нагоре;
- висящ спринклер - спринклер, при който дюзата насочва водата отгоре надолу;
- хоризонтален спринклер- спринклер, при който дюзата насочва водата хоризонтално.



Фиг. 7. Видове спринклери в зависимост от пространствената им ориентация: а) стоящ б) висящ в) хоризонтален

Спринклерите със стъклена ампула и спринклерите със стопяем елемент, в зависимост от номиналната температура на задействане, трябва да бъдат с цветен код, както е посочено в таблица 1 (Чочев, 2013).

В зависимост от инерционността си на действие:

- с нормална реакция;
- бързодействащи;
- свръхчувствителни;

В зависимост от формата на подаваната струя:

- конвенционални (обикновени) спринклери - имат сферично разпръскване на водата, насочено към пода и тавана над определената защитавана зона и освобождават от 40 до 60% от целия воден поток в посока надолу;
- спринклери със средно разпръскване - имат параболично разпръскване на водата и освобождават от 80 до 100% от целия воден поток в посока надолу;
- спринклери с плоско разпръскване – имат плоско параболично разпръскване на водата, насочено към пода, подобен на спринклера за средно разпръскване, но при който част от разпръсната вода е насочена над нивото на дефлектора.

Таблица.1. *Номинална температура на задействане и цветен код на спринклери*

Спринклери със стъклена ампула		Спринклери със стопяем елемент	
Номинална температура на задействане, °C	Цветен код за течността	Номинална температура на задействане в обхвата, °C	Цветен код за конзолата
57	оранжев	57 до 77	безцветен
68	червен	80 до 107	бял
79	жълт	121 до 149	син
93	зелен	163 до 191	червен
100	зелен	204 до 246	зелен
121	син	260 до 302	оранжев
141	син	320 до 343	черен
163,182	бледо лилав	-	-
204,227,260,286,343	черен	-	-

В зависимост от диаметъра на отвора на изтичане на струята:

- спринклери с диаметър 10 mm;
- спринклери с диаметър 15 mm;
- спринклери с диаметър 20 mm.

Номиналният диаметър на отвора на спринклерите и съответния размер на резбата на спринклерите, с изключение на сухи и струйни спринклери, трябва да са подходящи за използване с тръби с резби посочени в таблица 2 (Чочев, 2013). Сухите и струйните спринклери могат да имат резба с по-големи размери.

Таблица 2. *Номинален диаметър на отвора и размер на резбата*

Номинален диаметър на отвора [mm]	Номинален размер на тръбната резба [inch]
10	3/8
15 и 20	½
20	¾

Основните изисквания, които спринклерите трябва да удовлетворяват са следните:

- Устройството за автоматично отваряне на спринклерите да се отваря при определена температура с възможно най-малка инерционност;
- Спринклерите трябва да осъществяват оросяване с вода на защитаваната площ на помещението с възможно най-голяма равномерност и с необходимата интензивност за гасене. Имайки предвид, че със спринклери могат да се защитават и помещения с горими или трудногорими покривни покрития, част от водата трябва да оросява повърхността, разположена над спринклерите;
- Спринклерите да бъдат с проста конструкция и сигурни при продължителна експлоатация (Чочев, 2013).

От извършения кратък преглед на основните елементи на спринклерните инсталации се вижда, че ключовият елемент на цялата система за пожарогасене е спринклерът. Независимо че видът на водоизточника, изправността на контролно-сигналните клапани и качеството на използваните тръбопроводи имат определено значение за изправността на спринклерната инсталация, основна роля за успешния изход от ликвидиране на възникнал пожар в защитавания обект има спринклерната глава.

Методология

Проектиране на стенд

При проектиране на стенда са взети под внимание изискванията на Наредба № Із-1971 от 29.10.2009 г. за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар и стандарт БДС EN 12845:2004+A2 Стационарни пожарогасителни инсталации. Автоматични спринклерни инсталации. Проектиране, монтиране и поддържане.

Този стандарт определя изисквания и дава препоръки за проектирането, инсталирането и поддържането на стационарни спринклерни инсталации в сгради и промишлени предприятия, както и специфични изисквания за спринклерни инсталации, които са съществена част от мерките за защита на човешкия живот. Изискванията и препоръките на този стандарт са валидни също и за всяко допълнение, разширение, ремонт или друга промяна в една спринклерна инсталация.

Стандартът съдържа класификацията на опасностите, осигуряването на водоснабдяване, използваните съставни

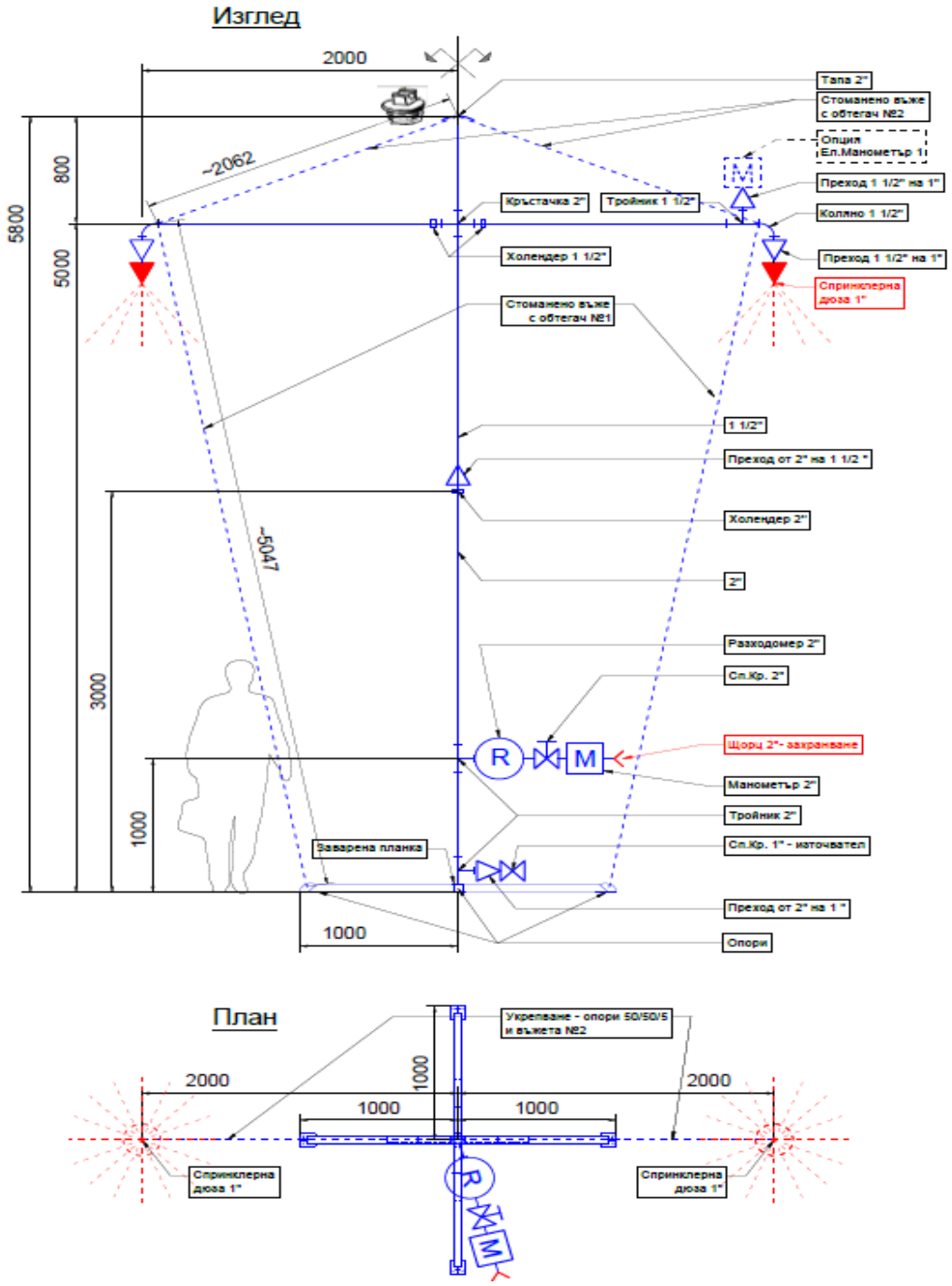
части, инсталирането и изпитването на инсталациите, поддържането и разширяването на съществуващите инсталации. Той определя конструктивните елементи на сградите, които са минимално необходими за задоволителната работа на спринклерните инсталации, съответстващи на този стандарт.

Поддържането и обслужването на стационарните пожарогасителни инсталации се осъществява в съответствие с Наредба № 8121з-531 от 2014 г.

Процесът на проектиране на стенд за изпитване на пожарогасителни дюзи преминава през няколко съществени етапа, които трябва да бъдат внимателно анализирани::

- Задълбочено запознаване с действащите стандарти и нормативни изисквания;
- Дефиниране на геометричните характеристики в съответствие със специфичните изисквания на приложението;
- Определяне на основните параметри за тестване, включително дебит, налягане, интензивност и температура.

След приключване на анализа бе извършено проектиране на изпитвателния стенд, представен на фиг. 8.



Фиг. 8. Стенд за изследване разпределението на интензивността на покритие на водна струя от спринклерни дюзи

Изграждане на стенд за изпитване на пожарогасителни дюзи

Експерименталният стенд е изграден на територията на Лабораторния блок на Минно-геоложкия университет и представлява тръбна конструкция, монтирана върху стойка и допълнително стабилизирана с метални въжета (фиг. 10). Височината му е 5,00 m, което осигурява надеждно укрепване на перилата, предназначени за монтаж на изпитваните дюзи. Тази височина е избрана с оглед на изследването на характеристиките на пожарогасителните дюзи, използвани в пътни тунели.

Конструкцията е модулна, като позволява намаляване на височината до 3,00 m, за да се провеждат изпитвания и в други среди, като подземни гаражи, минни съоръжения и др. Разстоянието между дюзите е 3 m, в съответствие със стандартите, заложени в БДС EN 12845:2015+A1:2020, свързани с автоматичните спринклерни инсталации и спецификата на пожарната безопасност в тунели и подземни обекти.

За изграждането на стенда са използвани поцинковани тръби с размери 2“, 1,5“ и 1“, както и различни фитинги – тройници, муфи, колена, холендери и др.

Процесът на конструиране започна с избора на подходящи профили за стойката (фиг. 9а), които да осигурят мобилност на стенда. За целта бяха подбрани квадратни профили с дебелина 5 mm. От тях бяха нарязани четири секции с дължина 1 m, които впоследствие бяха заварени във форма на кръст чрез заваръчен апарат, осигурявайки необходимата здравина на конструкцията.



а) стойка за стенда



б) направа на резби

Фиг. 9. Етапи при конструиране и изграждане на стенда

Основната конструкция на стенда се състои от поцинкована тръба с диаметър 2“ и височина 3 m. В двата края на тръбата са нарязани резби (фиг. 9), които осигуряват свързването ѝ с останалите елементи на стенда.

Долната резба позволява закрепването на тръбата към стойката, докато горната служи за присъединяване на холендер, чрез който се осъществява преход към тръба с диаметър 1½“. В горната част на конструкцията е монтирана кръстачка (фиг. 10а), която позволява свързването на две хоризонтални тръби с дължина 1,5 m и диаметър 1½“. Тези тръби, посредством колена и преходници, осигуряват монтажните точки за изпитваните дюзи.

За допълнителна стабилност на стенда, върху кръстачката е монтирана тръба с дължина 0,80 m, а цялата конструкция е укрепена със стоманени въжета, които гарантират нейната устойчивост по време на експериментите. (фиг.10).

а) издигане на конструкцията



б) общ вид на стенда

Фиг. 10. Етапи при конструиране и изграждане на стенда

В основната тръба на изпитвателния стенд се пробива отвор, към който се заварява съединител тип „Щорц“. Към този съединител се монтират разходомер, спирателен кран и манометър (фиг. 11).

Тези уреди играят ключова роля в работата на стенда, тъй като осигуряват:

- Контролирано подаване и спиране на водата чрез спирателния кран;
- Измерване на дебита с помощта на разходомера (фиг.11 а);
- Проследяване на работното налягане в системата чрез манометъра. (фиг.11 б);

Така се гарантира прецизен мониторинг и регулиране на параметрите по време на изпитванията..




а) разходомер **б) манометър**

Фиг. 11. Контролни уреди

Работното налягане е предвидено да се осигурява от противопожарен кран (БДС EN 671-1:2002).

Избор на спринклерни дюзи за изследване

Спринклерните системи, както и всяко друго оборудване, от което зависи безопасността на хората, трябва да отговарят на строги изисквания (Hrischev L., Stoyanov A., 2024). Тези изисквания са заложени в съответните национални и международни стандарти, регулиращи проектирането и изграждането на спринклерни инсталации в обекти, включително тунели (NFPA 502:2023).

Една от ключовите характеристики на спринклерите е равномерното разпределение на водата върху защитаваната площ. Това разпределение трябва да бъде гарантирано дори в най-неблагоприятните за оросяване зони, включително под така наречения „диктуващ“ спринклер – този, който е разположен в най-неблагоприятната хидравлична точка и където налягането е минимално поради загуби в системата.

При този сценарий, от решаващо значение е дали конкретният спринклер може да осигури необходимата интензивност на водно покритие върху цялата защитавана зона. Това трябва да бъде изпълнено както при самостоятелна работа на отделен спринклер, така и при едновременно функциониране на два съседни спринклера, което е критично за ефективността на системата.

В България се приемат европейските стандарти, свързани със проектирането и изграждането на спринклерните инсталации. Нормативният документ, който регламентира за кои обекти се изисква изграждането на спринклерни инсталации, към настоящият момент, е Наредба Із -1971 „За строително - техническите правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар“, чл. 3, ал. 1, приложение № 1.

Стандартът БДС EN 12259-1 определя изискванията към производството и характеристиките на спринклерите, както и методите за изпитване и препоръчителните процедури за типовите изпитвания с цел съответствие.

Компанията TYCO FIRE & BUILDING PRODUCTS, САЩ прилага допълнителни методи за изпитване на определени характеристики на спринклерите, сред които:

- Метод на „профил на струята“;
- Метод на „напречната секция“;
- Метод на „мократа стена“.

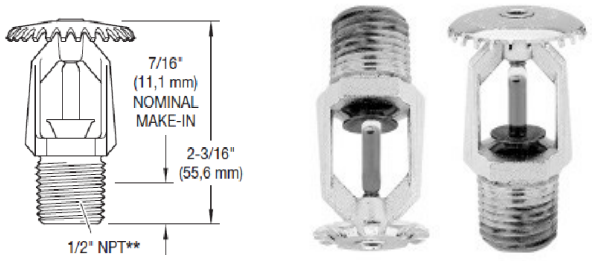
Изпитанията по метода на „профил на струята“ предоставят информация за вида на водната струя и радиуса на разпръскване, като са най-подходящи за спринклери със стандартно разпределение на водата. Въпреки това, този метод не дава пълна представа за равномерността на разпределение във всички посоки и влиянието на пространствената ориентация и конструкцията на спринклера.

Методът на „напречната секция“ позволява да се определи реалният контур на покритие на водната струя, като основно се прилага при стенни хоризонтални спринклери.

При метода на „мократа стена“ изследваният спринклер се монтира в затворени помещения с различни размери и площи. Според (Чочев, 2013), този метод е най-ефективен за визуализиране на струята при стенни спринклери с разширено покритие и висящи спринклери.

Анализът на данните от водещи компании в сферата на проектирането и изграждането на спринклерни инсталации показа, че над 85% от обектите са оборудвани със спринклери със средно разпръскване на водата.

Поради тази причина за оборудването на изпитвателния стенд бе избран спринклер TYCO Series с К-фактор 8 и температура на задействане 68˚С (фиг. 12).



Фиг. 12. Спринклерна дюза серия TY3151

Серията спринклерни дюзи TYCO са проектирани както за стандартни, така и за обекти с повишен риск, включително подземни съоръжения. Те разполагат с устойчиво на корозия покритие, което ги прави подходящи за дългосрочна експлоатация в предизвикателни среди.

Конструкцията на спринклера е изработена от мед/месинг, а активиращата ампула – от стъкло. Вътре в стъклената колба се намира специална течност, която се разширява при повишаване на температурата. Когато температурата достигне предварително зададената стойност, течността се разширява достатъчно, за да предизвика разрушаване на стъклената колба, което води до активиране на спринклера и освобождаване на водната струя.

Резултати и анализ

Пожарите в минно-добивната промишленост оказват сериозно въздействие върху процесите на изземване и преработка на минерални суровини, включително върху комплексната механизация в подземните изработки и откритите рудници и кариери. Отрицателните последствия от пожари или експлозии в тези обекти често водят до значителни материални щети, обхващащи производствено оборудване, сгради и съоръжения. (Александрова, Евг. и др. 2015).

Така проектираният и изграден стенд за изпитване на пожарогасителни дюзи отговаря на действащата

нормативна база и стандарти. Той е подходящ за изпитване на различни комбинации дюзи и водно налягане от различни източници и конструкцията му е близка с размерите в реални условия. Това ще позволи провеждане на редица експерименти, които ще покажат поведението на водната струя в случай на пожар, като резултатите са приложими за практиката. Резултатите от изпитване на дюзи и моделите ще бъдат представени в следваща публикация.

Заключение

Стационарните пожарогасителни системи играят ключова роля в контролирането на пожарите в началната фаза на разгаряне, като предотвратяват линейното им разпространение в обекта (Hansen, 2010).

Инсталирането на подобен тип системи в различни подземни обекти подпомага действията на противопожарните и минно-спасителните служби и ускорява достъпа до местопроизшествието. Времето до пристигане на спасителните екипи и започване на гасителните действия зависи от местоположението на пожара, достъпа на противопожарния автомобил и условията на терена. Познаването на реалната обстановка позволява избор на подходяща тактика за действие. Затова прилагането на стационарни пожарогасителни системи има положителен ефект върху цялостния процес на пожарогасене.

Изграждането на стенд за изпитване на пожарогасителни дюзи е важна стъпка за подобряване на безопасността и ефективността на противопожарните системи. Тези системи са от решаващо значение за защитата на сгради и инфраструктура от разрушителните последици на пожарите, като автоматично задействат водни струи при откриване на огън или висока температура. Чрез детайлно и прецизно тестване на спринклерните системи се гарантира тяхната правилна работа и максимална защита в случай на пожар.

Благодарности: *Авторите изразяват своята благодарност към Минно-Геоложки Университет „Св. Иван Рилски“ за финансирането по проект МТФ-193/2024. Изказваме благодарност на колегите за оказаната помощ при изграждането на стенда и провеждането на експериментите.*

Литература

Александрова, Е., И. Копрев, И. Джобов, Т. Петков. (2015). Нови технологии и тенденции в открития добив при разработване на тънки слабопродуктивни въглищни пластове, *Сборник на Национална научно-техническа конференция „Минералните ресурси и устойчивото развитие“*, стр. 124-129, ISBN: 978-954--92738-0-9.

Йорданов, Св., П. Клисарски, М. Ненов. (1998). Тенденции в развитието на спринклерните пожарогасителни инсталации. *Сборник с доклади от Научна сесия ВВИСУ'98 - Книжка 2,* стр. 585-588.

Крилчев, Ал. (2022). Нови решения за осигуряване на индивидуален темературен комфорт в условията на прегряващ микроклимат при подземния добив на полезни изкопаеми, *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Том 65*.

Македонска, Д. (2021). *Изследвания върху ефективността на стационарни пожарогасителни инсталации в пътни тунели*, дисертация, МГУ, София.

Христова, Т. (2021). Защита на тръбопроводи от корозия, *Минно дело и геология,* бр. 1-2, стр. 60-63, ISSN 0861-5713.

Чочев, В. (2013). *Изследване на интензивността на гасене на спринклерни оросители*. дисертация, АМВР, София.

Hansen, R. (2010). *Design fires in underground mines*, Studies in Sustainable Technology 2010:02 Mälardalen University

Hrischev, L., Stoyanov, A. (2024). Requirements for health and safety during assembly, exploitation and disassembly of scaffolds in Bulgaria, *XIII International Scientific Conference „Civil Engineering Design and Construction*, Varna, Bulgaria, ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD) pp. 241-253.

БДС EN 12259-1:1999 +A1:2001/A3:2006 Стационарни пожарогасителни инсталации. Съставни части на спринклери и инсталации за разпръскване на вода. Част 1: Спринклери

БДС EN 12845:2015+A1:2020. Стационарни пожаро-гасителни инсталации. Автоматични спринклерни инсталации. Проектиране, монтиране и поддържане.

БДС EN 671-1:2002 Стационарни противопожарни инсталации. Инсталации с маркуч. Част 1: Макари с полутвърд маркуч.

Наредба № 8121з-531 от 9 септември 2014 г. за реда и условията за осъществяване на дейности по осигуряване на пожарна безопасност на обекти и/или поддържане и обслужване на уреди, системи и съоръжения, свързани с пожарната безопасност, от търговци и контрола върху тях (Издадена от Министерството на вътрешните работи. Обн. ДВ. бр.78 от 19 Септември 2014г.).

Наредба № Із-1971 от 29.10.2009 г. за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар (В сила от 05.06.2010 г. Издадена от МВР и МРРБ. Обн. ДВ. бр.96 от 4 Декември 2009г.).

Техническа характеристика на дюзите/Каталог на дюзи - www.tyko-fire.com

NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2023 Edition.

TOXIC REAGENTS REDUCING IN GOLD AND SILVER ANALYSES

Nikolay Nestorov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, e-mail: n.nestorov@mgu.bg

ABSTRACT. The phase analysis of gold and silver is very important for the industrial mining of gold and silver because it establishes the forms of presence of gold and silver and their distributions in the ore and then the most suitable and effective method for their enrichment is chosen. When conducting the analysis of the phase distribution of gold and silver, some toxic and expensive reagents and chemicals are used. By making general changes to the methodology for conducting the study of the phase distribution of gold and silver, significant results have been achieved in terms of reducing the mercury used by over 80%. A significant increase in the quality of chemical analyses has been achieved by eliminating factors dependent on the operator's experience that affect the study. A significant reduction in the financial costs of conducting the study of the phase distribution of gold and silver by over 70% has been achieved.

Key words: gold, silver, phase distribution, mercury.

НАМАЛЯВАНЕ КОЛИЧЕСТВОТО НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ ТОКСИЧНИ РЕАГЕНТИ ПРИ АНАЛИЗИ НА ЗЛАТО И СРЕБРО

Николай Несторов

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

РЕЗЮМЕ. Фазовият анализ на злато и сребро има много важно значение за промишления добив на злато и сребро, тъй като с него се установяват формите на присъствие на злато и сребро и техните разпределения в рудата, след което се избира най-подходящият и ефективен метод за обогатяването им. При провеждането на анализа по изучаване на фазовото разпределение на злато и сребро се използват някои токсични и скъпи реагенти и химикали. Чрез направени промени в методиката за извършване на изследването на фазовото разпределение на злато и сребро са постигнати значителни резултати по отношение намаляването на използвания живак с над 80%. Постигнато е съществено повишаване на качеството на химичните анализи, чрез премахване на фактори, зависещи от опитността на оператора, влияещи на изследването. Постигнато е значително намаляване на разходите за провеждане на изследването на фазовото разпределение на злато и сребро с над 70%.

Ключови думи: злато, сребро, фазово разпределение, живак.

Въведение

Златото е било познато и използвано от човека от древни времена. Българските земи имат дългогодишни традиции в добива и обработката на злато, които датират от древността (Tomova, 2023). На територията на нашата страна е открито най-старото в света обработено злато, датирано към периода на късната каменно-медна епоха (около 4500 г. пр. н. е) във Варненския халколитен некропол.

Златото е благороден метал с ниска твърдост, пластично и ковко, притежава устойчивост на окисление и корозия, много добра топло- и електропроводимост, високи температури на топене и кипене. Освен традиционната употреба за ювелирни и декоративни изделия, златото има важни съвременни приложения в електрониката, медицината, химическата промишленост, нанотехнологиите, космонавтиката и др. В платките на електронните устройства като мобилни телефони, смартфони, лаптопи, компютри, телевизори, GPS устройства и др. се съдържа злато. Злато се използва и при производството на транзистори, индикатори и диоди, в сензори и температурни датчици. В медицината златото се прилага за подобряване качеството на медицинските инструменти и в състава на различни импланти. В химическата промишленост се включва в състава на катализатори. Златото има слънцезащитни свойства и намира приложение в космонавтиката за предпазване на космонавтите от слънчевата радиация.

Търсенето и проучването на златоносни находища е предизвикателство за съвременната минно-добивна промишленост. В този процес предварителните проучвания играят съществена роля при избора на икономически подход и стратегия за развитието на минно-добивните работи (Александрова, 2007). Данните, събрани чрез сондажи, директни измервания или електросъпротивителна томография, значително допринасят за ефективността на производствения процес (Grigorova, 2020).

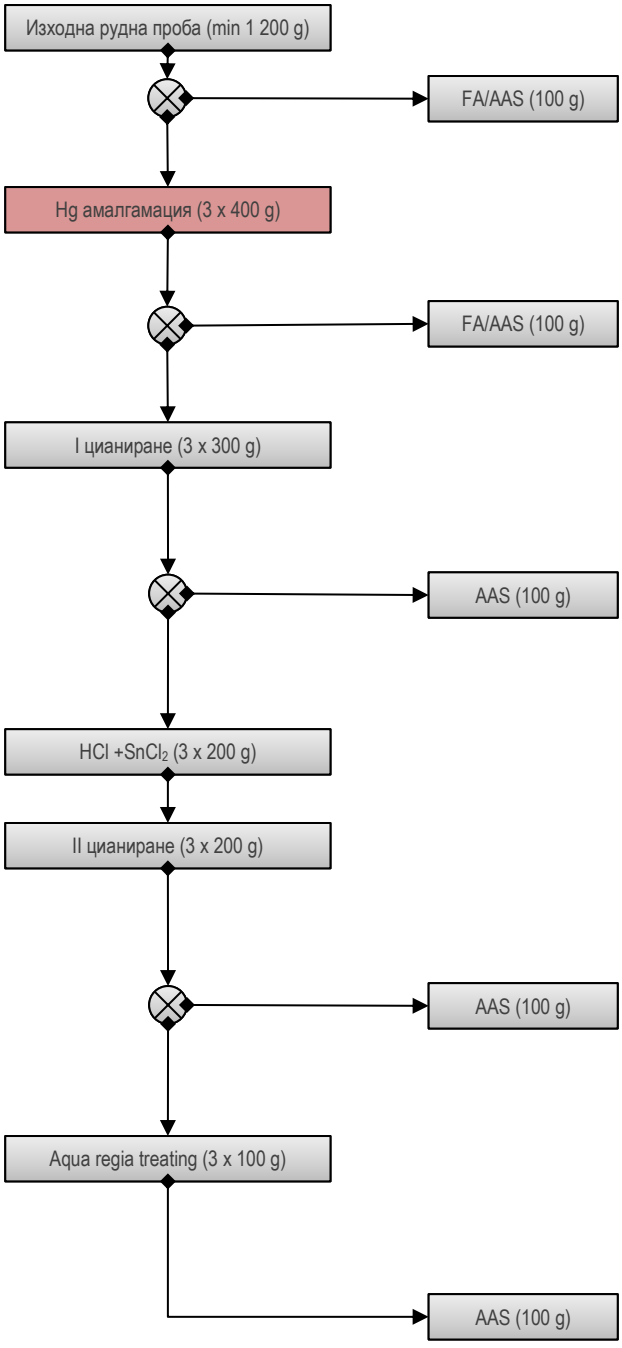
Промишлените минерали в златните находища са представени предимно от самородно злато (Au), електрум (Au, Ag) и по-рядко от златни телуриди и др. минерални фази. Най-често златото асоциира със сулфиди като пирит, арсенопирит, халкопирит, стибнит и др. В минно-добивната промишленост обикновено се използват няколко основни метода за обогатяване на златните руди като гравитационно и флотационно обогатяване и цианиране или комбинация от тези методи (Gul et al., 2012). В зависимост от съдържането на злато и минераложката характеристика на рудата се определя и методът за нейното обогатяване.

Фазовият анализ има много важно значение за промишления добив на златото, тъй като с него се установяват формите на присъствие на златото и неговото разпределение в рудата, след което се избира най-подходящият и ефективен метод за обогатяване. Методиката за провеждане на фазовия анализ на злато, възприета в страната ни, включва пет последователни стадии, с използването на различни реагенти и химикали. При провеждането на фазовия анализ се получава живачна амалгама като отпадъчен продукт и, тъй като тя представлява токсичен, опасен отпадък, за нейното съхранение и депониране са необходими специални условия.

В настоящата работа се разглеждат въведените значителни промени във фазовия анализ на злато, с цел намаляване количеството на използвания живак при провеждане на анализа, редуциране на получаваните опасен отпадък и повишаване точността на резултатите от анализа.

Материал и методика

Фазовият анализ на злато се извършва в пет последователни стадия, при които се определя разпределението на златото като свободно, цианируемо, в оксидна обвивка (в Fe оксиди, Fe хидроксиди и силикати), в сулфиди и финодисперсно. (Фиг. 1).



Фиг. 1. Схема на провеждане на фазов анализ на злато

Съгласно възприетата работна процедура се извършват три паралелни анализи, сравняват се получените резултати и като краен резултат се приема осреднената стойност. Изходната рудна проба е с допустимо минимално тегло 400 g. За провеждане на фазовия анализ се използват следните реагенти и химикали: H_2O_2, Hg, NaCN, KCN, HCl, HNO_3, $SnCl_2$ и NaOH.

Най-напред чрез живачно амалгамиране се определя делът на разпределението на златото като свободно, – съответстващо на приложената степен на смилане на пробата (Фиг. 1). Към всяка от трите рудни проби се добавя значително количество живак (40 g) и след агитационно разбъркване на пробата се отделя живачната амалгама, която освен злато, съдържа също сребро и други метали. Отстраняването на живачната амалгама се извършва посредством ръчно промиване с вода.

Доминиращото присъствие на свободно злато в рудата, или в междинните флотационни продукти, предопределя прилагането на гравитационни методи за неговото извличане като основни или съпътстващи обогатителни процеси. Гравитационното обогатяване се основава на високото относително тегло на самородното злато – 16 – 19.3 g/cm^3. В древността това е бил най-използваният метод за добиване на злато главно от алувиални находища (разсипно злато) или от много богати руди, като се използва голямата разлика в относителното тегло на златото и останалите нерудни и рудни фази (Surimbayev et al., 2024). Гравитационното обогатяване се прилага за едрозърнесто злато, свободни частици с достатъчно големи размери. Изследванията, проведени от някои автори показват, че ефективността на гравитационното обогатяване е в пряка зависимост от размера на минералните частици, като първоначално нараства с увеличаване едрината на частиците, достига определен максимум и след това започва да намалява, паралелно с увеличаването на размера им (Izederm, Ergun, 2024). Гравитационното обогатяване има редица предимства като висока ефективност, постигане на висока степен на извличане на златото в получения концентрат, по-малък риск от неблагоприятно въздействие върху околната среда, ниски капиталови и експлоатационни разходи, но е приложимо за свободно злато с размери на частиците над 10 μm (Surimbayev et al., 2024). При наличие в рудата или флотационните продукти на свободни частици злато с големина над 125 μm, ефективността на процеса намалява, което води до значителни загуби на злато. Много често тези загуби не могат да бъдат отчетени от химичните анализи при водене на технологичния баланс.

Златото, определено като цианируемо, е неосвободено и се намира под формата на срастъци и включения сред други рудни минерали или в основна маса от вместващите скали. Това злато може също да бъде освободено при по-голяма степен на смилане и да бъде извлечено чрез гравитационни методи. В практиката този тип злато се извлича чрез цианидно излужване или флотация, ако асоциира със сулфидни минерали. Ако то присъства в тази форма, но асоциира със сулфидни минерали като пирит например, който е бил подложен на депресия при медната флотация, трябва да се направи анализ и оценка дали икономически е изгоден добивът на пиритен концентрат със завишено съдържание на злато. В продължение на над 100 години цианирането е широко използвано при обогатяването на златосъдържащи руди (Oraby et al., 2020). Този метод е евтин и много ефективен, като позволява постигането на високи технологични показатели. Основен недостатък е високата токсичност на използваните реагенти, с потенциално вредно въздействие върху околната среда и създаване на екологични проблеми (Gökelma et al., 2016). Поради тази причина през последните десетина години се извършват интензивни изследвания за

заместване на цианидите с по-малко агресивни и токсични реагенти, като засега в промишлени условия е внедрено приложението на калциев тиосулфат.

В следващия цикъл от фазовия анализ се определя злато в оксидна обвивка, съставена предимно от железни оксиди, железни хидроксиди и силикати. Тази част не се поддава на цианиране, слабо флотира, но ако е освободена при смилането, златото може да бъде извлечено чрез гравитационни методи. Тази фаза се определя след като пробата се обработи със солна киселина (HCl) и калаен двухлорид ($SnCl_2$) за разтваряне на оксидната ципа върху повърхността на златото и среброто и след това се подложи на цианиране.

В последния стадий на анализа рудната проба се третира с царска вода ($HC:HNO_3$ = 3:1), за разтваряне на тази част от присъстващото злато, която асоциира със сулфидните минерали или е включена в кристалната им решетка и се определя като част свързана в сулфиди. Това злато може да бъде извлечено чрез флотация.

Тази част от златото, която остава неразтворена в пробата се определя като финодисперсно, трудно обогатимо злато, присъства сред кварц и остава в отпадъка от обогатителния процес, като формира загубите при неговото извличане.

В някои страни, когато е икономически оправдано, финодисперсното злато, присъстващо под формата на много фини включения сред пирит и арсенопирит (refractory gold) или включено в кристалната решетка на същите минерали (“Invisible gold”) се извлича с прилагането на допълнителна обработка като нагряване и окисление под високо налягане в автоклави, с последваща флотация (Benzaazoua et al., 2007; Chen et al., 2018).

След всяка процедура при провеждането на фазовия анализ пробите се подготвят, дублират и анализират. Съдържанието на злато в изходните проби и пробите след амалгамация се определят чрез пробирен анализ (Fire Assay, AAS finish), а останалите проби, с по-ниски съдържания на злато, се анализират чрез киселинно разтваряне и атомна абсорбция (4-acid, AAS finish).

Подобрена методика на фазовия анализ и последващи резултати

Според използваната досега работна процедура за провеждане на фазовия анализ е необходимо извършването на три паралелни изследвания и съпоставяне на получените резултатите, като осреднената стойност се приема за краен резултат. Това води до зареждане на три изходни проби с по 40 g живак във всяка от тях. Живакът е силно токсичен и генерирането на 120 g живачен отпадък от провеждането на едно изследване е нежелателно, тъй като той се класифицира като опасен отпадък, изискващ специализирани условия за съхранение и депониране. В световен мащаб тенденцията е за ограничаване използването на живак за промишлени нужди и лабораторни изследвания.

С цел редуциране получаването на токсични и опасни отпадъци при провеждането на лабораторните изследвания са разработени два подхода за подобряване методиката на фазовия анализ. Първият подход е за намаляване теглото на анализираната рудна проба, а с това и на живака, използван за амалгамиране на златото.

Проведени са дванадесет теста, резултатите от които показват, че с намаляване теглото на изходната рудна проба, значително се понижава точността на химичните анализи за съдържание на свободно злато. Поради тази причина първият подход за подобряване методиката на фазовия анализ е отхвърлен като неподходящ.

Вторият вариант включва разделянето на фазовия анализ на две части, като се отделя изследването за определяне съдържанието на амалгамируемо свободно злато от следващите, останали стадии на анализа, извършвани за определяне на другите форми на присъствие на златото (Фиг. 2).

След въвеждане на подобрената методика на фазовия анализ са постигнати следните резултати:

Значително намаляване на количеството на използвания живак, необходим за провеждане на анализа от предишните 120 g на 10 g за тест. При възникнала необходимост от дублиране на тестовете, се използват не повече от 20 g живак.

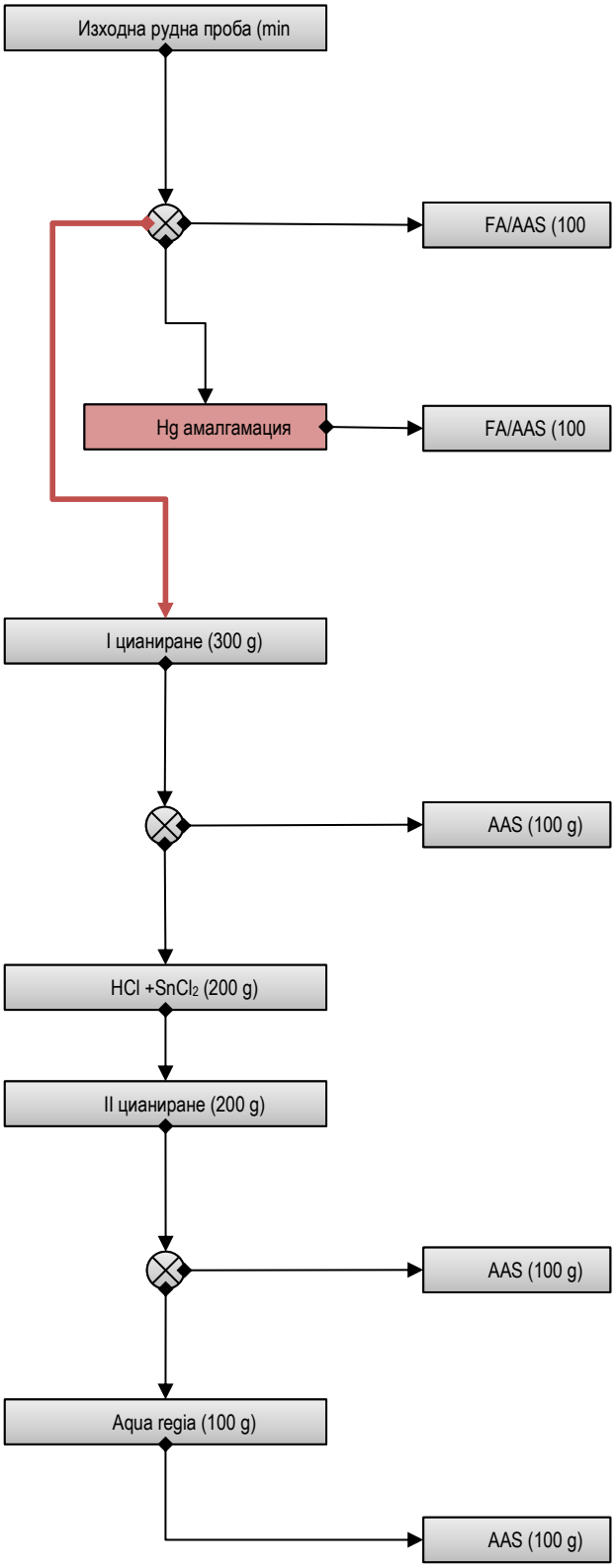
След отделянето на процеса по амалгамация от останалата част от обследването, се постига значително подобрение на качеството на химичните анализи. Този резултат е следствие от отделянето на единствената субективна част от същинското изследване.

Като допълнение към намаляването на количествата на използвания живак се добавя и обстоятелството, че при 10 g живак в 100 g изследван материал, вече е възможно използването на периферно оборудване като делителна фуния. При прилагането на предишната методика е невъзможно използването на делителна фуния за промиване на живачната амалгама, поради високото относително тегло на живака и невъзможността да се създаде воден противопоток с необходимите параметри. Този проблем води до промиване на живака ръчно от оператор и изцяло зависи от опитността на оператора. С намаляване на използваното количество живак се постига отстраняване на субективния фактор при промиването на пробата.

След премахване на възможността за компрометиране на анализа, отпада необходимостта от извършването на няколко паралелни теста, което води до повишаване на производителността и намаляване на разходите за провеждане на подробно обследване на фазовото разпределение на злато и сребро с около 70%.

Изводи

Подобрената методика за извършване на фазовия анализ позволява редуциране с над 80% на количеството живак, използвано за определяне съдържанието на свободно злато в рудата. Постига се значително редуциране на опасния отпадък, генериран в резултат на извършвания фазов анализ, като в същото време се намаляват и разходите за тези лабораторни изследвания с около 70%. Подобрената методика дава възможност за повишаване точността на химичните анализи за определяне съдържанието на злато.



Фиг. 1. Схема на провеждане на фазов анализ на злато след промяна на методиката

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

Александрова, Е. (2007). Икономически подход при проектирането на рудници. *// Предизвикателствата пред науката във връзка с членството на България в ЕС: Международна научна конференция*, 7-8 юни 2007 г., Ст. Загора. *Съюз на учените, 2008, т.3 Технически науки. Химия и физика*, стр. 72-77.

Benzaazoua, M., P. Marion, F. Robaut, A. Pinto (2007). Gold-bearing arsenopyrite and pyrite in refractory ores: analytical refinements and new understanding of gold mineralogy. *Mineralogical Magazine, 71 (2),* 123–142, DOI: 10.1180/minmag.2007.071.2.123

Grigorova, M. (2020). Geophysical and mining technologies for increasing efficiency in „Han Krum” open pit mine, Bulgaria, *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM* 2020

Gül, A., O. Kangal, A. A. Sirkeci, G. Önal (2012). Beneficiation of the gold bearing ore by gravity and flotation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19, 2, 106–110, 106 DOI: 10.1007/s12613-012-0523-4

Gökelma, M., A. Birich, S. Stopic, B. Friedrich (2016). A Review on Alternative Gold Recovery Reagents to Cyanide. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 4*, 8-17, doi: 10.4236/msce.2016.48002

Izerdem, D., S., L. Ergun (2024). Investigation of the effects of particle size on the performance of classical gravity concentration equipment. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 45, 3* https://doi,org/10.1080/08827508.2022.2132943

Liu, Z.-w., X.-y. Guo, Q. -h. Tian, L. Zhang (2022). A systematic review of gold extraction: Fundamentals, advancements, and challenges toward alternative lixiviants. *Journal of Hazardous Materials, 440.* https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129778

Oraby, E. A., J. J. Eksteen, G. M. Ó. Connor (2020). Gold leaching from oxide ores in alkaline glycine solutions in the presence of permanganate. *Hydrometallurgy*, 198, 105527 https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105527

Surimbayev, B., L, Bolotova, A. Akcil, Y. Yessengarayev, Y. Khumarbekuly, Y. Kanaly, M. Akzharkenov (2024). Gravity Concentration of Gold-Bearing Ores and Processing of Concentrates: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,* 1-10, DOI: 10.1080/08827508.2024.2395824

Tomova, M. (2023). Geophysical Techniques for Monitoring of Integrated Mine Waste Storage Facility: Case Study of Southeastern Bulgaria. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 26*, 341-347. https://doi.org/10.55549/epstem.1409615

Yong, C., Y. Song, W. Li, L. Cai (2018). Mineralogical Characteristics of a Micro-Fine and LowGrade Refractory Gold Ore. MATEC Web of Conferences 142, 02011, *International Conference on Materials Applications and Engineering 2017* (ICMAE2017) https://doi.org/10.1051/matecconf/201814202011

REVIEW OF THE REGULATORY FRAMEWORK RELEVANT TO THE PROTECTION OF WATER BODIES FROM EFFLUENTS INFLUENCED BY THE MINING INDUSTRY

Katerina Nikolova, Petia Genova, Rosen Ivanov, Polina Velichkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia
Corresponding author: k.nikolova@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents a targeted review and analysis of key regulatory documents related to the protection of water bodies impacted by the mining and processing industry. Bulgarian legislation is compared with the European normative framework, with focus on the parameters set out in a typical discharge permit for a mining site operator in Bulgaria. The main objective of the entire range of legislative norms in this area is long-term sustainable water management, a high level of protection of the aquatic environment, and setting out rules to halt deterioration in the status of EU water bodies and to achieve their good status.

Key words: mining industry, wastewater, legislation.

ПРЕГЛЕД НА НОРМАТИВНАТА БАЗА, ОТНАСЯЩА СЕ ЗА ОПАЗВАНЕ НА ВОДНИТЕ ТЕЛА ОТ ВОДИ, ПОВЛИЯНИ ОТ МИННАТА ИНДУСТРИЯ

Катерина Николова, Петя Генова, Росен Иванов, Полина Величкова
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящата разработка е направен целеви преглед и анализ на основни нормативни документи, имащи отношение към опазване на водните тела, обект на натиск от миннодобивната и преработвателната промишленост. Съпоставено е българското законодателство с европейското, като основното внимание е фокусирано върху параметри, заложени в едно типично разрешително за заустване на оператор на минен обект в България. Основната цел на цялостната палитра от законодателни норми в тази сфера е дългосрочното устойчиво управление на водите, висока степен на защита на водната среда, постигане на добро състояние на всички водни тела при предотвратяване на допълнително влошаване на състоянието им.

Ключови думи: минна индустрия, отпадни води, законодателство.

Introduction

Given the fundamental importance of environmental legislation for ensuring sustainable development, mining companies should comply with the environmental restrictions set, regardless of any difficulties although our civilisation is now highly vulnerable to supply risks concerning specific mineral raw materials (Falck and Correia, 2023). The raw materials are essential to secure the future generations in respect of climate and energy challenges (Reichl and Schatz, 2023).

As Correia et al. (2024) stated, the European energy transition has to be faced towards human rights, social sustainability, and ecological standards. Resource extraction within the EU is fully aligned with those principles, as it occurs under more stringent regulations than in most other countries and utilises shorter supply lines. Another issue is the necessary support for stakeholders in building relationships based on responsibility, adaptivity, respect of local political and authority structures and customs (Tost et al., 2024). The sector has to make crucial decisions that would define the future goals set in the 2030 Agenda for Sustainable Development and the Paris Agreement (UN TransfElSusDev, 2021). The mineral and raw materials industry is important for Bulgaria and has been one of the best developing sectors in recent years. Regarding labour productivity, this sector is closest to the EU average and significantly exceeds the average productivity for other sectors. Bulgaria is one of the countries in the European Union that, along with Germany, Austria, Poland, the Czech Republic, Romania, Sweden, and others, has long-standing traditions and experience in the development of the mineral and raw materials industry. More than 300 companies and organisations in the field of exploration, extraction, and processing of underground resources are working nowadays, with about 25 000 people directly working in the sector, with labour productivity which is 2.5 times higher than the average for the industrial sector, and at about 5% of the country's gross domestic product.

The national legislative frame is based on good practices both in the EU and in Bulgaria, which should be implemented and continuously improved to achieve sustainable development of the mining industry (EU Green Deal, 2019; CEAP, 2020). The environmental legislation in Bulgaria regulates two main types of public relations: environmental protection from pollution (the qualitative dimension of the environment) and rational use of natural resources (quantitative dimension). Some of the most viral aspects of the strategy of sustainable development of the branch both in Europe and in Bulgaria are directly focused on the environmental protection: environmental management, biodiversity protection, energy and climate protection, waste management, emissions mitigation.

Water treatment in the mining industry is becoming increasingly critical. Environmental regulations and water scarcity require operators to find innovative, practical solutions for sustainable water management. A treatment plan must be created that is safe for the environment and for operations when handling mine water. Water from mining and ore processing often contains significant amounts of dissolved and undissolved contaminants, some of which are toxic. The presence of water in the mine can lead to fluctuations in the water table or overflows in underground and open-pit mines, so it must be discharged.

Preparing the present study on the normative base for the treatment of wastewater influenced by mining and extractive industry, the following were taken into consideration: regulations on the management of waste from the mining and processing industry and the water quality, as well as the main regulatory framework affecting the mining industry. The focus is set on Bulgarian and European key regulatory documents related to

the protection of water bodies impacted by the mining and processing industry, regarding typical indicators for a mining effluent: pH, sulphates, electrical conductivity, heavy metals, etc.

Basis of Bulgarian national legislation on the protection of water and water bodies affected by mining industry

The state environmental policy is based on a set of ideas, principles, and practical approaches to solve the environmental problems of the society, united in different legal acts, namely complexity in the legal regulation of the environment; scientific substantiation of management decisions; prevention through environmental protection; combination of national legislation with the European and International legislation; the “polluter pays” principle; public participation in environmental management.

Preparing the present feasibility study on normative acceptable options for the treatment of the extractive waste influenced waters (EWIW) before discharge, regulations on the management of waste from the mining and processing industry and the water quality are taken into consideration. Some of the most important of them are listed in Table1.

Table 1. *BG national policy*

ACTS
Environment Protection Act
Water Act
Subsurface Resources Act
REGULATIONS
Regulation on the Management of Mining Waste, 2016
Regulation 10 /2001 on Issuing Permits for Waste Water Discharge into Water Bodies and Setting Individual Emission Limit Values for Point Sources of Pollution
Regulation H-4/2012 for characterization of surface waters
Regulation on Standards for Environmental Quality for Priority Substances and Certain Other Pollutants, 2010
Regulation 6/2000 on the Limit Values for Admissible Contents of Dangerous and Harmful Substances in the Waste Water Discharged in the Water Bodies
OTHERS
Methodology for BAT determination, 2012
National Strategy for the Development of the Mining Industry, 2015

National Strategy for the Development of the Mining Industry

The strategy strives for the sustainable development of the mining industry by ensuring a balanced economic, social, and ecologically responsible approach to exploration, extraction, and processing of underground natural resources in the Republic of Bulgaria. The realization of the general and specific strategic objectives aims at prerequisites and legal guarantees for the sustainable development of the mining industry in Bulgaria in accordance with the European Initiative for raw materials and the implementation of a unified and clear state policy on the underground natural resources of the country. To achieve this, it is intended to use good practices, both in the EU and in Bulgaria, which can and should be continuously implemented and improved to achieve sustainable development of the mining industry.

Environmental Protection Act (EPA)

According to Art. 3 of EPA, the protection of the environment is based on a number of principles. In particular, considering the importance of the treatment of effluents before their discharge, the following are of a primary significance:

- prevention and reduction of the risk for human health;
- the advantage of preventing pollution from the subsequent elimination of the damage it causes;
- the polluter pays for the caused damages;
- prevention from pollution and damage of clean areas and other adverse impacts on them;
- integration of environmental policy into sectoral and regional policies for the development of the economy and social relations.

Water Act (WA)

The WA regulates the ownership and management of the waters on the territory of the Republic of Bulgaria as a common national inseparable natural resource and the ownership of the water-saving systems and facilities. The purpose of the act is to:

- ensure an integrated water management in the interest of society,
- protect the health of the population,
- to create conditions for ensuring sufficient and good quality of surface and groundwater for sustainable, balanced, and legitimate water use, reducing water pollution,
- protect surface and groundwater and Black Sea waters, ceasing pollution of the marine environment with natural or synthetic substances;
- reduce discharges, emissions, and release of priority substances;
- discontinue discharges, emissions, and release of priority hazardous substances;
- prevent or reduce harmful effects on human life and health, the environment, cultural heritage, and economic activity, related to the adverse impacts of water.

Chapter 8 of the WA regulates water and water bodies issues based on the principle that all waters and water bodies are protected from exhaustion, pollution, damage, in order to:

- maintain the necessary quantity and quality of water and a healthy environment,
- conserve ecosystems,
- preserve the landscape,
- prevent economic damages, including:
  - achieving good chemical and ecological status of surface water,
  - achieving good quantitative and chemical status of groundwater,
  - reducing the need for water treatment before use,
  - ensuring the development of aquatic ecosystems and associated terrestrial ecosystems.

Regulation on Standards for Environmental Quality for Priority Substances and Certain Other Pollutants

This document establishes environmental quality standards (EQS) for priority substances and certain other pollutants in order to achieve good chemical status of surface waters in accordance with the provisions and objectives of Chapter 10, Section III, of the Water Act. Such substances, typical for mining activities, are lead, nickel, mercury and cadmium.

Basis of the European legislation on the protection of waters and water bodies from water affected by the mining industry

Analysing the EU legal documents, it must first be said that the Environment, and Mining and Processing sectoral policies follow the primacy of the European Union's legislative acts and other principles, i.e. they follow the structure of *Acquis Communautaire*.

Table 2. *EU policy*

DIRECTIVES	
ID	**Title**
2006/21/EC	Directive on the management of waste from extractive industries
2010/75/EU	Directive on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)
2000/60/EC	Directive establishing a framework for Community action in the field of water policy (EU Water Framework Directive)
2006/118/EC	Directive on the protection of groundwater against pollution and deterioration
2014/80/EU	Directive amending Annex II to Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration
2008/105/EC	Directive 2008/105/EC setting environmental quality standards in the field of water policy
2013/39/EU	Directive amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy
2014/52/EU	Directive on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment (EIA)
2002/49/EC	Directive relating to the assessment and management of environmental noise
2012/18/EU	Directive on the control of major-accident hazards involving dangerous substances
2003/4/EC	Directive on public access to environmental information
2003/35/EC	Directive providing for public participation in respect of the drawing up of certain plans and programmes relating to the environment
EC EXTRA DOCUMENTS RELATED TO WASTE MANAGEMENT AND MINE CLOSURE	
Type	**Title**
Resolution	EP resolution of 5 May 2010 on a general ban on the use of cyanide mining technologies in the European Union
Strategy	Mediterranean Action Plan (MAP)
Guidance Note	Preparing a Waste Management Plan
	Safety guidelines and good practices for tailings management facilities, UNECE, 2014
BREF	Best Available Techniques Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries (MWEI BREF), in accordance with Directive 2006/21/EC, 2018
	Best Available Techniques for the Management of Tailings and Waste Rock in Mining Activities (MTWR BREF)

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (WFD)

The environmental objectives are set out in Article 4 of the Water Framework Directive. The aim is a long-term sustainable water management, based on a high level of protection of the aquatic environment. Article 4 (1) defines the overall WFD objective to be achieved for all surface and groundwater bodies, achieving good status until 2015 and introducing the principle of preventing further deterioration. The main environmental objectives of the Directive are various and include the following elements, according to Article 4 (1) of the WFD:

- preventing deterioration of surface and groundwater,
- protecting, improving and repairing all water bodies, achieving good status by 2015, i.e. (or potentially) good ecological status as well as good chemical status of surface water and good chemical and quantitative status of groundwater,
- gradual reduction of pollution with certain substances and stepwise cease of the discharge of priority hazardous substances in surface water,
- prevention and limitation of the introduction of pollutants into groundwater,
- suspension of any significant upward trends in groundwater pollution,
- achievement of standards and targets for protected areas defined in Community legislation.

Directive 2008/105/EC setting environmental quality standards in the field of water policy

It sets out environmental quality standards (EQSs) concerning the presence in surface water of certain substances or groups of substances identified as priority pollutants because of the significant risk they pose to or via the aquatic environment. These standards are in line with the strategy and objectives of the EU Water Framework Directive (Directive 2000/60/EC). These substances include the metals cadmium, lead, mercury and nickel, and their compounds. The limits on the concentration of the priority substances and 8 other pollutants in water (or biota) are given, i.e. thresholds which must not be exceeded if a good chemical status is to be met. There are 2 types of water standard:

- A threshold for the average concentration of the substance concerned, calculated from measurements over a 1-year period. The purpose of this standard is to ensure protection against long-term exposure to pollutants in the aquatic environment;

- A maximum allowable concentration of the substance concerned, i.e. the maximum for any single measurement. The purpose of this standard is to ensure protection against short-term exposure, i.e. pollution peaks.

EU countries must ensure compliance with the EQSs. They must also take measures to ensure that the concentrations of substances that tend to accumulate in sediment and/or biota do not increase significantly. For each river basin district, EU countries must set up an inventory of emissions, discharges, and losses of all substances listed in Part A of Annex I to the directive.

Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries (MWEI DIRECTIVE)

As stated in Directive 2006/21/EC, a follow-up to recent mining accidents sets out as one of its priority actions an

initiative to regulate the management of waste from the extractive industries. This action is designed to complement initiatives pursuant to Directive 2003/105/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, as well as the production of a best available technique document covering the management of waste rock and tailings from mining activities.

Best Available Techniques

In order to define Best Available Techniques (BAT) and the BAT-associated environmental performance at EU level, the Commission organises an exchange of information with experts from Member States, industry and environmental organisations. This process results in BAT Reference Documents (BREFs), as the BAT conclusions contained are adopted by the Commission as Implementing Decisions.

Best Available Techniques Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries (MWEI BREF)

Technologies for the treatment of wastewater influenced by the mining industry as set in the BAT Reference Document for the Management of Waste from extractive industries, MWEI BREF, is a review of the Reference Document for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities (MTWR BREF). The reviewed document presents up-dated data and information on the management of waste from extractive industries, including information on BAT, associated monitoring, and developments in them. Member States shall ensure that operators responsible for the management of extractive waste take all measures necessary to prevent or reduce as far as possible any adverse effects on the environment and human health brought about as a result of the management of extractive waste. These measures shall be based, *inter alia*, on the best available techniques without prescribing the use of any technique or specific technology, but taking into account the technical characteristics of the waste facility, its geographical location, and the local environmental conditions.

The BAT implementation is fully overlapped with the European policy to circular approach as extractive wastes are to be re-mined. (Blengini et al., 2019; Garbarino et al., 2020)

According to MWEI BREF, the strategies for management of the extractive waste influenced waters (EWIW) can be divided in dependence to the two main streams:

• unrecovered water (seepage): prevention or reduction of seepage from non-inert extractive waste deposition areas;

• recovered water (drained water and free water to be re-used, recycled or discharged): this may represent important volumes in some cases.

EWIW may be re-used or recycled (after treatment) for the mineral processing or other extraction activities. The EWIW stemming from the EWFs, which cannot or will not be further used, is usually discharged by operators, often after treatment, in rivers or seawater bodies in most cases, and/or in lakes in some cases.

The most common environmental impacts of emissions to water are acidification of rivers, emissions of suspended particles, and emissions of dissolved substances, such as salts and metals. In order to prevent and control emissions, but also as a valuable source of water to be recycled and re-used, the management of EWIW is of the utmost importance in any mineral resources extraction project since water plays a key role in most extraction processes.

The water at an extractive site can be divided into two main types of water streams:

• the water which was not in contact with the extractive waste at any stage of the process, e.g. water run-off;

• the EWIW which was in contact with the extractive waste at some stage of the process, e.g. water from the mineral processing, reclaimed water from the EWF, drainage water.

Operators usually try to avoid the contact of water run-off with the mineral resources or extractive waste. Different techniques, such as diversion channels and waste covers, are used to avoid contact and prevent water contamination. The EWIW is usually collected and treated. After treatment, water can be re-used, e.g. in the mineral processing. Only the excess water which is not needed, or which can affect the stability of the EWFs, is discharged as a surplus. The treatment of water prior to discharge aims to prevent and control any negative environmental impacts. In some cases, e.g. for smaller EWIW volumes, the treatment of water may be carried out in specialised water treatment facilities (off site). However, for larger volumes of EWIW, the treatment is carried out on site.

In general, the different techniques used for the management of EWIW can be divided into two categories: active techniques, i.e. requiring energy input, and passive techniques, i.e. not requiring energy input. Active techniques will also require more maintenance than passive techniques. Moreover, the different treatment techniques can be grouped into three broad categories, according to the intended purpose: the separation of phases, the removal of dissolved substances, and the neutralisation of EWIW. For each of these categories, operators reported the implementation of several techniques.

Basically, the MWEI BREF does not provide legal interpretation, nor should it be used to such purpose. It aims to provide technical information related to BAT referring to a broad range of materials and processes. The BAT Conclusions should therefore be seen as a reference aiming at:

• providing extractive industries, competent authorities, and other relevant stakeholders with up-to-date information and data on the management of extractive waste;

• supporting decision makers by providing a list of identified BAT to prevent or reduce as far as possible any adverse effects on the environment and human health brought about as a result of the management of extractive waste, duly taking into account that the techniques listed and described are neither prescriptive nor exhaustive and that other techniques may be used that ensure at least an equivalent level of environmental protection.

There are two distinct groups of BAT, generic and risk-specific. Generic BAT focus on corporate management; information and data management (including the site-specific information and the evaluation of environmental risks and impacts); and waste hierarchy. Risk-specific BAT comprise BAT identified to prevent or reduce as far as possible specific risks that are identified by a proper Environmental Risk and Impact Evaluation, duly considering the relevant site-specific information. In order to prevent or minimise surface water status deterioration, BAT is to use one or a combination of techniques, appropriately pre-selected and based on the abated pollutants or targeted parameters, applicability of the respective technique, and the financial, administrative, and technical capacity of the operator. All the variants (Tables 3, 4 and 5) are based on the results of a proper Environmental Risk and Impact Evaluation,

as different techniques are relevant to different groups of pollutants to be abated.

Removal of suspended solids / suspended liquid particles

In order to reduce the level of suspended solids (TSS) or (SL) liquid particles in the EWIW, operators reported implementing one or a combination of the following techniques (Table 3):

• gravity separation: based on the principle of natural gravity sedimentation;

• clarification in tanks: based on the gravity settling principle enhanced by a mechanical system to remove solids being deposited by sedimentation;

• coagulation and flocculation: based on the use of chemicals to enhance sedimentation;

• air flotation: based on the capturing of solid particles in froth;

• media filtration: based on the size exclusion of particles and/or capture of particles;

• membrane filtration: based on size exclusion (pore size).

Some of the applicability cases may be restricted by location and land availability (BAT 45 a), by the properties of the particles, naturally or by means of flotation reagents, to attach to air bubbles (BAT 45 d), or by a non-constant inflow quality and/or high TSS content (BAT 45 g). Media and membrane filtration are particularly relevant for non-inert EWIW (BAT 45 e and f), as hydrocycloning could be used for treatment of extractive waste from mineral processing to be deposited into ponds (BAT 45 g).

Table 3. *Removal of suspended solids/suspended liquid particles*

Technique - BAT 45	**Targeted parameters**
a) Gravity separation in settling ponds	TSS, SL such as oil and grease
b) Clarification in tanks	TSS, SL such as oil and grease
c) Coagulation and flocculation	TSS, SL such as oil and grease, colloids
d) Air flotation	TSS, SL such as oil and grease, emulsions, COD
e) Media filtration	TSS
f) Membrane filtration for suspended particles	TSS, SL such as oil and grease, colloids
g) Hydrocycloning	TSS

Removal of dissolved substances

For the reduction of the level of dissolved substances in the EWIW (Table 4), operators reported implementing one or a combination of the following techniques based on the following:

• *The oxidation and/or aeration principle*:

- Aeration of the water stream and/or addition of oxidants in order to promote the oxidation and precipitation of dissolved substances, mainly dissolved metals.

- Active aerobic biological oxidation or implementation of passive aerobic wetlands where the biological activity of microorganisms promotes the oxidation and precipitation of dissolved substances.

• *The reduction principle*:

- Anaerobic wetlands or anoxic Biochemical Reactors (BCRs) can be used to promote the reduction and precipitation of dissolved substances.

• *The neutralisation/precipitation principle*:

- Hydroxide and carbonate precipitation is implemented to precipitate dissolved metals into a hydroxide or carbonate complex. This is performed by adding alkaline reagents to the EWIW, which leads to a pH rise and the precipitation of dissolved metals.

- Sulphide precipitation is implemented to precipitate dissolved metals into a sulphide complex by adding sulphide reagents to the EWIW, which leads to the precipitation of dissolved metals.

• *The adsorption principle*:

- Adsorption of dissolved substances on inorganic or organic media, based on the surface properties of the media and the liquid-solid interactions, can be used to remove the dissolved substances, e.g. active carbon adsorption or ion exchange.

• *The size exclusion principle*:

- Nanofiltration and reverse osmosis.

It has to be pointed that BAT 46 a is not applicable as a stand-alone technique, but in combination with other techniques such as precipitation, solid/liquid control, and pH adjustment. The applicability of *active aerobic biological oxidation* may be restricted in the case of high levels of BOD or COD, oil or salts which would prevent the microbial oxidation.

Table 4. *Removal of dissolved substances*

Technique - BAT 46	**Targeted parameters**
a) Aeration and active chemical oxidation	Fe^{2+}, Mn^{2+}
b) Active aerobic biological oxidation	Oil/grease, nitrogen, cyanates, COD, BOD, metals
c) Aerobic wetlands	TDS, TSS, BOD, metals
d) Anaerobic wetlands	Acidity, dissolved metals and metalloids, sulphates
e) BCRs	Acidity, dissolved metals and metalloids, sulphates
f) Hydroxide and carbonate precipitation	Dissolved metals
g) Sulphide precipitation	Dissolved metals and metalloids
h) Coprecipitation with chloride or sulphate metal salts	As, P, Se, 226Ra
i) Adsorption	Dissolved metals, organic carbon, BTEX, oil, and grease
j) Ion exchange	Ca, Mn, Ba, Sr, Ra, nitrates, fluorides, arsenates, chromates, U complexes, B, and HMs
k) Nanofiltration	Multivalent ions
l) Reverse osmosis	Dissolved metals, salts, macromolecules

The *aerobic and anaerobic wetlands* (BAT 46 c and d) could be used as polishing technique regarding the various limitations for their use:

- high acidity load,
- high levels of salts which would prevent event proper microbial oxidation,
- high dissolved oxygen content,
- high water flow,
- low land availability,
- decreasing effectiveness over time,
- high temperature and flow fluctuations,

- adverse local climatic conditions,
- sensitivity to high throughput excursions.

They are not applicable as a stand-alone technique. Also, maintenance could be required, so their operation is often hard. *BCRs* are applicable to sites with little available space and very strict emission limits. Compared to other sulfate reduction methods (e.g. reactive barriers, bioreactors), special equipment and maintenance activities are needed. They are not applicable with high levels of salts that would prevent proper microbial oxidation.

Hydroxide and carbonate precipitation (BAT 46 f) is not suitable for the removal of chromium, selenium and uranium. Its applicability may be restricted in the presence of chelates, such as ammonia, and metal-complexing agents, such as cyanides. *Sulphide precipitation* (BAT 46 g) could be used only in combination with other techniques, such as solid/liquid separation, and is suitable for valuable metals recovery from the EWIW stream. The feasibility of *coprecipitation* may be restricted in the case of sensitiveness to higher variations in EWIW quality (BAT 46 h), while that of the *adsorption* - in the case of high levels of salts which would prevent proper adsorption (BAT 46 i). The *ion exchange*, *nanofiltration*, and *reverse osmosis* (BAT 46 j, k and l) are very sensitive to peak concentrations and extreme conditions – pH variations, temperature alterations, high levels of salts which would prevent proper ion exchange, nanofiltration or reverse osmosis. Usually, they are applied as a polishing step.

Finally, in order to adjust the pH of EWIW, implementing one or a combination of the following techniques is required:

• active neutralisation based on the addition of basic or alkaline reagents;

• passive treatment based on the passive dissolution of alkaline reagents:

- Oxic Limestone Drains (OLDs), Open Limestone Channels (OLCs);
- Anoxic Limestone Drains (ALDs);
- Successive Alkalinity-Producing Systems (SAPS).

Table 5. *Neutralisation of EWIW prior to discharge*

Technique - BAT 47	**Targeted parameters**
a) Active neutralization	pH, acidity, alkalinity
b) OLDs/OLCs	Acidity, Mn, Al, Fe, Cu, Pb, etc.
c) ALDs	Acidity
d) SAPS	Acidity, Al, Cu, Fe, Mn, Zn
e) Anaerobic wetlands	As per BAT 46 d

The techniques for neutralisation before discharge (BAT 47 a - e) (Table 5) have also some limitations – they are not applicable to treat high levels of metal content and/or acidity, high concentration of Fe, Al, high acidity, high flow rate, higher levels of DO or low pH. Therefore, the techniques may be particularly suitable as a polishing technique, during the operational phase, or for the treatment of low-load EWIW from sites in the closure or after closure phase, and are not sufficient as a stand-alone technique. Their applicability may be restricted by land availability and site topography.

Conclusions

The specifics of the extraction and processing of mineral resources lead to an enormous impact on water bodies, and are therefore subject to regulation by environmental legislation. In order to minimise the negative impacts of mining on the environment, a thorough verification (independent quality assessment) of mining projects is necessary. The national legislative frame is based on good practices both in the EU and in Bulgaria, which should be implemented and continuously improved to achieve sustainable development of the mining industry.

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

Blengini, G. A., Mathieux, F., Mancini, L., Nyberg, M., & Viegas, H. M., Salminen, J., Garbarino, E., Orveillon, G., Saveyn, H., Mateos Aquilino, V., Llorens, G.T., García Polonio, F., Horckmans, L.D.H.P., Balomenos, E., Dino, G., de la Feld, M., Mádai, F., Földessy, J.G.M., Gombkötő, I., Calleja, I. (2019). Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills. State of Play on Existing Practices. Publications Office of the European Union, Luxembourg (2019), p. 130, https://doi.org/10.2760/494020

CEAP - EC Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions — A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. COM (2020) 98 Final, 2020; (Accessed on 28.02.2025). Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content /EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN.

Correia, V., Rosendo, L., & Falck, E. (2024). Understanding the narratives in the public debate about mining in Europe. *European Geologist, 67*. https://doi.org/10.5281/zenodo.12205489

Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council. (Accessed on 20 March 2025) Available online: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj/eng.

EPA – Environmental protection act, promulgated in SG, issue 91 of 25 September 2002, supplemented in SG No. 70 of 20 August 2024. (Accessed on 25 March 2025) Available online: https://lex.bg/laws/ldoc/2135458102.

European Green Deal - EC European Commission. Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – European Green Deal. COM/2019/640 Final, 2019; (Accessed on 27 March 2025). Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN.

Falck, E.; Correia, V. (2023). Reconciliation of Conflicting Societal Objectives: Nature Protection vs. Mining. *Mater. Proc., 15*, 7. http://doi.org/10.3390/materproc2023015007.

Garbarino, E., Orveillon, G., Saveyn, H. G. M. (2020) Management of waste from extractive industries: The new European reference document on the Best Available

Techniques, *Resources Policy, Volume 69*, 2020, 101782, ISSN 0301-4207. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101782

MWEI BREF - BAT Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries (2018) (Accessed on 20.2025). https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/inline-files/jrc109657_mwei_bref_-for_pubsy_online.pdf

MWEI Directive - Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC - Statement by the European Parliament, the Council and the Commission. (Accessed on 20 March 2025) Available online: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/21/oj/eng.

Regulation on Standards for Environmental Quality for Priority Substances and Certain Other Pollutants. Adopted by Council of Ministers Decree No. 256 of 1 November 2010, promulgated in SG No. 88 of 9 November 2010, amended and supplemented in SG No. 97 of 11 December 2015. (Accessed on 25 March 2025) Available online: https://bsbd.bg/UserFiles/File/N_standarti_priorit_ve6t_zamyrsiteli.pdf.

Reichl, C.; Schatz, M. World Mining Data 2023. Minerals Production. 2023. 265 p. (Accessed on 30 March 2023) Available online: https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2023.pdf.

Tost, M.; Lesser, P.; Poelzer, G.; Akhouri, U.; Gugerell, K. (2021) Social licence to operate (SLO) guidelines for Europe. H2020 Project MIREU, Deliverable D4.3. 2021; 27 p. (Accessed on 25 March 2025) Available online: https://mireu.eu/sites/default/files/2021-05/D%204.3.pdf.

TransfElSusDev - UN. Transforming Extractive Industries for Sustainable Development. Policy Brief. 18 p. (2021) (Accessed on 25 March 2025) Available online: https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/sg_policy_brief_extractives.pdf.

WA – Water Act, promulgated in SG No. 67 of 27 July 1999, amended and supplemented in SG No. 54 of 4 July 2025. (Accessed on 25 March 2025) Available online: https://lex.bg/laws/ldoc/2134673412.

Water Framework Directive - Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. (Accessed on 20 March 2025) Available online: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/2014-11-20.

ENHANCING SCREENING EFFICIENCY BY OPTIMISING ORE FEED IN THE CRUSHING CYCLE

Mihail Petrov, Teodora Yankova, Nikolay Nestorov, Irena Grigorova

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

ABSTRACT. The efficiency of screening has a significant impact on the granulometric preparation of raw materials and is crucial for the production of high-quality concentrates, improving technological parameters, and reducing productions costs. The feeding of ore in crushing processes is a key factor in screening, as the optimisation of the feed material directly depends on the load on the screens. This article presents the results of implementing an innovative technique to optimise the ore feed in the crushing and screening cycles. The optimisation of ore feed to the preliminary stages of granulometric preparation leads to increased productivity in the crushing sections, reduced operational time, and lower electricity consumption. As a result, improved efficiency is achieved in terms of enhancing subsequent process stages and reducing the production cost in the final concentrates.

Key words: screening, efficiency, granulometric preparation.

ПОВИШАВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПРЕСЯВАНЕ, ЧРЕЗ ОПТИМИЗИРАНЕ ЗАХРАНВАНЕТО НА РУДА В ПРОЦЕСА НА ТРОШЕНЕ

Михаил Петров, Теодора Янкова, Николай Несторов, Ирена Григорова

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

РЕЗЮМЕ: Ефективността на пресяване има съществено влияние върху зърнометричната подготовка на суровините и играе решаваща роля за осигуряване на високо качество на произвежданите концентрати, подобряване на технологичните параметри и намаляване на производствените разходи. Подаването на рудата в процесите на трошене играе важна роля върху пресяването, като оптимизирането на подавания материал пряко зависи от натоварването на ситата. В настоящата статия се представят резултатите от внедряването на иновативна техника за оптимизация на подаването на изходната руда в процесите на трошене и пресяване. Оптимизацията на подаването на изходната руда към предварителните етапи на зърнометричната подготовка води до повишена производителност на трошачните отделения, намаляване на работното време и понижаване на разходите за електрическа енергия. В резултат на това се постига по-добра ефективност в последващите процеси на технологичната верига и намаляване на себестойността на произвежданите концентрати.

Ключови думи: пресяване, ефективност, зърнометрична подготовка.

Въведение

В миннодобивната индустрия ефективното пресяване на минералните суровини е от съществено значение за постигане на високи технологични резултати и намаляване на загубите в процеса на нейната преработка. Необходимо е да се отчита и степента на фрагментация на рудата още по време на нейното изземване (Terziyski et al., 2021). Подобряването на процеса на пресяване, чрез внедряване на нови технологии, може да доведе до по-добро разпределяне на материала, намаляване на циркулационния товар и оптимално използване на енергийните ресурси. Минните компании често се сблъскват с предизвикателства, свързани с хронично запушване на ситовите повърхности, вследствие на различни фактори - амплитудата на вибрации, размер на отворите на ситовите повърхности и количеството на подавания материал. Това води до чести престои, ниска ефективност и износване на ситовите повърхности (Andoh et al., 2021). Важна роля за технико-икономическите показатели при обогатяването на минералните суровини има ефективността на технологичните предварителни процеси на обогатяване – трошене, пресяване и смилане.

Според Мочев и Григорова (2015) трошенето и пресяването представляват съставни части на първия по-прецизно управляван стадий на намаляване на размерите при преработката. Това е и главният процес при производството на готови едрозърнести материали с дефиниран размер или пък е подготвителен процес за следващите операции на редукция на размера (Мочев, Григорова, 2015). При схемите на пресяване често се наблюдават загуби, свързани с неефективно разделяне на частиците, запушване на ситата и прекомерно натоварване на трошачното отделение. В резултат на това се намалява производителността и се увеличават разходите за електроенергия. Намалената ефективност на тези процеси води до понижаване на показателите в последващите процеси на флотация и обезводняване на концентратите със следваща загуба на ценни компоненти в отпадъка. Оптималната ефективност на пресяване способства за по-добро разпределение на различните класове на материала в процеса на трошене, което от своя страна благоприятства повишаването на технологичните показатели при обогатяването. Постига се необходимото качество на получаваните концентрати, съответстващо на изискванията за металургична преработка, редуцират се загубите на ценни компоненти и се намаляват експлоатационните разходи.

Една от главните цели на оптимизацията в дейността на трошачните отделения е внедряването на иновативни техники в схемите на трошене и пресяване, което да осигурява ефективно разпределение на частиците, повишаване производителността на трошачните отделения, постигане на положителен икономически ефект с по-ниска себестойност на 1 тон преработена руда. Една такава иновация в процеса на пресяване е Тумблерното пресяване, което използва триизмерно елипсовидно движение за разделяне на много финитe частици от по-едрите (Balasubramanian, 2017).

В настоящата статия се разглеждат резултатите от внедряване на честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380 V, 3.7 kW, оптимизиращ честотата на работа на

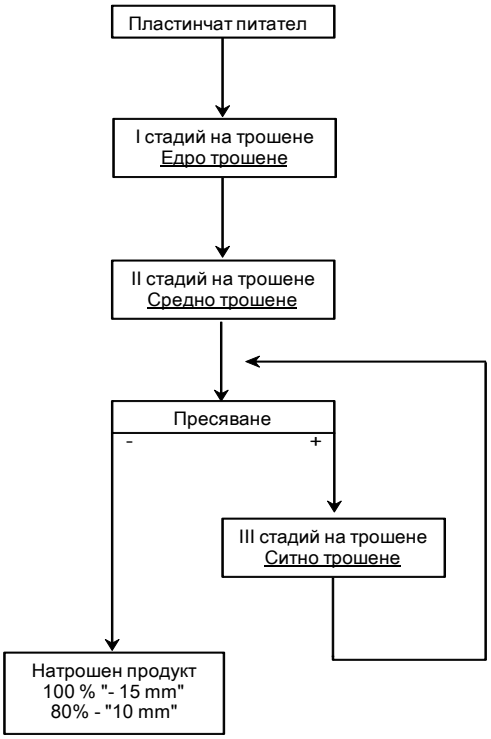
пластинчат питател. Отделено е внимание върху ефективността на пресяване и времето на работа на трошачния цех. Преди внедряването на честотен преобразувател задвижването на питателя беше равномерно, подаваната руда в процеса на трошене в определени периоди бе в по-голямо от необходимото количество, в резултат на което се получават по-ниска производителност и по-високи експлоатационни разходи в ОФ.

Материал и методика

Оловно-цинковата руда, добивана в рудник Тораница, Република Северна Македония се преработва в ОФ Тораница, до която се транспортира с помощта на ж.п. транспорт. Рудата постъпва в приемен бункер с вместимост 600 t, с размер на отворите 500x500 mm. Средните съдържания на олово и цинк в рудата са съответно 3.2 % и 1.8 %, а относителното тегло на рудата е 3.1 g/cm^3. Влажността на оловно-цинковата руда варира в интервала 6 – 12%, съдържанието на глина е от 2 до 3%. Съдържание на влага в глината е от 14 до 16 %.

За определяне ефективността на пресяване преди и след оптимизация на подаването на рудата в процеса на трошене са извършени ситови анализи с набор от сита 60, 35, 15, 10, 6.7, 4.75, и 3.35 mm. Зърнометричният анализ е проведен в технологичната лаборатория на ОФ Тораница. Извършено е опробване на вибрационно сито CVB302 на трите продукта от пресяването – захранване на сито, надситов продукт, който се явява като циркулационен товар в схемата на трошене и подситов продукт, който представлява крайният натрошен продукт, постъпващ в бункерите за ситна руда, преди процеса смилане.

Схемата на трошене в ОФ Тораница е представена на фигура 1.



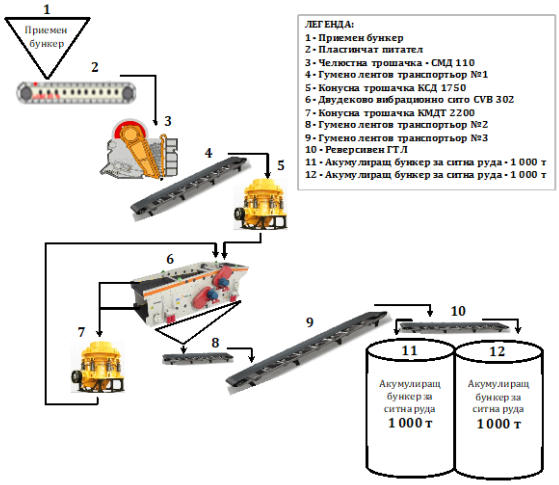
Фиг. 1. Линейна схема на трошене в ОФ Тораница

Резултати и дискусия

Работа на трошачно отделение преди оптимизация на захранването на рудата в процеса на трошене

От приемния бункер рудата с едрина от около 450 до 500 mm, чрез пластинчат питател с равномерни обороти на подаване, постъпва на първи стадий на трошене – едро трошене в челюстна трошачка СМД 110 с приемен отвор 900x1200 mm и широчина на разтоварващ отвор 130 mm. Посредством ГТЛ натрошената руда от първи стадий на трошене постъпва на втори стадий на трошене – средно трошене в конусна трошачка КСД 1750 с широчина на разтоварващ отвор 30 mm. Натрошената руда от втори стадий на трошене, чрез ГТЛ, постъпва на двудеково вибрационно сито CVB 302 с размер на отворите на горната пресевна повърхност 40x40 mm и размер на отворите на долната пресевна повърхност 15x40 mm. Вибрационното сито е двудеково с оглед по-висока ефктивност на пресяването. Надситовият продукт, който се явява като циркулационен товар, чрез ГТЛ постъпва в трети стадий на трошене – ситно трошене в конусна трошачка КМДТ 2200 с широчина на разтоварващия отвор 12 mm. Подситовият продукт от вибрационното сито чрез серия от ГТЛ-и постъпва в 2 броя междинни бункери за ситна руда с вместимост по 1000 тона всеки. Степента на натрошаване за първи стадий на трошене е 2.4, за втори стадий на трошене е 3.5 и за трети стадий на трошене е 2.5. Общата степен на трошене (коефициент на трошене) е 21.

Верижната схема на машините и съоръженията в трошачно отделение на ОФ Тораница са представени на фиг. 2.



Фиг. 2. Верижна схема на машини и съоръжения в трошачно отделение на ОФ Тораница.

Тъй като оборотите на задвижване на питателя са равномерни, в продължителни периоди от работата на трошачното отделение, подаваната руда е в по-голямо количество от необходимото, вибрационното сито и циркулационният товар се претоварват и материалът, който се връща в конусната трошачка за ситно трошене също е в по-голямо количество. В този случай ефективността на пресяване с вибрационното сито се понижава.

За да се разтовари ситото и циркулационния товар, се налага спиране на пластинчатия питател до намаляване на циркулационния товар и разтоварване на вибрационното

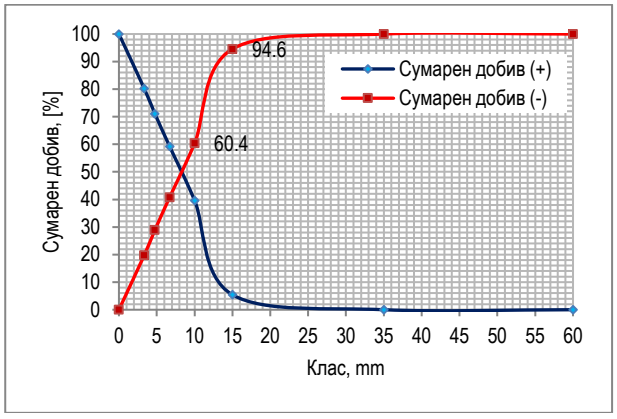
сито. По този начин процесът на работа в трошачно отделение се нарушава и времето за работа на трошачно отделение се увеличава (около 7.5 часа на смяна).

За определяне ефективността на пресяване, бе проведено опробване на продуктите от вибрационното сито и извършен ситов анализ (Табл. 1).

Таблица 1. *Ситов анализ на трите продукта от пресяването – захранване, надситов продукт и подситов продукт.*

Клас, mm	Захранване	Надситов продукт	Подситов продукт
	Добив, %		
+60	0.0	6.6	0.0
-60 + 35	4.2	10.4	0.0
-35 + 15	49.3	65.7	5.4
-15 + 10	24.9	15.3	34.2
-10 + 6.7	6.1	0.1	19.6
-6.7 + 4.75	3.7	0.0	11.9
-4.75 + 3.35	2.4	0.0	9.1
-3.35	9.4	1.9	19.8
Общо	100.0	100.0	100.0

Въз основа на получените данни от ситовия анализ е построена зърнометрична характеристика на подситовия продукт от пресяването, представена на фигура 3.

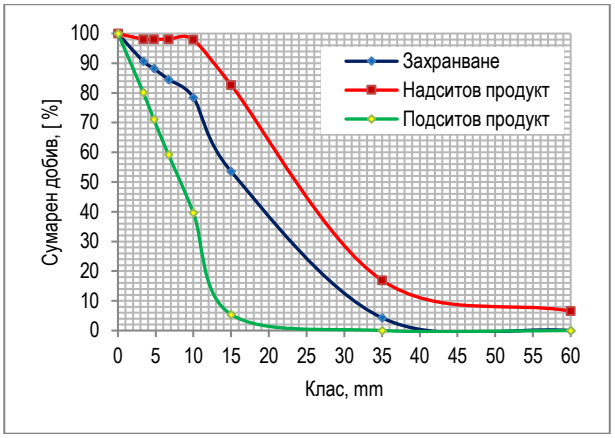


Фиг. 3. Зърнометрична характеристика на подситов продукт от пресяването на вибрационното сито

На фиг.3 са представени стойностите в класовете „-15 mm” и „-10 mm” в подситовия продукт, съответно 94.6 % и 60.4 %. Построени са криви на сумарните добиви „по +” на трите продукта от опробването на вибрационното сито - захранване, надситов продукт и подситов продукт (Фиг. 4).

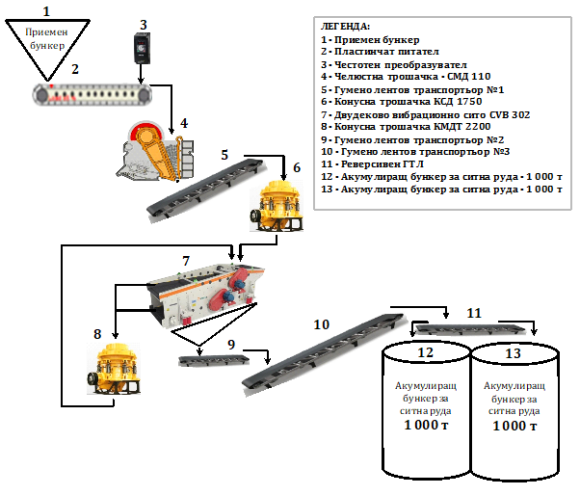
Работа на трошачно отделение след оптимизация на захранването на рудата в процеса на трошене

За подобряване ефективността на пресяване на вибрационното сито в ОФ Тораница, беше монтиран честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380 V, 3.7 kW, с цел регулиране оборотите на пластинчатия питател при захранването на рудата в процеса трошене, в зависимост от нейната едрина.



Фиг. 4. Криви на сумарни добиви „по +” на продуктите – захранване, надситов продукт и подситов продукт.

Схемата на трошене остава непроменена, като единствено се регулират оборотите на пластинчатия питател (Фиг. 5).



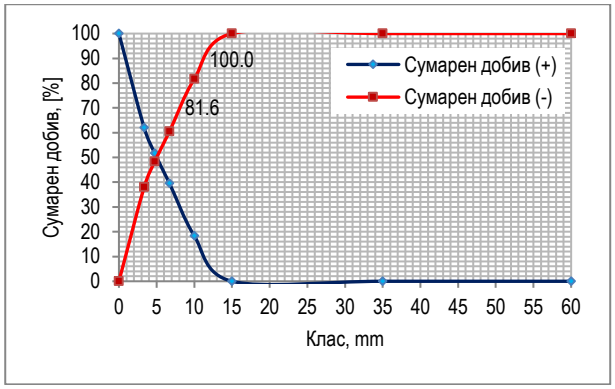
Фиг. 5. Верижна схема на машините и съоръженията в трошачно отделение в ОФ Тораница след монтиране на честотен преобразувател NIETZ тип AT20, 380 V, 3.7 kW

За определяне ефективността на пресяване, отново бе извършено опробване на продуктите от ситото – захранване, надситов продукт и подситов продукт. Данните от ситовия анализ са представени в таблица 2.

Таблица 2. *Ситов анализ на трите продукта от пресяването след оптимизиране на захранването на рудата в процеса на трошене.*

Клас, mm	Захранване	Надситов продукт	Подситов продукт
	Добив, %		
+60	3.0	5.4	0.0
-60 + 35	6.4	10.9	0.0
-35 + 15	25.6	41.5	0.0
-15 + 10	37.9	39.6	18.4
-10 + 6.7	9.5	1.7	21.2
-6.7 + 4.75	4.0	0.2	12.1
-4.75 + 3.35	3.5	0.1	10.3
-3.35	10.1	0.6	38.0
Общо	100.0	100.0	100.0

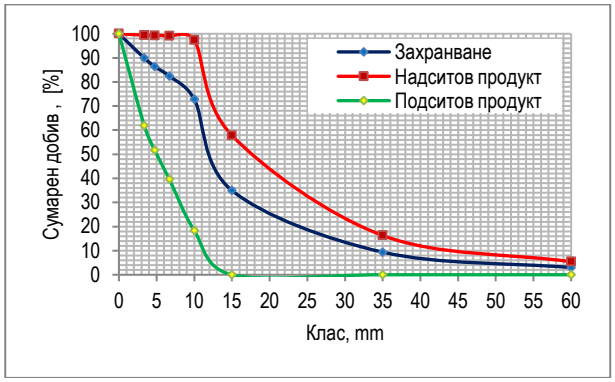
Въз основа на получените данни е построена зърнометрична характеристика на подситовия продукт, след регулиране на оборотите на пластинчатия питател (Фиг. 6).



Фиг. 6. Зърнометрична характеристика на подситов продукт от пресяването на вибрационното сито след регулиране на оборотите на пластинчат питател

На фиг. 6 са показани стойностите на подситовия продукт в класовете „-15 mm” и „-10 mm”, съответно 100.0 % и 81.6 %.

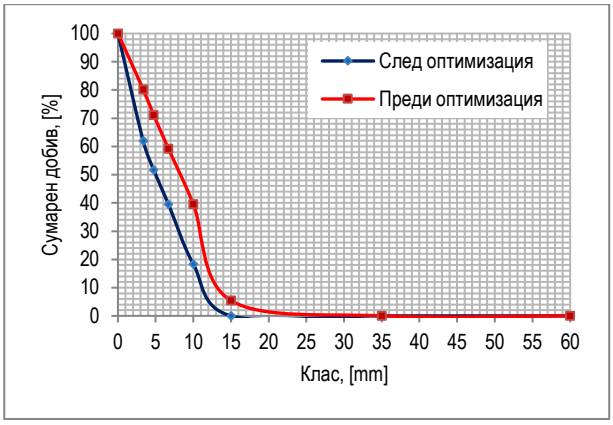
Построени са криви на сумарните добиви „по +” на трите продукта от пресяването – захранване, подситов продукт и надситов продукт (Фиг. 7).



Фиг. 7. Криви на сумарни добиви „по +” в продуктите – захранване, надситов продукт и подситов продукт след регулиране на оборотите на пластинчат питател.

За сравнение на ефективността на пресяване на вибрационното сито, са построени двете криви на подситовите продукти, постъпващи за последваща преработка на рудата, преди и след оптимизиране подаването на рудата в процеса на трошене (Фиг. 8).

От графиката се вижда, че след внедряване на честотния преобразувател за оптимизиране оборотите на пластинчатия питател, ефективността на пресяване се увеличава.



Фиг. 8. Ефективност на пресяване в подситовите продукти преди и след оптимизиране подаването на руда в процеса на трошене.

Изчислена е ефективността на пресяване по следната формула:

$$E = \frac{a-b}{a(100-b)}10^4, \% \quad (1)$$

Където:
E – ефективност на пресяване, %,
a – количество материал в изходната руда,
b – количество материал в надситов продукт.

Получените резултати за ефективността на пресяването са представени в таблица 3.

Таблица 3. *Ефективност на пресяване преди и след оптимизиране на захранването на руда в процеса на трошене.*

Клас, mm	Ефективност на пресяване преди оптимизация [%]	Ефективност на пресяване след оптимизация [%]
-60 + 35	72.71	46.00
-35 + 15	69.14	46.89
-15 + 10	59.04	60.78
-10 + 6.7	88.77	92.84
-6.7 + 4.75	84.52	95.56
-4.75 + 3.35	79.21	95.47
-3.35	73.53	94.71

Получените данни показват, че ефективността на пресяване след оптимизиране подаването на рудата в класовете под 15 mm е по-висока, като в класовете под 10 mm тя е над 90 % (Табл. 3).

Технико-икономически показатели на трошачно отделение преди и след оптимизиране подаването на руда в процеса на трошене

- Установява се с около 41.5 % по-висока ефективност на пресяване на рудата с оптимизиране работата на пластинчатия питател, в сравнение с преди оптимизацията.
- Клас „-15.0 + 0.0 mm” натрошена руда, получаван с регулиране на оборотите на питателя представлява 100 %, докато преди регулиране на оборотите, той е 94,6% (Табл. 1, 2; Фиг. 3, 6).

- Клас „-10.0 + 0.0 mm” натрошена руда, получаван с регулиране на оборотите на питателя представлява 81.6 %, докато преди регулиране на оборотите, той е 60.4% (Табл. 1, 2; Фиг. 3, 6).
- Времето за натрошаване на рудата с регулиране на оборотите на пластинчатия питател се съкращава от 7.5 на 5.5 часа на смяна, което довежда до по-нисък разход на електроенергия, както и възможност за отстраняване на дефекти и аварии през съответната смяна.
- По-високата ефективност на пресяване на рудата с въведената оптимизация, чрез монтиране на честотен преобразувател на пластинчатия питател и регулиране на неговите обороти, оказва благоприятно влияние на следващите процеси по веригата – смилане и флотация, като се увеличава производителността на мелничното отделение, намалява се разходът на мелничния товар (стоманени топки с диаметър ø90 и ø80) и се постига по-добро разкриване на рудните минерали.

Чрез внедряването на иновативна техника се постигнаха няколко технологични решения:

- Оптимизирано управление на подаването на руда, което регулира потока на материала, в зависимост от натоварването на ситото.
- Оптимизация на зърнометричния състав на подавания материал, което намалява натоварването върху последващите процеси на обогатяване.

Изводи

Внедряването на иновативни технологии в процесите на трошене и пресяване подобрява ефективността на обогатяване на минералните суровини. Постигнатите резултати показват, че оптимизацията на тези процеси повишава производителността на ОФ, като в същото време редуцира производствените разходи, допринася за устойчивото управление на ресурсите и минимизира загубите на метали в технологичните отпадъци.

Литература

Мочев, Д., И. Григорова (2013). *Зърнометрична подготовка на суровините*. Изд. Къща “Св. Иван Рилски“, 419 стр., ISBN 978-954-353-204-9

Мочев, Д., И. Григорова (2014). *Практикум по зърнометрична подготовка на суровините*. Изд. къща“Св. Иван Рилски“, 220 стр., ISBN 978-954-353-248-3

Мочев, Д., И. Григорова (2015). *Въведение в теорията и практиката на рудоподготовка и преработка на минерални суровини.* Изд. къща „Св. Иван Рилски”, 418 стр., ISBN 978-954-353-274-2

Andoh, P. Y., E. O. A. Acheampong, A. Agyei-Ageymang, P. O. Taiah, N. N. Andoh (2021). Optimizing the weight clogged of a vibrating screen during mining operations. *Journal of Science and Technology* (KNUST), 39,.1&2, 10-23

Balasubramanian, A. (2017) *Ore separation by screening,* Technical Report (Report number 2), 1-10. University of Mysore DOI: 10.13140/RG.2.2.14773.68325

Terziyski, D., E. Aleksandrova, D. Kaykov. 2021. Possibilities for improving rock fragmentation in limestone quarries. *XVI International Conference of the Open and Underwater Mining of Minerals*, 6-10 September 2021, Varna, Bulgaria, pp. 32-36

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE THERMAL FIELD GENERATED BY THE UNDERLYING SURFACE ON THE DISPERSION OF PARTICULATE MATTER IN THE ATMOSPHERE OF OPEN-PIT MINES AND QUARRIES

Plamen Savov, Hristian Tsankov, Maiya Vatzkitcheva, Milena Begnovska, Nikolay Kolev, Stanislav Topalov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia

ABSTRACT. The process of extracting minerals in open pit mines is almost always associated with the emission of considerable amounts of particulate matter. Under certain weather conditions, these fine particles can disperse in significant concentrations far from the source. However, high levels of contamination are predominantly observed primarily in the mine atmosphere. The experiment discussed in this report was conducted in an open-pit coal mine in the area of the town of Pernik. The aim of the work is to investigate the influence of convective ventilation processes in open pit mines and quarries depending on the specifics of the thermal field of the underlying surface. The parameters and evolution of this field depend mainly on three factors: the meteorological situation, the geometry, and the thermodynamic parameters of the underlying surface of open pit mines and quarries. The work compares the dispersions of particulate matter in the mine area and over a flat area. The study shows that the shape of the underlying surface significantly changes the type of thermal field and causes different intensity and power of particle dispersion in the atmosphere. This, in turn, leads to more difficult ventilation of the atmosphere in the mine and is a prerequisite for exceeding concentrations above the maximum permissible standards, especially during meteorological situations leading to stagnation of atmospheric movements.

Key words: particulate matter, dispersion, open pit mines, thermal field.

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ТЕРМИЧНОТО ПОЛЕ, ГЕНЕРИРАНО ОТ ПОДЛОЖНАТА ПОВЪРХНОСТ, ВЪРХУ ДИСПЕРСИЯТА НА ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ В АТМОСФЕРАТА НА ОТКРИТИ РУДНИЦИ И КАРИЕРИ

Пламен Савов, Християн Цанков, Майя Вацкичева, Милена Бегновска, Николай Колев, Станислав Топалов

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

РЕЗЮМЕ. Процесът на добив на полезни изкопаеми от откритите рудници почти винаги е свързан с емисията на значителни количества фини прахови частици. При определени метеорологични условия тези частици могат да се разпространят със значителна концентрация далеч от източника. Най-често обаче високи нива на замърсяване се наблюдават основно в атмосферата на рудника. Дискутираният в доклада експеримент е проведен в открит рудник за добив на въглища в района на гр. Перник. Целта на работата е да се изследва влиянието на процесите на конвективно проветряване на открити рудници и кариери в зависимост от спецификата на термичното поле на подложната повърхност. Параметрите и еволюцията на това поле зависят основно от три фактора – метеорологичната ситуация, геометрията и термодинамичните параметри на подложната повърхност. В работата е направено сравнение между дисперсиите на фини прахови частици в района на рудника и над равнинна местност. Показано е, че формата на подложната повърхност в рудника съществено променя вида на термичното поле и предизвиква различна по интензитет и мощност дисперсия на частиците в атмосферата. Това от своя страна води до по-трудно проветряване на атмосферата и е предпоставка за надвишаване на концентрациите над пределно-допустимите норми – особено по време на метеорологични ситуации, водещи до стагнация на атмосферните движения.

Ключови думи: прахови частици, дисперсия, открити рудници, термично поле.

Въведение

Минно-добивните и преработвателни комплекси емитират значителни количества фини прахови частици в атмосферата както на самите предприятия, така и в тази на околните райони. Това засяга работещите в откритите рудници/мини и населението на близко разположените поселища чрез високи концентрации на аерозолни замърсители. Основните дейности, генериращи големи количества прах в откритите разработки, са пробивните, взривните, товаро-разтоварните, транспортните (Chen et al., 2015, Zhao et al., 2021) и преработвателните (ако се извършват на място). Наблюдават се и случаи на спонтанно запалване на въглищата (Murzin and Gorlenko, 2021), при което се отделя серен диоксид с опасна концентрация, но това не е тема на настоящата публикация.

За да се установят естествените процеси, свързани с метеорологичните условия, водещи до превишаване на допустимите норми по отношение на количествата ФПЧ, е важно да се изследват факторите, подпомагащи и/или възпрепятстващи конвективното проветряване на откритата мина. Един от тези фактори е термичното поле на подложната повърхност. Параметрите и еволюцията на това поле зависят основно от метеорологичната ситуация, геометрията и термодинамичните параметри на повърхността. Значимостта на тези фактори е изследвана и представена в множество научни публикации (Cuifeng et al, 2022, Kia et al., 2021, Тимофеева и др., 2020, Li et al., 2023).

Експеримент

Дискутираният в публикацията експеримент е проведен в открита мина за добив на въглища в района на гр. Перник на 25.06.2024 г. Метеопараметрите, които са изследвани, са температура и относителна влажност на въздуха, скорост и посока на вятъра, атмосферно налягане и слънчева радиация. Геометрията и нагряването на проучвания участък са определени чрез ортофото и термографско дистанционно заснемане с помощта на дрон.

За откриване на особеностите на терена на рудника, които влияят върху концентрацията на ФПЧ, е направено сравнение между дисперсиите на частиците в рудника и над равнинна местност.

Място на провеждане

Измерванията са проведени в участък „Брикетна фабрика“, който се намира в централната част на Пернишкия въглищен басейн (Фиг. 1).



Фиг. 1. Общ изглед на участък „Брикетна фабрика“

От източната и северната страна граничи с рекултивирани терени, на юг са разположени залесени насипища, а на запад граничи със земеделски имоти. Участъкът е разположен в район „Брикетна фабрика“, източно от пътя Перник – Брезник. Районът заема площи в землищата на с. Дивотино и гр. Перник. Граничи с квартал „Стара чешма“ и отстои на около осемстотин метра от кв. „Проучване“.

Въглищата, които се добиват от находище „Пернишки въглищен басейн“, се определят като блестящи кафяви с предимно ивичеста структура. Покриващите скали са изградени главно от меки и по-плътни глинести мергели и глинести шисти. На места има малки количества отпадъчен продукт от производството на бившата „Брикетна фабрика“ – шлам.

За ортофото и термографско заснемане е избрана зона с югозападно изложение, разположена в периферията на рудника (звездата на фиг. 1). Повърхността на зоната е заснета с термовизионната камера на дрона в три последователни мисии през около час. Допълнително са направени обзорни термографски заснемания на целия рудник. Подробности за мисиите са обобщени в Таблица 1.

Метеопараметрите и концентрациите на ФПЧ са измерени в същия район (звездата на фиг. 2).



Фиг. 2. По-едър план на експерименталния район (долу вдясно се виждат автомобилите на групата)

По време на мисиите не са използвани наземни контролни термометрични точки за калибрация на аеротермографските данни. За целта е използван автокалибрационният алгоритъм на термовизионната камера. Получените по този начин стойности за температурите са относителни, но интервалните разлики – постоянни.

Таблица 1. *Мисии на дрона*

Мисия	Начало	Край	Изображения
I	8:51	9:03	310
II	9:45	9:53	198
III	10:36	10:44	204

Използвани уреди и инструменти

Дистанционното наблюдение на изменението на топлинното излъчване на минния скат е извършено с помощта на дрон DJI Mavic 3T Enterprise. Квадрокоптерът Mavic 3T RTK на DJI е безпилотен, дистанционно управляван, професионален летателен апарат с термокамера. С механичен затвор, хибридно увеличение 56×, 640x512px термокамера, RTK модул за прецизност до сантиметър и продължително време за полет, Mavic 3T е изключително ефективен за картографиране, наблюдение и дистанционно изследване на различни обекти.

Уредите за метеорологични измервания и за определяне на концентрациите на ФПЧ са използвани и в други проучвания на колектива. Характеристиките на многофункционалната метеостанция PCE-FWS 20-1 и на лазерните броячи на частици (шестканален PC 200 Trotec и двуканален BQ 20 Trotec) могат да се видят в (Vatzkitcheva et al., 2023).

Резултати и дискусия

Обработка на термограмите

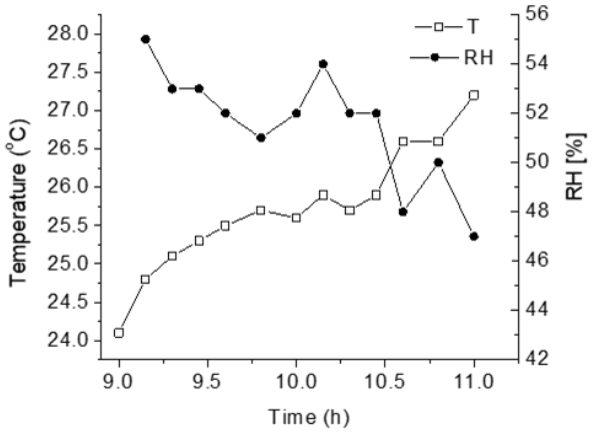
Данните от летателните мисии на дрона са трансформирани в термални геотифове, които са обработени със софтуер за автоматична триизмерна фотограметрия с цел създаване на интегрален повърхнинен модел на заснетия участък. Като краен резултат са генерирани цифрови повърхнинни модели (DSM) на повърхността на изследвания участък с вградени относителни стойности на повърхностната температурна радиация в момента на заснемането.

Температурния диапазон на обзорните термограми е ограничен в интервала 20°C – 40°C. Допълнително са зададени стойности за условна височина на полета >25 m, влажност 96%, излъчвателна способност 0,95 и отразена температура 54°C.

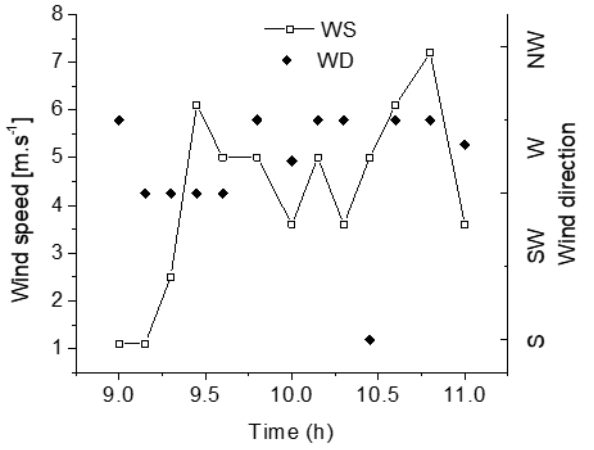
Метеорологични данни

На следващите няколко фигури (3 – 6) са представени данните от еволюцията на метеорологичните параметри в атмосферата на открития рудник. На фиг.3 е показан ходът на температурата и относителната влажност. Вижда се, че в интервала на измерване от 9:00 до 11:00 часа температурата нараства от 24 до около 27 градуса, а относителната влажност – спада с около 10%.

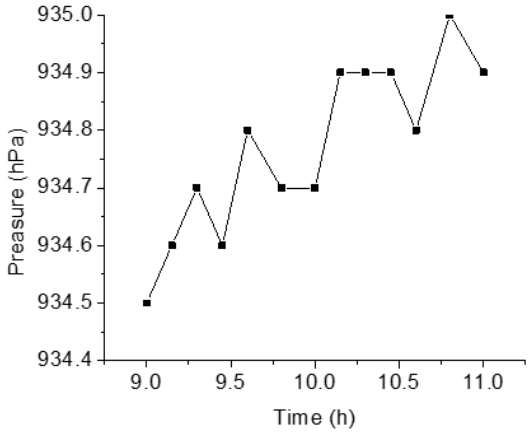
Данни за посоката и скоростта на вятъра са представени на фиг. 4. В интервала на измерване се вижда, че вятърът има почти постоянна посока с ориентация от запад – северозапад, а скоростта му е променлива и е в диапазона 1 – 7 m/s. Атмосферното налягане (фиг. 5) остава почти без промяна в разглеждания период, като е в диапазона от 934,5 до 935 hPa.



Фиг. 3. Температура и относителна влажност на въздуха



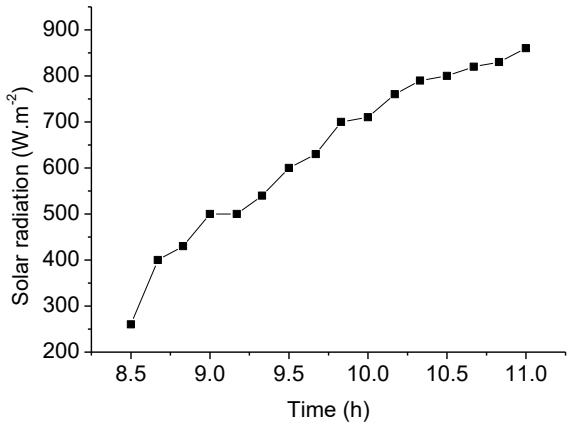
Фиг. 4. Скорост и посока на вятъра



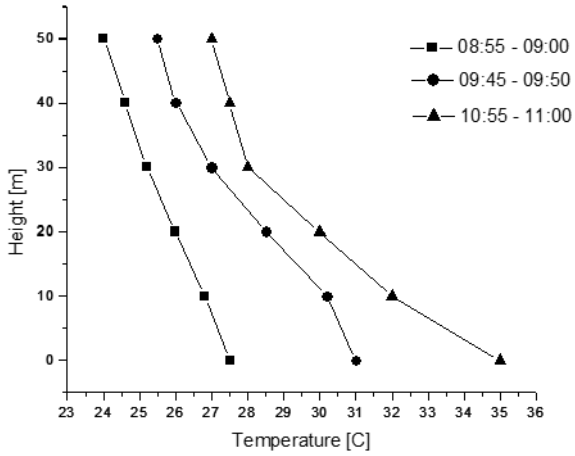
Фиг. 5. Атмосферно налягане

Еволюцията на слънчевата радиация в периода на измерване е показана на фиг. 6. Вижда се, че в рамките на около 2,5 часа радиацията нараства от 250 до 900 W/m^2.

На фиг. 7 са представени данните за вертикалния профил на температурата на въздуха в слоя от повърхността на земята до около 50 m височина. Видът на профилите предполага наличието на развита термична турбулентност. Вижда се, че приземните слоеве се затоплят значително по-бързо от тези във височина.



Фиг. 6. Слънчева радиация



Фиг. 7. Вертикални профили на температурата на въздуха

Температурата на въздуха при земята се променя с повече от 7 градуса за периода на измерване, докато на 50 m температурата нараства само с около 4 градуса.

Първото изображение е направено около 9:00 (Мисия I), второто – около 9:50 (Мисия II) и третото – около 10:40 часа (Мисия III).

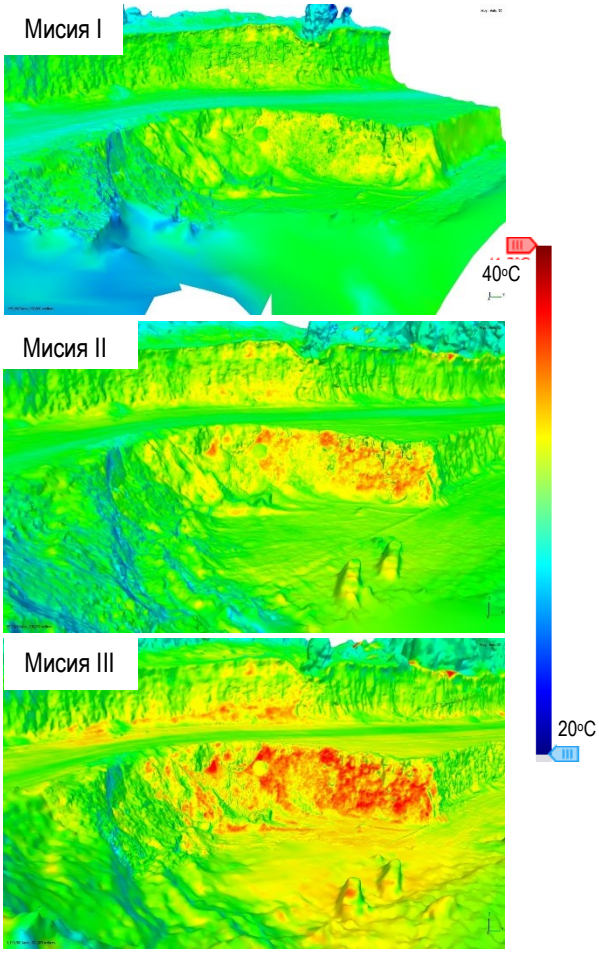
На изображенията ясно се вижда повишаването на температурата на повърхността на склона с напредване на деня. По-топлите участъци са представени с по-тъмен цвят. Първоначално температурата на скалите от повърхността на склона е била около 28 – 29 градуса, а след около 2 часа тя достига 35 – 36 градуса.

На следващата фигура 8 са представени термичните карти на част от северните склонове на рудника.

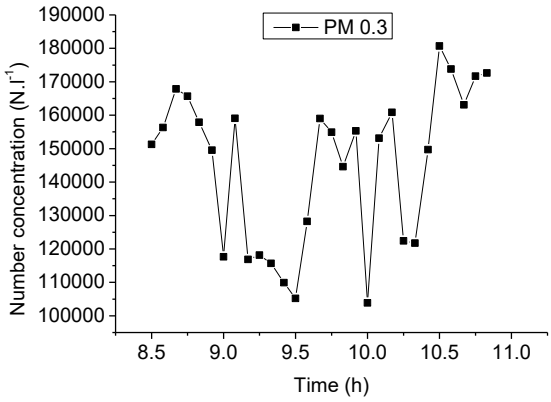
Числена и масова концентрация на ФПЧ

Информация за еволюцията на числената концентрация на финитe прахови частици в атмосферата на рудника е дадена на фиг. 9 - 11. На първата графика е представено развитието във времето на най-финатa фракция PM 0,3 (частици със среден аеродинамичен диаметър 0,3 микрона).

Вижда се, че техният брой се променя в интервала от 10^5 до около $1{,}8.10^5$ частици на литър въздух.



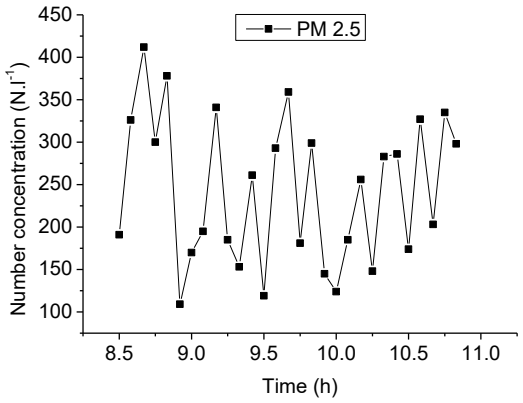
Фиг. 8. Термографски изображения с изглед към изследвания участък



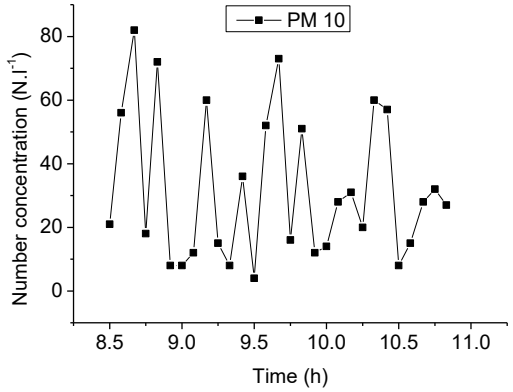
Фиг. 9. Числена коцентрация на PM 0. 3

Концентрацията на частиците от средната фракция (PM 2,5) варира в диапазона от 100 до 400 (фиг. 10), а тази на едромащабните прахови частици се движи в интервала от 10 до около 80 частици на литър въздух (фиг. 11).

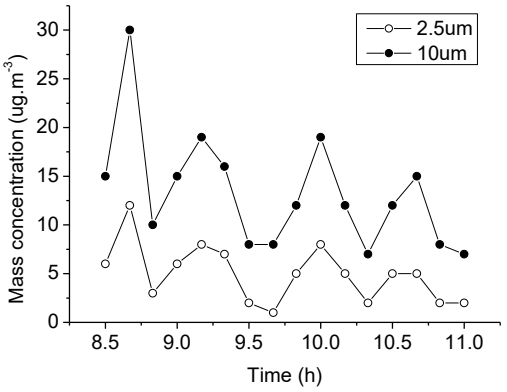
Масовата концентрация на частиците в периода на измерване (фиг. 12) е в рамките на няколко микрограма на кубичен метър въздух за фината фракция (PM 2,5) и около 15 микрограма за грубодисперсната част (PM 10).



Фиг. 10. Числена коцентрация на PM 2.5



Фиг. 11. Числена коцентрация на PM 10



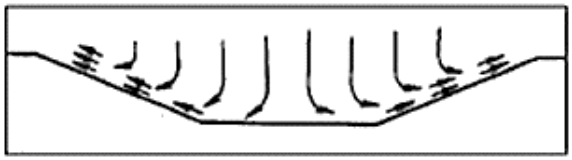
Фиг. 12. Масова коцентрация на PM 2.5 и 10

Анализ на експерименталните резултати

През периода на измерване преобладава ясно и слънчево време. Нарастването на слънчевата радиация в диапазона от около 300 до 900 W/m^2 предизвиква нагряване на повърхността на склоновете в района от 28 до над 35 °C. Ако се приеме, че денонощните колебания на температурата проникват на около 0,5 метра в дълбочина, при тази скорост на нагряване следва, че топлинния капацитет на скалите е около 850 J/kg.K.

Нагряването на повърхността на рудника води до постепенното нагряване на въздуха в неговия обем. Първоначалната разлика между температурата на земната повърхност в началото на експеримента и прилежащия

слой въздух е около 4 градуса, като към обяд тя достига до около 10 градуса. Това дефазиране се дължи на факта, че значителна част от топлината на скалите отива за формиране на вертикални топлинни потоци, които от своя страна нагряват по-високите слоеве въздух (фиг. 7). Вертикалните профили на температурата показват, че за около 2 часа слоевете въздух на височина около 50 m достигат температурата на приземния слой. Цялата тази енергия на падащата слънчева радиация води до формиране на т. нар. конвективна схема на циркулация (Никитин и Битколов, 1975). За нея е характерно формирането на плавни възходящи въздушни потоци от топъл въздух, изкачващи се нагоре по склоновете на рудника (фиг.13).



Фиг. 13. Конвективна схема на проветряване

Скоростта на възходящия поток се определя от интензивността на нагряване на съответния борд, неговия ъгъл на наклон и от минералния състав. Ориентировъчно скоростта на възходящите въздушни потоци може да бъде пресметната по формулата (Бересневич и др., 1990).

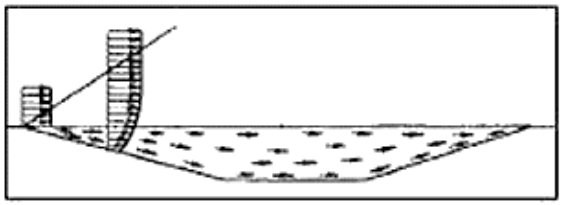
$$v = 0{,}06\sqrt{g(H-h)\left(\frac{t_п}{t_в}-1\right)\sin\alpha},$$

където H е дълбочината на кариерата, h е височината на точката над дъното, за която се изчислява скоростта, $t_п$ е температурата на повърхността на склона, $t_в$ е температурата на въздуха на повърхността на кариерата, α е ъгълът на наклона на съответния склон.

При заместване на съответните параметри на рудника и съответните температури в уравнението за скоростта на потоците по склона в началото на експеримента се получават скорости от около 0,2 – 0,3 m/s, като в края на измерванията скоростта нараства до едва 0,5 – 0,6 m/s. Тези стойности са твърде малки за да се наблюдава ясно изразена конвективна схема.

Експерименталните изследвания са показали, че ако скоростта на повърхността на рудника е над 2 – 3 m/s, споменатата по-горе конвективна схема се размива и се формира т. нар. правопоточна схема на проветряване на атмосферата (фиг. 14). В нашият случай след 9:30 часа скоростта на вятъра, измерена от метеорологичната станция е в диапазона 3 – 7 m/s. Следователно може да се твърди, че наблюдаваната схема е правопоточна, като посоката на вятъра е с преобладаваща западна компонента, докато, ако беше се оформила конвективната схема, посоката на вятъра трябва да бъде в случая с преобладаваща североизточна компонента – което не се наблюдава.

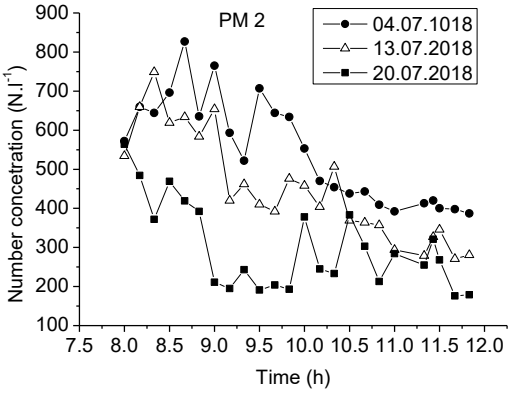
Множеството експериментални изследвания са показали, че обикновено сутрин, след изгрева на слънцето, започва развитието на конвективен слой на смесване в атмосферата, който от своя страна води до намаляване на концентрацията на финитe прахови частици. На фиг. 14 са представени графиките на еволюцията на PM 2 измерени в град София за три различни летни дни. Ясно се вижда тенденцията на промяна в концентрацията, като в периода на измерване тя намалява 2 -3 пъти.



Фиг. 14. Правопоточна схема на проветряване

Въпреки наличието на сравнително силен фонов вятър и отсъствието на приземна температурна инверсия (фиг. 7) в атмосферата на рудника се поддържа почти еднаква във времето концентрация на броя на финитe прахови частици и при трите фракции (Фиг. 9 – 11). Разликата между вида на еволюция на концентрацията на праховите частици в района на град София (фиг.15) и тази в рудника в района на град Перник би могла да се дължи основно на два фактора. От една страна, теренът в София е стравнително равнинен, докато в рудника е силно пресечен. Това значително възпрепятства разсейването на примесите и изчистване на атмосферата с напредването на деня. От друга страна, на около 20 – 30 метра от района на измерване беше разположен път по който на всеки 5 – 6 минути минаваха товарни камиони, които извозваха изкопаните по-долу въглища. Това се явява допълнителен и постоянен източник на аерозол.

Важно е да се отбележи, че въпреки по-слабата възможност за проветряване на атмосферата на рудника в района на гр. Перник и поддържането на почти еднаква концентрация, по абсолютни стойности тази концентрация в началото на деня е около 2 пъти по-ниска от тази в гр. София (фиг. 15), като стойностите в двата разглеждани района се изравняват едва около обяд.



Фиг. 15. Числена коцентрация на PM 2 за град София

Поведението при масовата концентрация наподобява това в района на град (равнинен терен). От фигура 12 се вижда, че тя намалява около 2 пъти. Това би могло да се дължи на факта, че с напредване на деня и развитието на термичната и динамична турбулентност преобладаващото количество фини прахови частици, които се емитират по-интензивно и се задържат по-дълго в атмосферата са с по-ниска плътност от тези в началото.

Изводи

На базата на анализа на наличните експериментални данни от проведения експеримент в атмосферата на открития рудник за въглища в района на гр. Перник могат да се направят следните изводи:

- Въпреки наличието на интензивна слънчева радиация се наблюдава сравнително бавно затопляне на въздуха във височина. Причината е, че значителна част от топлинната енергия се изразходва за формиране на приземни потоци топъл въздух, издигащи се по склоновете на рудника (конвективна схема). Тези потоци отнемат съществена част от дебита на вертикалната термична турбулентност и забавят скоростта на затоплянето на въздуха във по-високите слоеве.
- За разлика от равнинната градска зона, аерозолната концентрация на броя фини прахови частици в атмосферата на рудника остава почти постоянна с напредването на деня. Причината за тази разлика се дължи основно на орографията на терена на рудника – силно пресечена местност, която възпрепятства дисперсията на аерозола.
- Намаляването на масовата концентрация на фините прахови частици навежда на мисълта, че с напредването на деня в атмосферата на рудника започват да преобладават все повече фини прахови частици с по-ниска плътност.

Благодарности
Провеждането на експерименталната кампания беше финансово обезпечено от средствата по Договор ГПФ [1]256/01.04.2025 г. към НИС-МГУ.

Литература

Бересневич, П., Михайлов В., Филатов С., 1990. Аэрология карьеров, Москва, Недра.

Никитин В., Битколов Н., 1975. Проветривание карьеров. Москва, Недра.

Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Долкан А.А., Попов Е.В., (2020) Способы проветривания карьеров. Вестник Евразийской науки, том 12, №6.Software Maintenance, 2-6 October 2002, Montreal, Canada (pp. 120–129). doi xxx (if available)

Chen J., Jiang Z., Wang M., (2015). Numerical simulation and experimental research on dust concentration distribution in belt conveyer roadway. *Journal of Hunan University*, 42.6: 127-134.

Cuifeng D., Wang J., Wang Y. (2022). Study on environmental pollution caused by dumping operation in open pit mine under different factors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol: 226, p. 105044. doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105044

Kia, S., Flesch, T.K., Freeman, B. S., Aliabadi, A. A., (2021). Atmospheric transport over open-pit mines: The effects of thermal stability and mine depth. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol: 214, p. 104677. doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104677

Li, L., Zhang, R., Li, Q. et al., (2023). Multidimensional spatial monitoring of open pit mine dust dispersion by unmanned aerial vehicle. *Sci Rep* 13, p. 6815. doi.org/10.1038/s41598-023-33714-x

Murzin, M. A., Gorlenko, N. V. 2021. Pollutant emission from fires at open-pit coal mines. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 808 012022. doi 10.1088/1755-1315/808/1/012022

Zhao X., Zhao X., Han F., Song Z., Wang D., Fan J., Jia Z., Jiang G. (2021). A research on dust suppression mechanism and application technology in mining and loading process of burnt rock open pit coal mines. *Journal of the Air & Waste Management Association* 71. 12: 1568–1584. doi:10.1080/10962247.2021.1979123

Vatzkitcheva, M, Savov, P., Kolev, N., (*2023*). Specifics of particulate matter dispersion in the atmosphere of a clay quarry. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy,* 58, 4, 749-755.

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR INCREASING GOLD RECOVERY IN COPPER-GOLD ORE PROCESSING IN *DUNDEE PRECIOUS METALS CHELOPECH*

Desislava Sabeva-Domuschieva, Deyan Madanski, Stanislav Dzhamyarov

Dundee Precious Metals Chelopech, Sofia district, Village of Chelopech 2087, Bulgaria

ABSTRACT. The Chelopech Concentrator (part of *Dundee Precious Metals*) is located in central-western Bulgaria. The copper-gold ore processing is carried out in a single stage of "Primary Crushing" using a jaw crusher and is conducted within the underground mine. The crushed material enters for grinding in a semi-autogenous mill. The beneficiation process is flotation, with the flotation section consisting of three stages – bulk, copper, and pyrite sections – which produce copper-gold and pyrite concentrates. Optimisation research was carried out to explore opportunities for increasing gold recovery in the copper concentrate. Three different types of semi-industrial test for gravity gold recovery were conducted: pilot-scale semi-industrial tests with a *Knelson KC-CD12* concentrator, pilot-scale semi-industrial tests with a pilot hydrocyclone, and pilot-scale semi-industrial tests combining the *Knelson KC-CD12* concentrator and the pilot hydrocyclone. Determination of the optimal flotation process flowsheet was based on production and laboratory data. Higher gold grade in the concentrate, but lower overall gold recovery, was achieved from the bulk flotation tailings when using gravity concentration methods. No significant difference in final gold grade and recovery was observed when using pre-concentration with hydrocyclones before the *Knelson KC-CD12* concentrator or without it. Higher copper and gold recoveries were achieved by redirecting approximately 30% of the stream feeding the cleaner flotation directly to the final concentrate, without a significant change in concentrate quality.

Key words: gravity separation, *Knelson KC-CD12* concentrator, hydrocyclone, technological flotation flowsheet, concentration ratio.

ТЕХНОЛОГИЧНИ РЕШЕНИЯ ЗА ПОВИШАВАНЕ ИЗВЛИЧАНЕТО НА ЗЛАТО ПРИ ПРЕРАБОТКА НА МЕДНО-ЗЛАТНА РУДА В „ДЪНДИ ПРЕШЪС МЕТАЛС ЧЕЛОПЕЧ“

Десислава Събева-Домусчиева, Деян Мадански, Станислав Джамяров

„Дънди Прешъс Металс Челопеч“ ЕАД, Софийска област, с. Челопеч 2087, България

РЕЗЮМЕ. Обогатителна фабрика „Челопеч“ (част от „Дънди Прешъс Метълс“) се намира в централна-западна България. Преработването на медно-златна руда се извършва в един стадий „Едро трошене” от челюстната трошачка, като се реализира в подземен рудник, и натрошеният материал постъпва на смилане в полуавтогенна мелница. Използва се флотационен метод на обогатяване, като отделението по флотация се състои от 3 секции – колективна, медна и пиритна секции – които произвеждат медно-златен и пиритен концентрати. Реализирана е оптимизационна инициатива за търсене на възможности за увеличаване на добива на злато в медния концентрат. Проведени са три различни вида полуиндустриални тестове за гравитационно извличане на злато – пилотни полуиндустриални тестове с концентратор „Knelson KC-CD12“, пилотни полуиндустриални тестове с пилотен хидроциклон и пилотни полуиндустриални тестове с Knelson „KC-CD12“ и пилотен хидроциклон. Определянето на оптимална флотационна технологична схема беше реализирано на база производствени и лабораторни данни. По-високо набогатяване на златото, но по-ниско извличане, се постига при отпадък от колективна флотация, използвайки методи за гравитационно обогатяване. Не се наблюдава съществена разлика в крайното набогатяване и извличане на злато, използвайки предварително набогатяване с хидроциклони преди концентратора „Knelson KC-CD12“ или без него. Постигнати са по-високи извличания на мед и злато с пренасочване на около 30% от потока, захранващ пречистна флотация, директно към крайния концентрат, без значителна разлика в качеството на концентрата.

Ключови думи: гравитационно обогатяване, концентратор Knelson „KC-CD12“, хидроциклон, технологична флотационна схема, коефициент на набогатяване.

Въведение

Общи сведения за находище „Челопеч”

Находище „Челопеч” е разположено западно от село Челопеч, на около 85 km източно от гр. София, в южния склон на Стара планина, на границата със Златишката котловина. Надморската височина е приблизително около 700 m над морското равнище. В металогенно отношение находището попада в Елашко-Челопешкото рудно поле, Средногорска металогенна зона. Находище „Челопеч“ се характеризира с медно-златно, масивно сулфидно орудяване, сложен минерален и химичен състав, сложни минерални взаимоотношения и структурно-текстурни особености. В рудите от находището са установени повече от 80 рудни и нерудни минерали, включително четири нови за науката минерали, открити за пръв път в света.

Експлоатацията на находището започва през 1953 г. Това е едно от най-големите медно-златни находища в Европа – както по количеството на доказаните запаси, така и по средното съдържание на полезните компоненти (Au, Ag, Cu) в рудите. Добивът се извършва по подземен способ. Добитата руда се преработва до получаването на медно-златен и пиритен концентрати.

Характеристика на рудата

Добиваните в рудник „Челопеч” руди се характеризират с много разнообразен и сложен минерален състав, като върху рудоподготовката и флотационния процес най-силно влияние оказват структурите на взаимно прорастване на полезните медни минерали. Основна промишлена стойност в челопешката руда имат металите злато, мед и сребро, които понастоящем се добиват в колективен медно-златен арсенсъдържащ и пиритен концентрати.

Медта е представена от значителен брой медсъдържащи фази - първични и вторични медни сулфиди, комплексни, медсъдържащи сулфосоли, оксидни медни минерали. При този състав, повече от 50 % от присъстващият в рудите метал мед е под формата на медно-арсенови сулфосоли, които са носители на вреднияят компонент арсен. Съдържането на мед в добитата руда е в диапазона 0.67- 0.87 %.

Златото в рудите е представено главно от минералите самородно злато и електрум, а много малка част от него присъства под формата на златни телуриди. Самородно злато се съдържа в почти всички рудни минерали. Средното

съдържание на злато в добитата руда е в границите 2.8 – 3.0 g/t, а средното съдържание на сребро е 4.63 - 5.28 g/t.

Рудите от находището съдържат от 15 до 35 процента пирит, който е отложен и тясно свързан с всички останали рудни минерали, носители на полезните компоненти.

Решаващо влияние върху преработката на рудите имат вредните компоненти като сяра със съдържание 11% – 13% и арсен 0.18% – 0.28%. Особено нежелан елемент-примес представлява арсенът, който е вреден компонент за пирометалургичните процеси.

Настояща технологична схема на Обогатителна фабрика „ДПМ-Челопеч”

Трошенето в Обогатителна фабрика (ОФ) „Челопеч” се извършва в един стадий „Едро трошене” от челюстната трошачка като се реализира в подземен рудник. Натрошената руда се транспортира на повърхността чрез система от гумено-транспортни ленти, където се съхранява на табан. Натрошеният материал постъпва за смилане в полуавтогенна мелница, в която е възможно смилането на 275 t/h първично натрошена руда до продукт с размери 80% под 160 µm. Мелницата работи в затворен цикъл с батерия хидроциклони. Пясъците от циклоните се връщат гравитачно към захранващата точка на полуавтогенната мелница, а сливът постъпва в агитатор. След това материалът постъпва на флотация. Отделението по флотация се състои от 3 секции – колективна, медна и пиритна секция.

Пулпът от агитатора се подава на колективна флотация, състояща се от четири 100 кубикови флотационни машини. Камерният продукт се отделя като краен отпадък (отпадък колективна флотация) и се подава в сгъстител за отпадък, а пенният (колективен концентрат) преминавайки през три броя агитатори за осигуряване на достатъчно време за депресия на пирита, захранва цикъла на медна селекция.

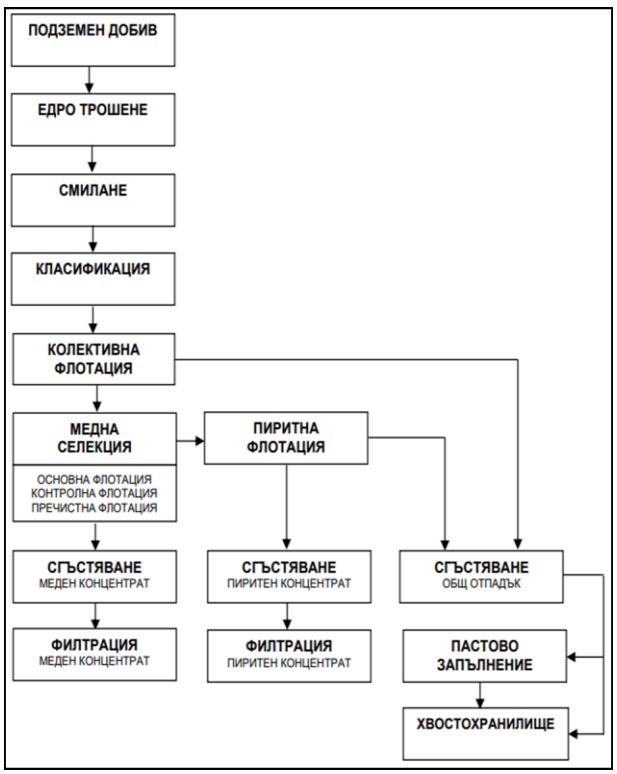
Медната селекция се осъществява в четири броя четирикамерни флотационни машини “Денвер-500” за основна медна флотация, четири броя четирикамерни машини “Денвер-300” за контролна медна флотация и четири броя стъпкови флотационни реактора (SFR) за пречистна флотация. Пенният продукт от основна медна флотация преминава през два етапа на пречистване: I-ва и II-ра пречистка, а камерният захранва контролна на медна флотация. Пенният продукт от контролна на медна флотация се връща в основна медна флотация, а камерният (отпадък контролна медна флотация) е краен отпадък от операцията и захранва цикъла на пиритна флотация или гравитачно постъпва в сгъстител за отпадък. Пречистването на медния концентрат се извършва в четири броя стъпкови флотационни реактора.

Камерният продукт от пречистна флотация се връща в захранване на основна медна флотация. Пенният продукт и от двете пречистки (от SFR 1, SFR 3 и SFR 4) е краен технологичен меден концентрат, който постъпва в сгъстител за меден концентрат.

Пиритната флотация в обогатителната фабрика „Челопеч” се осъществява от 5 броя стъпкови флотационни реактора (SFR). Цикълът на пиритна флотация разделя отпадъка от медна флотация, захранващ секцията, на флотационен пиритен концентрат и флотационен пиритен отпадък. Концентратът от всеки реактор постъпват в сгъстителя за пиритен концентрат. Отпадъкът се транспортира до сгъстителя за отпадък, където се обединява с колективния отпадък.

Концентратът от медната флотация се подава на високопроизводителния сгъстител за меден концентрат. Филтрацията на сгъстения продукт е посредством филтър преса. Влагата на медния концентрат е между 6 - 7%. Концентратът от пиритна флотация се подава на сгъстител за пиритен концентрат. За получаването на краен пиритен концентрат се използва филтър преса като влагата е между 7 - 8%.

Колективният отпадък и пиритният отпадък от различните флотации, се обединяват като общ отпадък и се подават в сгъстителя за отпадък. Част от сгъстения отпадък се транспортира до инсталацията за пастово запълнение, а останалата част се отправя към отпадъкохранилището. Технологична схема на обогатителната фабрика е показана на фигура 1.



Фиг. 1. Настояща технологична схема на обогатителна фабрика „Челопеч“

Материал и методика

От 2022 г. Обогатителната фабрика в „ДПМ-Челопеч“ произвежда концентрат с 10% съдържание на мед, което доведе до значително увеличение на добива на мед и злато, докато извличанията на двата метала при колективна флотацията са се увеличили с по-малко от 1%.

Анализът на постигнатите производствени данни, резултатите от различни лабораторни тестове, както и динамиката на пазара на метали, бяха причината да се започне оптимизационна инициатива за търсене на възможности за увеличаване на добива на злато в медния концентрат.

Инициативата за оптимизация следваше следните стъпки:

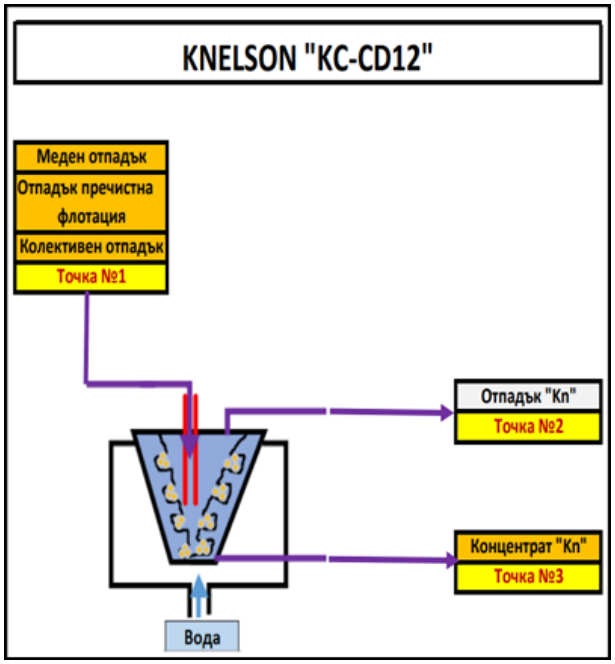
- Полуиндустриални тестове с пилотен концентратор „Knelson KC-CD12“ за изследване на възможността за извличане на злато от различни потоци, където методите за флотация са ограничени.
- Определяне на оптимална технологична схема на флотация за изследване на възможността за увеличаване на извличането на мед и злато в медния концентрат.

Пилотни полуиндустриални тестове с концентратор „Knelson KC-CD12“ и пилотни хидроциклони

Проведени са три различни вида полуиндустриални тестове за гравитационно извличане на злато.

Пилотни полуиндустриални тестове с концентратор „Knelson KC-CD12“.

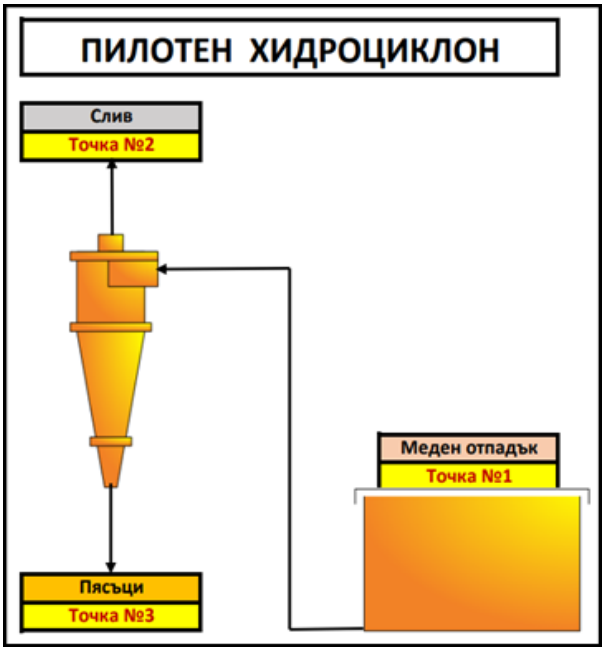
Проведени са 30 полуиндустриални теста върху три различни потока (меден отпадък, отпадък от пречистна флотация и колективен отпадък) с Knelson „KC-CD12“ при различни работни параметри по технологичната схема показана на фигура 2. Основни параметри за определяне на оптималната работа на Knelson „KC-CD12“: време на цикъл, дебит на флудизиращата вода и обороти. На база получените химични анализи са направени изчисления на добив на концентрат, коефициент на набогатяване и извличането на злато и са изведени заключения.



Фиг. 2. Технологична схема на работа с гравитационен концентратор „Knelson KC-CD12“

Пилотни полуиндустриални тестове с пилотен хидроциклон

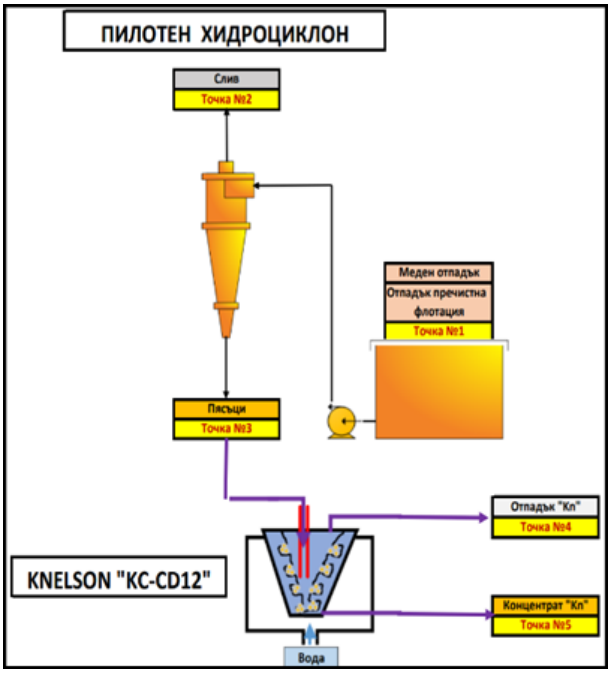
Проведени са 2 полуиндустриални теста с (отпадък от пречистна флотация) с пилотен хидроциклон по технологична схема показана на фигура 3. Основните параметри за определяне на оптималната работа на пилотен хидроциклон са размер на дюзата и работно налягане. На база получените химични анализи са направени изчисления на добив на концентрат, коефициент на набогатяване и извличането на злато и са изведени заключения.



Фиг. 3. Технологична схема на работа с пилотен хидроциклон

Пилотни полуиндустриални тестове с Knelson „KC-CD12“ и пилотен хидроциклон

Проведени са 8 полуиндустриални теста върху два различни потока (меден отпадък и отпадък пречистна флотация) с Knelson „KC-CD12“ и пилотен хидроциклон, използващи най-добрите работни параметри на Knelson „KC-CD12“ по технологична схема показана на фигура 4. На база получените химични анализи са направени изчисления на добив на концентрат, коефициент на набогатяване и извличането на злато и са изведени заключения.



Фиг. 4. Технологична схема на работа Knelson „KC-CD12“ с пилотен хидроциклон

Определяне на оптимална флотационна технологична схема на база производствени и лабораторни данни

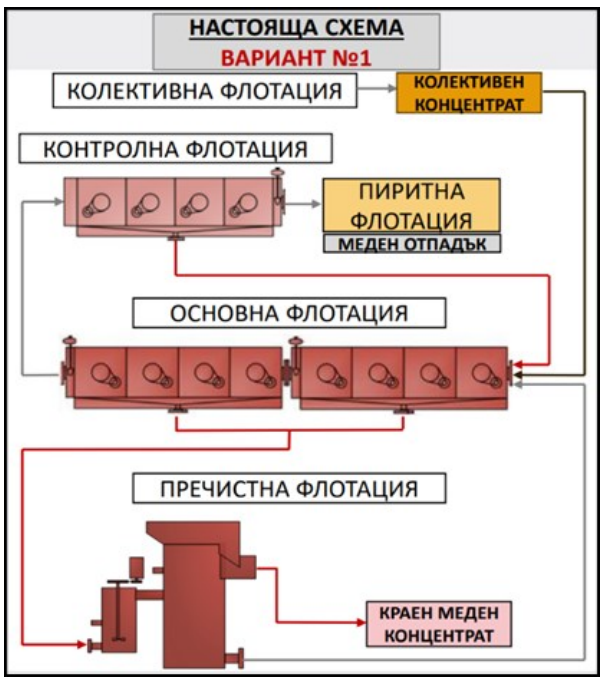
На база извършените анализи на постигнатите производствени данни и резултатите от различни лабораторни данни, дават възможност да се определи оптимална флотационна схема, чрез използването на следните инструменти:

- По-нисък концентрат, по-висок добив.
- Коефициент на набогатяване на Cu и Au – медна секция.
- Извличане на Cu и Au в различни потоци – медна секция.
- Лабораторни тестове за изследване на възможността за производство на краен концентрат директно от основна медна флотация.

За постигане на оптимални производствени резултати са проведени няколко на брой промишлени тестове при 3 различни схеми на основна флотация като е намалено съдържанието на мед в медния концентрат до диапазона (7,8-8,8)%Cu. Тестовете са проведени в 3 основни варианта:

Вариант 1 - Настояща технологична флотационна схема

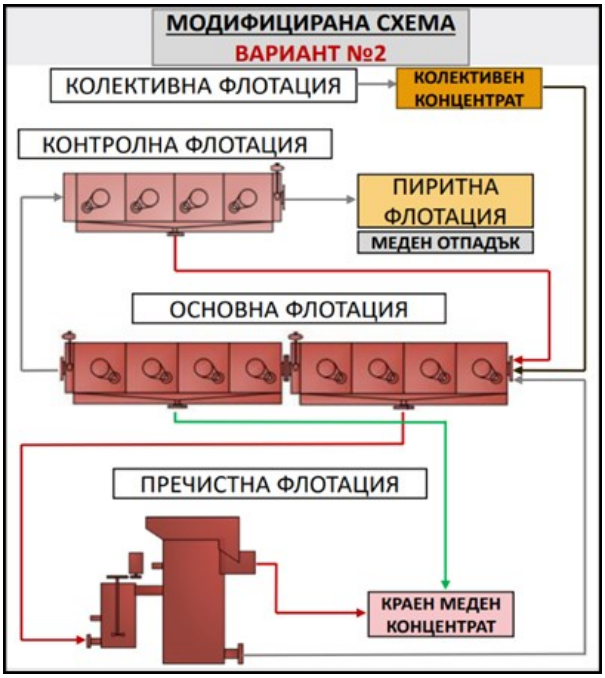
На фигура 5 е показана настоящата флотационна технологична схема в медната селекция по която работи Обогатителната фабрика.



Фиг. 5. Настояща технологична схема на „ОФ-Челопеч“ - Вариант №1

Вариант 2 – Модифицирана технологична флотационна схема

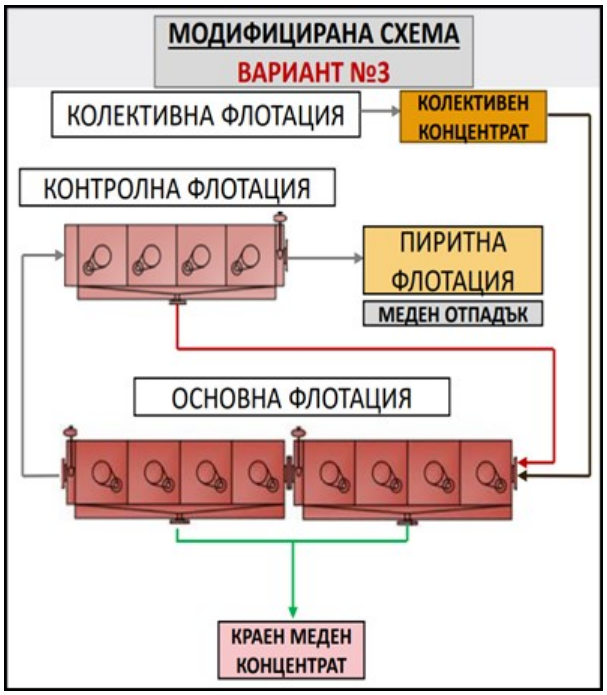
На фигура 6 е показана модифицирана технологична флотационна схема с пренасочване на около 30% от потока захранващ пречистна флотация директно към крайния концентрат.



Фиг. 6. Модифицирана технологична схема на „ОФ-Челопеч“ - Вариант №2

Вариант 3 – Модифицирана технологична флотационна схема

На фигура 7 е показана модифицирана технологична схема с изключване на пречистната секция и производство на краен меден концентрат директно от основна медна флотация.

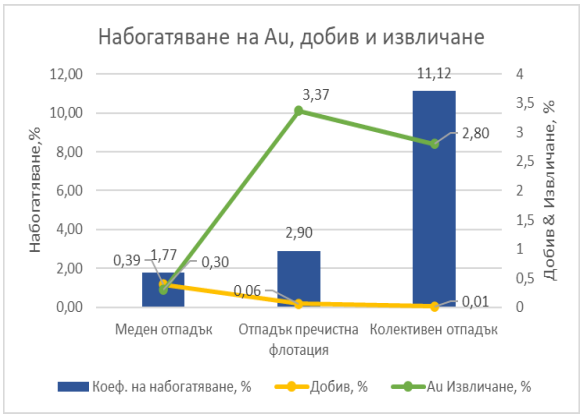


Фиг. 7. Модифицирана технологична схема на „ОФ-Челопеч“ - Вариант №3

Резултати и дискусия

Пилотни полуиндустриални тестове с концентратор „Knelson KC-CD12“ и пилотни хидроциклони

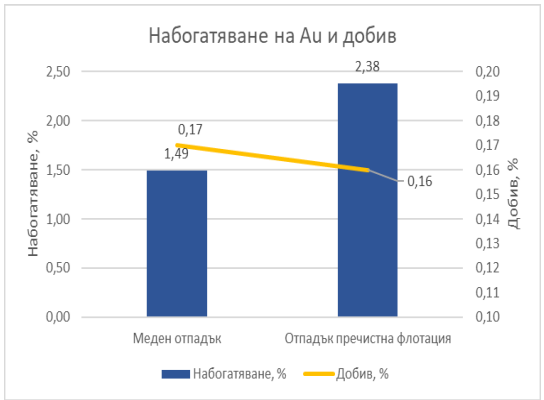
Сравнение на технологичните параметри – добив на концентрат, коефициент на набогатяване и извличането на злато при три различни вида полуиндустриални тестове за гравитационно извличане на злато са представени на фигурите 8,9 и 10.



Фиг. 8. Получени резултати по технологична схема на работа с гравитационен концентратор „Knelson KC-CD12“ при три различни отпадъка



Фиг. 9. Резултати по технологична схема на работа с пилотен хидроциклон с меден отпадък при различен размер на дюзата



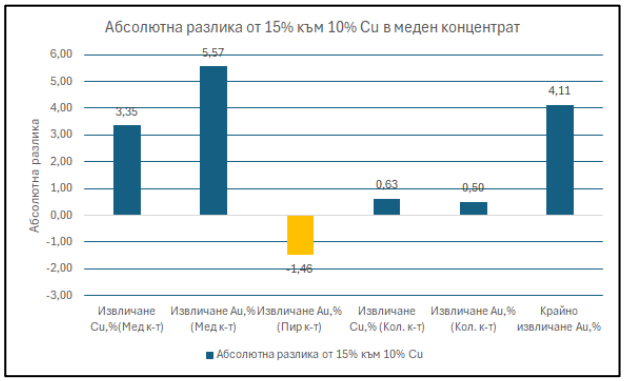
Фиг. 10. Резултати по технологична схема на работа на Knelson „KC-CD12“ с пилотен хидроциклон при два различни отпадъка

Въз основа на получените резултати от лабораторните експерименти могат да се направят следните изводи:

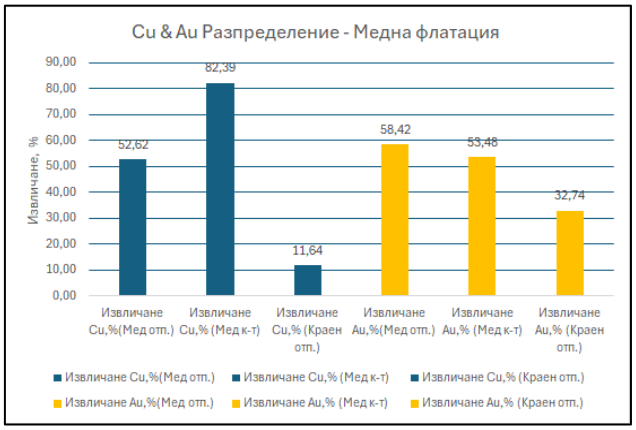
- По-високо ниво на обогатяване на златото при колективния отпадък, повече от 10.
- По-високо извличане на злато при отпадъка от пречистна флотация.
- Най-ниските параметри са постигнати при отпадъка от контролна флотация, въпреки добива.
- Няма съществена разлика между технологични схеми 1 и 3.

Определяне на оптимална флотационна технологична схема на база производствени и лабораторни данни

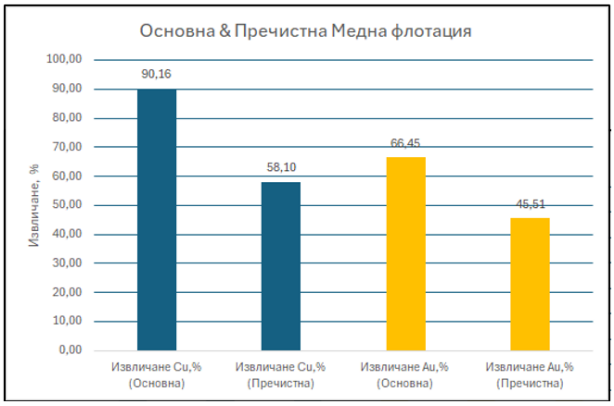
На фигура 11, 12, 13 и 14 са представени получени обобщени технологични резултати от проведените промишлени тестове и лабораторни данни при три различни схеми на основна флотация при намалено съдържанието на мед в медния концентрат до диапазона (7,8 - 8,8)%, Cu.



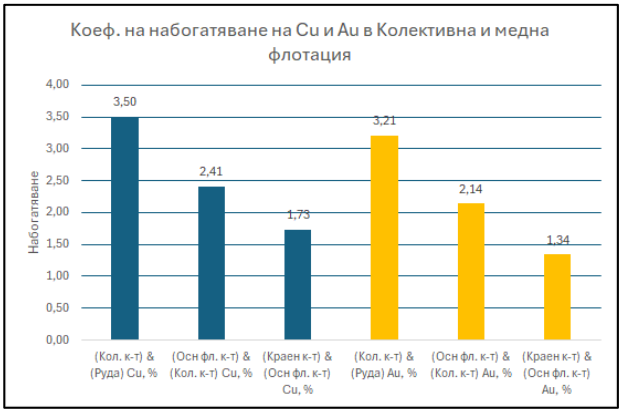
Фиг. 11. Обобщени производствени данни при работа на ОФ при различни съдържания на мед в медния концентрат



Фиг. 12. Разпределение на мед и злато при медна флотация



Фиг. 13. Извличания на мед и злато в основна и пречистна флотация



Фиг. 14. Коефициент на набогатяване на мед и злато в колективна и медна флотация

Въз основа на сравнение на обобщените технологични резултати от всички видове изследвания при три различни схеми на основна флотация могат да се направят следните изводи:

- Постигнато по-високо извличане с 3% Cu и 5% Au, при намаляване на съдържанието на мед в концентрата с 5%.
- Набогатяването на злато в пречистната секция - под 1,5 за производство на концентрат с ниско съдържание.
- Много високо съдържание на злато в циркулиращия отпадък от пречистна флотация.
- Възможно е производство на краен меден концентрат със съдържание на мед в диапазон 8-10% без пречистна секция – лабораторен тест, ако съдържанието на захранващата руда е над 0,6% Cu.
- Лабораторните данни за отпадъка от пречистна флотация доказват по-високите загуби на мед и злато в пречистната секция.

Заключение

Получените резултати от направените анализи на постигнатите производствени данни, резултатите от различни лабораторни, полупромишлени и промишлени тестове, дават възможност да се направят следните заключения:

- По-високо набогатяване на злато, но по-ниско извличане се постига при отпадък от колективна флотация, използвайки методи за гравитационно обогатяване.
- Не се наблюдава съществена разлика в крайното набогатяване и извличане на злато, използвайки предварително набогатяване с хидроциклони преди концентратора „Knelson KC-CD12“ или без него.
- Постигнати са по-високи извличания на мед (0,34%) и злато (2,11%) с пренасочване на около 30% от потока захранващ пречистна флотация директно към крайния концентрат, без значителна разлика в качеството на концентрата.

Литература

Балтов, И., И. Дончев. (2012). *Георесурси и технологии за преработка на златни и златосъдържащи руди в България*. Геология и минерални ресурси. София.

Копалкар, А.,Р Лапланте (2007). *Влияние на работните променливи в концентраторите на Knelson*. Пилотно проучване.

Киао Чен, Хонг-инг Янг, Лин-Лин Тонг (2020). *Изследване и приложение на концентратор Кнелсън*. Пилотно проучване.

Мочев, Д., Григорова, И., И. Нишков (2018). *Гравитационни методи за обогатяване и рециклиране на суровини*, Изд. Авангард Прима, ISBN 978-619-239-100-3.

Попов, П., Стр. Страшимиров, К. Попов, М. Каназирски, К. Богданов, Р. Радичев, С. Димовски, С. Стойков. (2012) *Геология и металогения на Панагюрския руден район*, 227 стр. Изд. къща “Св. Иван Рилски“, 228 с.

Стоев, С. (1988) *Гравитационни методи за обогатяване на полезни изкопаеми*. Печатна база при Министерството на културата, науката и просветата.

STRESSES AROUND A TUNNEL PASSING THROUGH A LAYERED ROCK MASS

Violeta Trifonova-Genova, Gergana Tonkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: violeta.trifonova@yahoo.com; gtonkova@mgu.bg

ABSTRACT: The article addresses the issue of determining the stresses around a tunnel with a circular cross-section. It passes through several rock layers. The boundary planes between the layers are arbitrarily inclined relative to the tunnel axis. Furthermore, the planes are parallel to the horizontal axis of the tunnel cross-section. The specified class of problems is solved through complex potential theory and an approach from the mechanics of layered media. The expressions for the stresses in the layers have been obtained. The results are applied to a real rock massif consisting of three isotropic layers. The normal tangential stresses at points of the tunnel cross-section in each layer are obtained. Three diagrams of these stresses are given.

Key words: complex potential theory, mechanic of layered media, tunnel.

НАПРЕЖЕНИЯ ОКОЛО ТУНЕЛ ПРЕМИНАВАЩ ПРЕЗ НАПЛАСТЕН СКАЛЕН МАСИВ

Виолета Трифонова-Генова, Гергана Тонкова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ: В статията се разглежда въпроса за определяне на напреженията около тунел с кръгово напречно сечение. Той преминава през няколко скални пласта. Граничните равнини между пластовете са произволно наклонени спрямо оста на тунела. Освен това, равнините са успоредни на хоризонталната ос на напречно сечение на тунела. Указаният клас задачи се решава с комплексна потенциална теория и подход от механика на напластените среди. Получени са изразите за напреженията в пластовете. Резултатите са приложени за реален скален масив, Той се състои от три изотропни пласта. Получени са нормалните тангенциални напрежения в точки от сечението на тунела във всеки пласт. Дадени са три диаграми на тези напрежения.

Ключови думи: комплексна потенциална теория, механика на напластените среди, тунел.

Introduction

The rock massif is an environment with different layers. The material of each of them has different mechanical parameters. A tunnel was driven through such a rock massif. The stresses at points around the tunnel are determined using analytical and numerical methods.

For analytical determination of stresses, complex potential theory (Mishkelishvili, 1953; Lu et al., 2024) and mechanics of layered media are suitable (Ivanova, 2022; Trifonova-Genova et al., 2023). Solved problems exist for layers, for which the boundary planes between them are parallel to the tunnel axis. In some tasks, the layer thickness is commensurate with the tunnel dimensions, while in others this is not the case. In most problems, the cross-section of the tunnel is a circle.

For more complex layer arrangements, the finite element method (FEM) is recommended (Konyukhov, 2001). It allows exploring the spatial area around the tunnel. Software packages require more time to be acquainted and gain experience.

Therefore, in this work, the stress state around the tunnel will be investigated using analytical methods. The boundary planes between the layers are inclined relative to the tunnel axis. Furthermore, they are parallel to the horizontal axis passing through the center of the tunnel cross-section (Fig. 1).

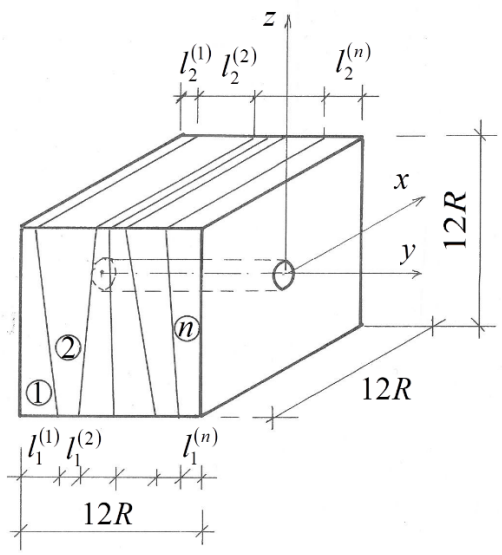


Fig. 1. Tunnel passing through *n* layers

Methods

1. Formulation of the problem

At a great depth H , a horizontal circular tunnel with radius R is driven. It passes through *n* layers. Part of the rock massif around the tunnel, which has the shape of a cube, is examined (Fig. 1). The stresses on the walls of the cube are equal to the stresses in an undisturbed rock mass. The boundary planes between the layers are arbitrarily inclined relative to the tunnel axis. Furthermore, they are parallel to the horizontal axis of the tunnel cross-section. These planes divide the cube into several quadrangular prisms.

2. Method for determining stresses

To determine the stresses in each layer of the rock massif, the following approach consisting of two stages is applied.

In *the first stage*, the isotropic layers are replaced by an equivalent uniform homogeneous isotropic layer. It has the following characteristics:

$$E^{(o)}=\frac{\sum_{m=1}^{n}E^{(m)}V_m.}{\sum_{m=1}^{n}V_m};\ \mu^{(o)}=\frac{\sum_{m=1}^{n}\mu^{(m)}V_mE^{(m)}}{\sum_{m=1}^{n}V_mE^{(m)}};$$

$$\gamma^{(o)}=\frac{\sum_{m=1}^{n}\gamma^{(m)}V_m.}{\sum_{m=1}^{n}V_m};\ \lambda^{(o)}=\frac{\mu^{(o)}}{1-\mu^{(o)}}. \quad (1)$$

These expressions involve the characteristics for layer m : $\gamma^{(m)}$ is volumetric weight;

$E^{(m)}$ is Young's modulus;

$\mu^{(m)}$ is Poisson's ratio;

for the homogeneous environment:

$\gamma^{(o)}$ is volumetric weight;

$E^{(o)}$ is Young's modulus,

$\mu^{(o)}$ is Poisson's ratio;

$\lambda^{(o)}$ is the coefficient of lateral pressure.

To determine the stresses in an equivalent uniform homogeneous isotropic layer, a calculation scheme is drawn up. It is a square with side $12R$ and a circular opening with radius R. The load along the contour of the square is equal to the corresponding stress in the undamaged array. Along the contour of the hole, the tangential normal stresses have the form (Mishkelishvili, 1953; Bulichev, 1982):

$$\sigma_\theta^o=-Q\left(\sigma_{\theta,1}-\sigma_{\theta,2}\cos 2\theta\right). \quad (2)$$

where

$$\sigma_{\theta,1}=2\lambda_1;\ \sigma_{\theta,2}=4\lambda_2;\ \lambda_1=\frac{1+\lambda^{(o)}}{2};\ \lambda_2=\frac{1-\lambda^{(o)}}{2};$$
$$Q=\gamma^{(o)}H.$$

In the *second stage* of the method, the stresses in each layer are determined. For this purpose, two conditions are recorded. The first condition describes the equilibrium of forces, and the second equalises the relative deformations of the contact between the two layers. For an array consisting of *n* layers, the conditions are:

$$\sum_{i-1}^{n}\sigma_r^{(i)}V_i=\sigma_r^oV\ ; \quad (3)$$
$$\sum_{i-1}^{n}\sigma_\theta^{(i)}V_i=\sigma_\theta^oV;$$
$$a_{11}^{(m)}\sigma_r^{(m)}-a_{11}^{(m-1)}\sigma_r^{(m-1)}+a_{12}^{(m)}\sigma_\theta^{(m)}-a_{12}^{(m-1)}\sigma_\theta^{(m-1)}=b_{m_1};$$
$$a_{12}^{(m)}\sigma_r^{(m)}-a_{12}^{(m-1)}\sigma_r^{(m-1)}+a_{11}^{(m)}\sigma_\theta^{(m)}-a_{11}^{(m-1)}\sigma_\theta^{(m-1)}=b_{m_1},$$

where

$$b_1=\sigma_r^oV\ ;b_2=\sigma_\theta^oV\ ;\ b_{m_1}=a_{13}^{(m-1)}\sigma_z^{(o)}-a_{13}^{(m)}\sigma_z^{(o)};$$
$$m_1=m+1;\ m=1,...n.$$

Here, $\sigma_r^{(m)}$, $\sigma_\theta^{(m)}$ and $\sigma_z^{(m)}$ are the radial, tangential normal stresses, and stresses along the tunnel axis in the layer m, and σ_r^o, σ_θ^o and $\sigma_z^{(o)}$ are the radial, tangential normal stresses, and stresses along the tunnel axis in an isotropic generalised medium.

The deformation along the tunnel axis is zero, hence

$$\sigma_z^{(m)}=-\frac{a_{13}^{(m)}}{a_{33}^{(m)}}\left[\sigma_r^{(m)}+\sigma_\theta^{(m)}\right];\ \rightarrow m=1,....n. \quad (4)$$

Substituting (4) into (3), we obtain:

$$\sum_{i=1}^{n}\sigma_r^{(i)}V_i=\sigma_r^oV\ ; \quad (5)$$
$$\sum_{i=1}^{n}\sigma_\theta^{(i)}V_i=\sigma_\theta^oV;$$
$$e_m\sigma_r^{(m)}-e_{m-1}\sigma_r^{(m-1)}+e_{n+m}\sigma_\theta^{(m)}-e_{n+m-1}\sigma_\theta^{(m-1)}=0;$$
$$e_{n+m}\sigma_r^{(m)}-e_{n+m-1}\sigma_r^{(m-1)}+e_m\sigma_\theta^{(m)}-e_{m-1}\sigma_\theta^{(m-1)}=0.$$

The following notations are adopted in these expressions:

$$e_m=a_{11}^{(m)}-\frac{\left[a_{13}^{(m)}\right]^2}{a_{33}^{(m)}};\ e_{m+n}=a_{12}^{(m)}-\frac{\left[a_{13}^{(m)}\right]^2}{a_{33}^{(m)}}. \quad (6)$$

The deformation coefficients in (6) are:

$$a_{13}^{(m)}=a_{12}^{(m)}=\frac{\mu^{(m)}}{E^{(m)}};\ a_{11}^{(m)}=a_{33}^{(m)}=\frac{1}{E^{(m)}}. \quad (7)$$

The stresses along the contour of the hole are of interest in practice. Since the radial and tangential stresses are zero, system (5) takes the form:

$$\sum_{k=1}^{n}\sigma_\theta^{(k)}V_k=\sigma_\theta^oV\ ; \quad (8)$$
$$e_m\sigma_\theta^{(m)}-e_{m-1}\sigma_\theta^{(m-1)}=0;\ \ m=2,...n.$$

The solution of system (5) and (8) is carried out through the Gauss method, known as the method of successive elimination of unknowns (Ivanova et al., 2019; Strong, 2023; Trifonova, 2025). From the solution of (8), the stresses in the layers are obtained:

$$\sigma_\theta^{(m)}=\frac{\Delta_m}{\Delta}. \quad (9)$$

These formulae are called Cramer's formulae. Here, Δ is the determinant of the system, and Δ_m is obtained from the determinant Δ by replacing column m with the column of the free terms of (8).

3. Numerical example

A tunnel with a circular cross-section ($R = 1{,}5m$) intersects three isotropic layers (Fig. 2). It is driven at a depth of $H = 300m$.

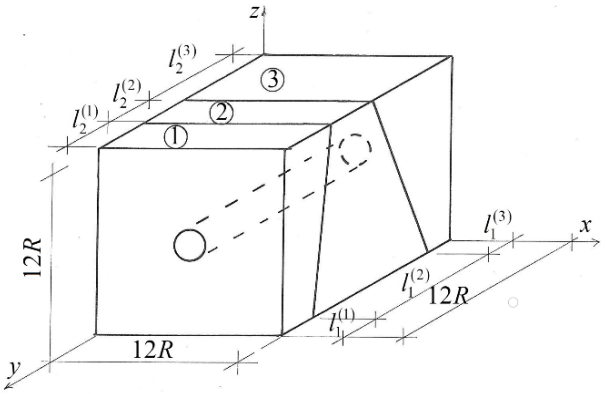


Fig. 2. A tunnel passing through three layers

Young's moduli and Poisson's ratios in the layers are given in Table 1. The characteristics of the equivalent uniform homogeneous isotropic medium were calculated according to (1). These parameters and volumetric weights are listed in the bottom row of Table 1.

Table 1. *Characteristics of layers and homogeneous media*

m	$E^{(m)}$	$\mu^{(m)}$	$\gamma^{(m)}$
multiplier	10^3		10^{-2}
dimension	MPa		MN/m^3
1	0.148	0.15	0.28
2	0.595	0.237	0.25
3	1.036	0.26	0.25
o	0.876	0.255	0.253

The dimensions of the layers are given in Table 2. The volumes of the three layers have been determined.

Table 2. *Layer sizes*

i	l_1	l_2
dimension	m	m
1	3.5	4.8
2	12.5	4.8
3	2.0	8.4

Along the contour of the tunnel opening, the radial and tangential stresses are zero. Then system (8) takes the form:

$$\sigma_\theta^{(1)}V_1 + \sigma_\theta^{(2)}V_2 + \sigma_\theta^{(3)} = \sigma_\theta^{o}V\ ; \qquad (10)$$
$$e_2\sigma_\theta^{(2)} - e_1\sigma_\theta^{(1)} = 0\ ;$$
$$e_3\sigma_\theta^{(3)} - e_2\sigma_\theta^{(2)} = 0\ .$$

From the solution of (10), the stresses in the three layers are obtained:

$$\sigma_\theta^{(1)} = \frac{e_2e_3V}{\Delta}\sigma_\theta^{(o)};\ \sigma_\theta^{(2)} = \frac{e_1e_3V}{\Delta}\sigma_\theta^{(o)}; \qquad (11)$$
$$\sigma_\theta^{(3)} = \frac{e_1e_2V}{\Delta}\sigma_\theta^{(o)};\ \Delta = V_1e_2e_3 + V_2e_1e_3 + V_3e_1e_2\ .$$

For the vertical and horizontal axes of the circular cross-section of the tunnel. the diagrams of normal tangential stresses in three layers $\sigma_\theta^{(1)}$, $\sigma_\theta^{(2)}$ and $\sigma_\theta^{(3)}$ are symmetrical. These stresses are calculated for seven points in the first quadrant. The results are related to the stresses in the undisturbed environment Q and are presented in Table 3.

Table 3. *Relative normal tangential stresses in layers*

n	$\theta[\circ]$	$\sigma_\theta^{(1)}/Q$	$\sigma_\theta^{(2)}/Q$	$\sigma_\theta^{(3)}/Q$
1	0	-0.004	-0.018	-0.032
2	15	-0.033	-0.137	-0.241
3	30	-0.111	-0.460	-0.811
4	45	-0.217	-0.903	-1.591
5	60	-0.323	-1.345	-2.370
6	75	-0.401	-1.669	-2.941
7	90	-0.429	-1.787	-3.150

Using the data from Table 3, the diagrams of the relative normal tangential stresses around the hole were constructed. They are given in Figure 3. Number 1 indicates the stress diagram in layer 1, number 2 indicates those in layer 2, and number 3 indicates those in layer 3.

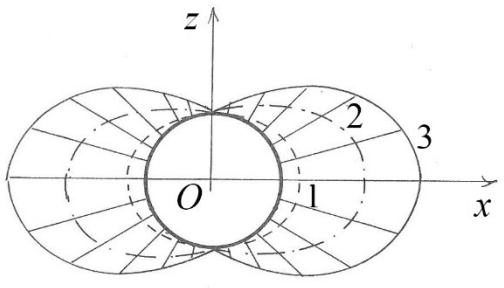


Fig. 3. Diagrams of relative normal tangential stresses for three layers

From the obtained values in Table 3, the maximum difference between the stresses can be seen. For points on the horizontal axis, the largest difference is 2.6%. It is between the stresses in the first and third layers. This is due to the larger value of Young's modulus in the third layer.

From the values of Young's moduli presented in Table 1, the relationships between them can be examined. This gives the largest ratio 7. It is between the first and third layers.

4. Keys finding

The approach described in the work is applied to isotropic rock masses consisting of several layers. The boundary planes

between the layers are arbitrarily inclined to the tunnel axis and parallel to the horizontal axis of the cross section. This method takes into account the physical and mechanical properties of the rock mass, the depth of the foundation, and the transverse dimensions of the tunnel.

Applying the method requires knowledge of spreadsheets (Aleksander et al., 2022).

This method is recommended to be used by engineers in pre-project design.

Conclusion

The research conducted can be expanded in the following directions:

1. The method can be applied to determine the stresses in a rock massif whose layers are transversely isotropic. Then an average formula for Young's modulus given in (Tonnon et al., 2003) is applied.

2. This method can be used when the boundary planes between the layers are not parallel to the horizontal axis of the tunnel cross-section. Then the ANSYS program can be used to determine the volumes of each layer (Konyukhov, 2001).

3. The method is suitable for scientific engineering and technical workers in scientific research and design organisations.

References

Aleksander, M. & Kusleika, D. (2022). *Microsoft Excel 365* Bible 1st Edition, Wiley, 1072 p. ISBN 978-1119835103.

Bulichev, N. S. (1982). *Mehanika podzemnih soorujenii*, M., Nedra, 282 str. (in Russian)

Ivanova, M. (2022). Stresses around a horizontal circular opening passing through two isotropic layers. *Journal of Mining and Geological Sciences*, *65*, Part II: Mining Technology and Mineral Processing, 26-29.

Ivanova, M., Ivanova, M. & Ivanov, I. (2019). *Matematika-2 chast.* UNSS, 216 str. (in Bulgarian)

Konyukhov, A. V. (2001). *The Basics of Structural Analysis with ANSYS*, Kazan, 203 p. (ANSYSfull.pdf) https://www.researchgate.net/publication/261411282.

Lu, A., Wang, H. & Zhang, L. (2024). *Complex variable solution in the Mechanical Analysis of Tunnels*. Springer, 2024, 400 p. ISBN-10 981971690X.

Muskhelishvili, N. I. (1953). *Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*. - Gromingen: Nordhoft, 706 p.

Strong, G. (2023). *Introduction to linear algebra*, 6th ed. Willesley-Cambridge Press. https://math.mit.edu/~gs/linearalgebra/ila6/indexila6.html.

Tonnon, F. & Amadei, B. (2003). Stresses in anisotropic rock masses: an engineering perspective building on geological knowledge. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, *40*, 1099-1200.

Trifonova, M. (28.01.2025). *Lineina algebra, 6. Sistemi lineini uravneniya, Metod na Gaus.* 36 p. web.uni-plovdiv.bg/marta/LA/lec6_systems.pdf. (in Bulgarian)

Trifonova-Genova, V. & Tonkova, G. (2023). Stress around circular opening passing through two isotropic layers. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” - Sofia*, *66*, Section II: Mining and Mineral Processing, 74-77.

POLLUTION SUPPRESSION ALONG MINE ROADS

Martin Tsakov

“Elatzite-Med” AD, 2086 Mirkovo E-mail: m.tsakov@ellatzite-med.com

ABSTRACT. An experiment was conducted to determine the effectiveness of dust suppression solutions for sprinkling of roadways in open-pit mines. It was performed in the conditions of a real deep-type open-pit mine. The possibility of longer moisture retention when sprinkling mine roads with a solution of water plus an additive to the water was studied. Ten consecutive frames were taken, which show the longer moisture retention in a section sprinkled with a solution of H_2O plus additives. The experimental measurements were carried out in production conditions without interfering with the normal technological activity of the mine. The requirements of the practical measurements were aimed at achieving maximum reliability of the data obtained and zoning of mine roads by dustiness using the existing sampling kit and the results of the *Modular* aquifer tracking module.

Key words: suppression, dustiness.

ПОТИСКАНЕ НА ЗАПРАШЕНОСТТА ПО РУДНИЧНИТЕ ПЪТИЩА

Мартин Цаков

“Елаците-Мед“ АД, 2086 Мирково

РЕЗЮМЕ. Направен е експеримент за определяне ефективността на прахопотискащи разтвори за оросяване на автомобилните пътища в открити рудници. Същият е проведен в условията на реален открит рудник от дълбочинен тип. Изследвана е възможността за по-продължително задържане на влагата при оросяване на рудничните пътища с разтвор от вода плюс добавка към водата. Направени са десет последователни кадъра, които показват по-продължителното задържане на влагата в участък оросен с разтвор от H_2O плюс добавени вещества. Провеждането на експерименталните измервания се осъществяваше в производствени условия без да се пречи на нормалната технологична дейност на рудника. Изискванията на практическите измервания целяха постигане на две неща, максимална достоверност на получените данни и райониране на рудничните пътища по степен на запрашеност с използване на съществуващия комплект за пробовземане и резултатите от модула за проследяване на водоносните от системата „Модулар“.

Ключови думи: потискане, запрашеност.

1. Въведение

Атмосферен прах е общо означение за фини твърди частици, които се носят във въздуха и продължително време могат да стоят в равновесие в него без да падат. Прахът и неговото отделяне (прахообразуване) е феномен, който съпътства редица природни явления (пустинни бури, вулканични ерупции) и почти всяка човешка дейност. Негативното му въздействие върху човешкия организъм налага предприемането на редица мерки за депресирането му още в най-ранен стадий. В тази връзка прилагането на т. нар. оросяване с вода и водни разтвори с различни добавки се оказва най-често използван ефикасен и икономичен метод в световната практика на минното дело. Прахоотделянето по рудничните временни и постоянни автомобилни пътища и борбата с него все още си остава труден за решаване проблем, който съпътства експлоатационната дейност на откритите рудници през целия период на тяхното съществуване.

При борбата с праха за пътища, които не са асфалтирани се използват водоноски, които редовно трябва да пръскат вода. При откритите минни работи към тази вода се добавят различни добавки (ДВ), които увеличават ефективността от пръскането. Тези добавки свързват частиците прах и създават твърда повърхност на пътната настилка, което намалява количеството на прах във въздуха. От особено значение е фактът, че за всички пътища влизат в сила ограничения за ниска скорост с цел повишаване на безопасността и за свеждане до минимум вдигането на прах от превозните средства.



Фиг.1. Отделяне на прах при движение по руднични пътища



Фиг.2. Отделяне на прах при движение по руднични пътища



Фиг.3. Отделяне на прах при движение по руднични пътища

2. Специална част

Изследване на възможностите за намаляване запрашеността по главните автомобилни пътища чрез продължително задържане на влагата при оросяване

Цел и задачи на изследването

Целта на настоящата разработка е да се изследват възможностите за намаляване на запрашеността по главните автомобилни пътища в котлована на рудник. В резултат на транспортирането на минната маса (руда и откривка) в рудника се отделя голямо количество прах. Неговото депресиране е важна текуща задача при осъществяването на нормалната експлоатационна дейност. Въпреки провежданите многобройни изследвания и отделянето на значителни средства, в световен мащаб този проблем все още не е решен на задоволително ниво. Изследванията на световно известни фирми в това направление показват, че водата като най-евтино средство за оросяване на пътищата е основният носител на добавките към нея. Поради тази причина се счита, че непрекъснатото и достатъчно оросяване на пътищата с вода и подходящи добавки към нея, са главна предпоставка за успешна борба с праха в рудниците.

За постигането на целта на изследването се решават следните задачи:

1. Разработване на теоретичните основи на изследвания проблем.
2. Провеждане на практически експеримент за установяване на намаляването на запрашеността при използването на ДВ.
3. Доказване на ефективността от използването на ДВ при решаване на проблема относно запрашаването по рудничните пътища.

Условия и методика на извършеното изследване

Провеждането на експерименталните измервания се осъществяваше в производствени условия без да се пречи на нормалната технологична дейност на рудника. Изискванията на практическите измервания целяха постигане на максимална достоверност на получените данни. С оглед изясняване на резултатите от оросяването на пътищата с вода и разтвор от вода плюс добавка (ДВ), произведена от фирмата Nalco, измерванията се дублираха за съответните пътни участъци. За да се запази и обезопаси целостта на измервателната апаратура тя се поставяше откъм откоса на стъпалото в зоната на насипа.

Резултати от експерименталните изследвания на прахопотискането по рудничните пътища с използване и без употреба на добавка към водата за оросяване

Поради големия брой на въздействащите върху крайния резултат елементи, наречени „фактори“, както и с оглед на възможностите за тяхното сравняване, всички те бяха събрани на едно място в така наречената обобщаваща таблица (табл. 1)

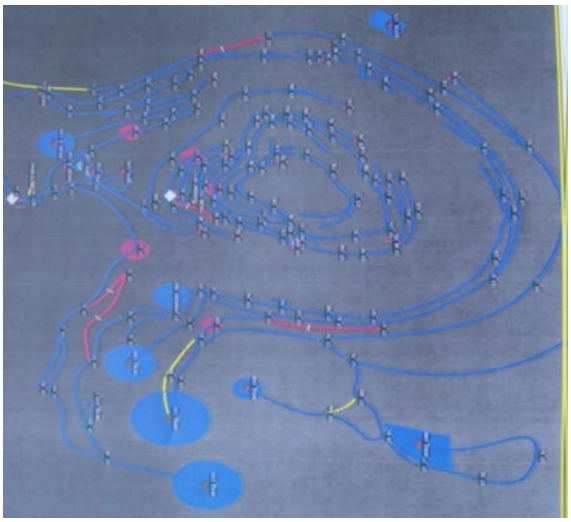
Таблица 1. *Таблица с данни от направените измервания*

№	Дата	Отправна точка (ОТ)	Начален час на измерване	Температура [°C]	Краен час на измерване	Температура [°C]	Оросяване с вода или препарат	Хоризонт	Брой багери (номера на багерите)	Час на оросяване	Брой преминали водоноски	Брой преминали автосамосвали	mg/m^3
1	07.08.24	ОТ-57	9:00	28	12:30	35	вода	1000-запад	2 (11,13)	7:00	1	132	5,658
2	08.08.24	ОТ-57	9:00	24	13:30	28	препарат	1000-запад	2 (11,13)	11:00	1	128	0,056
3	11.08.24	ОТ-28	8:45	23	12:00	30	вода	1180 -изток	2 (8 и 10)	7:00	1	160	1,624
4	15.08.24	ОТ-28	9:20	24	13:20	28	препарат	1180 -изток	1 (10)	09:10/10:30	2	58	0,986
5	16.08.24	ОТ-53	8:30	24	13:20	28	препарат	1060-изток	2 (11 и 13)	09:30/11:00	2	200	0,008
6	17.08.24	ОТ-53	8:30	25	12:30	28	вода	1060-изток	1 (11)	08:30/11:30	2	102	2,254
7	18.08.24	ОТ-35	8:40	20	13:40	28	вода	1150-запад	2(10 и15)	09:00/09:20	2	132	19,934
8	23.08.24	ОТ-35	8:40	15	13:00	20	препарат	1150-запад	1(15)	6:30	1	64	1,032
9	24.08.24	ОТ108	8:40	15	12:00	22	вода	1315-запад	3 (12,16,40)	08:30/10:00/11:30	3	174	14,669
10	28.08.24	ОТ-108	9:00	20	13:30	29	препарат	1315-запад	3 (12,16,40)	07:00/ 10:00	2	152	0,971

Факторите в таблицата са получени с помощта на системата „Modular“, които са отчетени при извършването на проведените десет експеримента. Тяхната цел беше да се установи степента на въздействие на разтвора (H_2O + ДВ) върху запрашеността на пътищата. Факторите, които се отчитаха са: дата на провеждане на експеримента; „ОТ“ (отправна точка) – местоположение на измервателния апарат; начален час на измерването, температура на въздуха в началото на измерването [ºC], краен час на измерването, температура на въздуха в края на измерването [ºC], начин на оросяване: вода (оросяване с вода) или препарат (оросяване с вода плюс добавка към водата), хоризонт, брой на багерите и техните номера, час на оросяване, брой преминали водоноски, брой преминали автосамосвали (пълни/празни).

Райониране на рудничните пътища по степен на запрашеност с използване на съществуващия комплект за пробовземане и резултатите от модула за проследяване на водоноските от системата „Модулар“

Районирането на рудничните пътища с точките на залагане на комплекта за пробовземане е показано на фиг. 4.



Фиг. 4. Изображение от GPS система Dispatch за проследяване на добивните работи в открит рудник

На фиг. 5 е показан уредът за измерване на запрашеността.



Фиг. 5. Уред „Dust Detective“ за измерване на запрашеността

Както се вижда от таблицата, при експеримент №7 и оросяване с вода, най-висока степен на отделяне на ФПЧ (19,934 mg/m3) за пет часов период на измерване се наблюдава на хоризонт 1150–запад при работа на два багера №10 и №15. За същия период край измервателния пункт са минали 132 броя самосвали (пълни и празни). При експеримент №5 на хоризонт 1060-изток и пръскане с разтвор от H_2O+ДВ са минали 200 самосвала (с 64 повече), а средната запрашеност е по-малка с 0,008 mg/m^3. При разработването на този материал изцяло се използваха несъмнените предимства на системата „Модулар“. Цялостният ситуационен план на рудника се „изчиства“ от излишни подробности. Указват се „отправните точки“ (ОТ), транспортните връзки, дължините и местоположението на транспортните пътища. Дава се индикация на еднопътните и двупътни участъци. Посочват се „забранените“ за момента пътни участъци. Точно се указва местоположението на апарата за измерване на количеството отделян прах в реално време. В случая това е ОТ 57 (таблица 1). В резултат на гореуказаните предимства се оформя един реален транспортен ситуационен план в производствени условия и в реално време. Той е незаменим със своите качества и може да послужи както за управление на рудничния транспорт в режим на усредняване на рудата, така и за дългосрочно, краткосрочно и текущо планиране на минните работи.

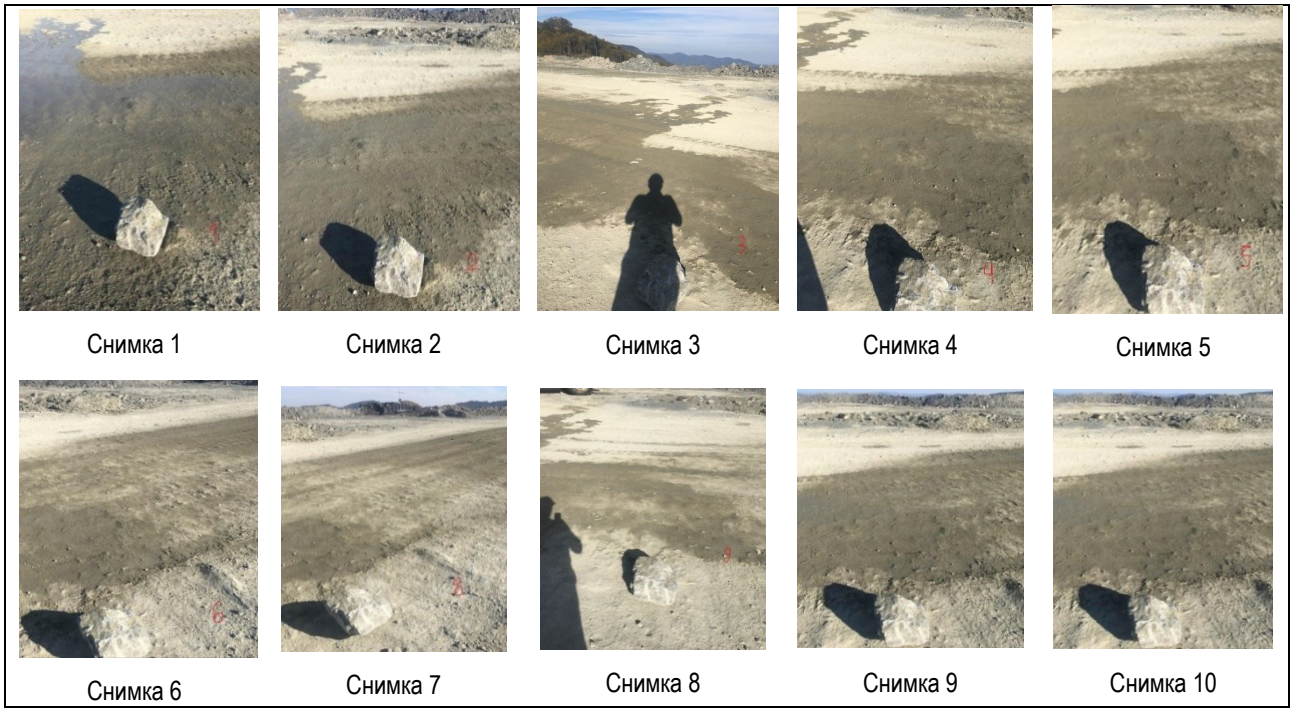
Големите възможности на системата „Модулар“ могат да послужат като база за разработване на график за движение и използване на водоноските (пълни с H_2O) когато оросяват пътищата и водоснабдяват сондите, а така също и за указване маршрута на водоноските (пълни с разтвор H_2O+ДВ), когато се оросяват само пътищата.



Фиг. 6. Оросяване на руднични пътища с водоноска

Илюстрация за по-продължително задържане на влагата при оросяване на пътищата с разтвор от вода плюс добавка към водата

С оглед изясняване на възможността за по-продължително задържане на влагата при оросяване на пътищата с разтвор от вода плюс добавка към водата, бяха заснети следните кадри, показани на фиг. 7.



Фиг. 7. Десет последователни кадъра, които показват по-продължителното задържане на влагата в участък, оросен с разтвор от H_2O плюс ДВ

Изводи и препоръки

В резултат на оценката на резултатите и данните от софтуера на измервателния апарат може да се направят следните констатации и препоръки:

1. Наложително е използването на ДВ към водния разтвор за третиране на автомобилните пътища. Тази необходимост се очертава след едновременното сравняване на резултатите при оросяване само с вода и с добавка към водата.
2. Наличните фотографски кадри (фиг.6) показват по-продължителния период на задържане на влагата при използване на разтвор H_2O + ДВ, в сравнение с използването само на вода за оросяване на рудничните пътища.

Литература

Златанов, П. (2010). *Моделиране и управление на технологичните процеси в откритите рудници*. София.

Константинов, Г. (1988). *Методика за обработване на данни в открития добив*, София.

RISKS FROM GAS EMISSIONS IN ELECTRIC VEHICLE FIRES IN UNDERGROUND GARAGES

Teodosi Genchev Tsankov

Academy of the Ministry of Interior
Faculty of Fire Safety and Civil Protection; E-mail: academy@mvr.bg; teodosi.kilifarski@abv.bg
Department of Tactics, 171 Pirotska Street, 1309 Sofia

ABSTRACT. In the past decade, electric vehicles (EVs) have emerged as a sustainable alternative to internal combustion engine (ICE) vehicles, primarily due to their low operational emissions and the growing institutional support for environmentally oriented policies. Alongside their undeniable ecological and technological advantages, EVs also pose a range of new challenges, particularly concerning fire safety and the potential environmental impact in the event of incidents. Fires involving EVs are characterised by distinct thermal dynamics and smoke gas composition, including a variety of toxic and corrosive substances that are either absent or present in significantly lower concentrations during fires involving ICE vehicles. Incidents in enclosed spaces are especially critical, where the lack of effective ventilation leads to the accumulation of hazardous emissions, thereby increasing risks to human health and safety, as well as to the environment.

This report aims to examine the environmental and health risks associated with EV fires, through a detailed analysis of the chemical profile of the emitted gases and particulate matter. The study emphasises the key differences compared to ICE vehicle fires and evaluates the necessity of implementing emergency ventilation systems as a mandatory component in all types of enclosed parking facilities.

Key words: electric cars, hydrogen fluoride (HF), fire safety.

РИСКОВЕ ОТ ГАЗОВИ ЕМИСИИ ПРИ ПОЖАРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА В ПОДЗЕМНИ ГАРАЖИ

Теодоси Генчев Цанков

Академия на Министерството на вътрешните работи
Факултет „Пожарна безопасност и защита на населението“
Катедра „Тактика“, ул. „Пиротска“ 171, 1309 София

РЕЗЮМЕ. В последното десетилетие електрическите превозни средства (ЕПС) се утвърдиха като устойчива алтернатива на автомобилите с двигатели с вътрешно горене (ДВГ), предимно поради ниските си експлоатационни емисии и засилената институционална подкрепа за политики в областта на устойчивото развитие. Наред с техните безспорни екологични и технологични предимства, възникват и редица нови предизвикателства, свързани основно с пожарната безопасност и потенциалното въздействие върху околната среда при инциденти. Пожарите, причинени от ЕПС, се характеризират със специфична термична динамика и химичен състав на димните газове, включващ редица токсични и корозивни вещества, които не се наблюдават или са в значително по-ниски концентрации при пожари на автомобили с ДВГ. Особено критични са случаите в затворени пространства, където отсъствието на ефективна вентилация води до натрупване на опасни емисии и повишен риск за здравето и безопасността на хората, както и за околната среда.

Настоящият доклад има за цел да изследва екологичните и здравните рискове, свързани с пожарите на електрически превозни средства, чрез анализ на химичния профил на отделяните газове и твърди частици. Акцентът е поставен върху съпоставката с пожарите на автомобили с ДВГ, както и върху необходимостта от нормативното въвеждане на аварийна вентилация като задължителен елемент във всички видове закрити паркинги.

Ключови думи: електрически автомобили, флуороводород, пожарна безопасност.

Въведение

През последното десетилетие множество научни изследвания се съсредоточиха върху анализа на рисковете, свързани с пожари на електрически превозни средства (EVs). С нарастването на броя реални инциденти и резултати от лабораторни изпитвания, научният интерес постепенно се измести от чисто техническите аспекти на запалване към екологичните и токсикологични последици от подобни събития.

Според проучването на (Ola Willstrand et al., 2020), публикуван в RISE Research Institutes of Sweden (2020), горенето на литиево-йонни батерии води до отделяне на флуороводород (HF), въглероден оксид (CO), въглероден диоксид (CO_2), както и значително количество аерозолни частици и органични съединения с потенциална канцерогенност. Установено е, че при определени видове батерии, концентрацията на HF може да надхвърли допустимите граници за излагане само няколко минути след възникване на пожара.

Таблица 1 показва общите количества от тези измервания. В допълнение към общите суми, в скоби са представени суми, имайки предвид загубата на маса от превозното средство.

Таблица 1. Газови съединения, измерени от изпускателния канал. (Ola Willstrand et al., 2020)

Gas measurements	ICEV A	BEV A	BEV B
CO_2 [kg] / [g/lost g]	344 / (1.4)	335 / (1.4)	438 / (1.1)
CO [g] / [mg/lost g]	6420/ (25.5)	7790 / (31.5)	9510/ (23.8)
THC [g] / [mg/lost g]	2370 / (9.4)	3130 / (12.7)	2750 / (6.9)
HF [g] / [mg/lost g]	11 / (0.04)	573 / (2.3)	859 / (2.1)
HCl [g] / [mg/lost g]	1100 / (4.4)	1590 / (6.4)	1800 / (4.5)
HBr [g] / [mg/lost g]	18 / (0.1)	115 / (0.5)	88 / (0.2)
HCN [g] / [mg/lost g]	-	-	155 / (0.4)
SO_2 [g] / [mg/lost g]	479 / (1.9)	575 / (2.3)	-
NO [g] / [mg/lost g]	452 / (1.8)	371 / (1.5)	617 / (1.5)
NO_2 [g] / [mg/lost g]	44 / (0.2)	25 / (0.1)	145 / (0.4)
PAH [g] / [mg/lost g]	112 / (0.4)	29 / (0.1)	334 / (0.8)

Състав и токсичност на дима при пожар на електрически автомобил

В публикуван доклад във Fire Safety Journal (2023) се представя директно сравнително изследване (Jonna Hynynen et al., 2021; Magnus Arvidson et al., 2023) между пожари на електрически и конвенционални автомобили. Според получените данни, макар общата топлинна мощност (Heat Release Rate – HRR) да е съпоставима, съставът и токсичността на емисиите от електрическите автомобили са значително по-високи. Това се обяснява както с химическия състав на акумулаторните батерии, така и с материалите, използвани в електрическите компоненти. Установено е още, че параметри като пикова скорост на отделяне на топлина, общо отделено количество топлина и загуба на маса не се различават съществено между двата типа превозни средства.

Допълнителни проучвания, сред които (Jiseong Jang et al., 2025; Jonna Hynynen et al., 2021), публикувани в MDPI Energies, акцентират върху опасностите в затворени пространства, каквито са подземните гаражи. В такива условия липсата на естествена вентилация води до експоненциално нарастване на концентрацията на токсични газове, което създава сериозни рискове. Авторите подчертават, че опасността за здравето съществува не само за хората в непосредствена близост, но и за аварийните екипи, които често не разполагат с предварителна информация относно типа батерия или фазата на горене.

В подкрепа на нуждата от нормативна регулация, документи като EV Guidelines на National Fire Protection Association (NFPA) отразяват засиленото внимание към необходимостта от адекватна инфраструктура и обучение при реакция на подобни инциденти. Въпреки това, в редица държави, включително и България, все още отсъстват конкретни изисквания относно аварийна вентилация в подземни паркинги, в които се зареждат или паркират електрически автомобили.

Газообразни емисии

Според изследване на (Larsson et al., 2016), горенето на литиево-йонни батерии води до отделяне на:

- Флуороводород (HF) – силно токсичен и корозивен газ, който причинява тежки изгаряния на лигавиците и белите дробове дори при ниски концентрации. В зависимост от типа батерия, отделеното количество може да достигне до 200 –400 mg/Wh (Larsson et al., 2016);
- Въглероден оксид (CO) – добре известен продукт от горенето, който създава сериозна опасност от отравяне чрез блокиране на кислородния транспорт в организма;
- Хлороводород (HCl) и серен диоксид (SO_2) – в резултат от горенето на PVC кабели и други полимерни компоненти в електрическите системи (Feng et al., 2020).

В доклад на (Ola Willstrand et al., 2020) се установява, че при пожар в акумулаторен модул на електрически автомобил, концентрацията на флуороводород (HF) във въздуха може да надхвърли 50 ppm – стойност, която е повече от десет пъти над пределно допустимата за работна среда, определена от OSHA (Occupational Safety and Health Administration, САЩ). Флуороводородът (HF), който се отделя основно при горене на литиево-йонни батерии, е изключително токсичен и представлява сериозна заплаха за човешкото здраве. Това е силно корозивен газ, който при контакт с очи, кожа или дихателни пътища реагира агресивно и причинява тежки химически изгаряния. За разлика от повечето киселини, HF прониква дълбоко в тъканите, тъй като флуоридният йон се свързва с калций и магнезий в организма, което може да доведе до системни токсични ефекти.

Дори краткотрайно излагане на концентрации над 30 ppm може да бъде животозастрашаващо. В такива случаи е възможно развитие на химически пневмонит, белодробен оток и, при тежки експозиции — остра дихателна недостатъчност. (ATSDR 2003; CDC 2014) Безопасните стойности по OSHA и NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health – USA) са показани в таблица 2.

Таблица 2. Прагове на безопасност (по OSHA и NIOSH)

Концен-трация (ppm)	Тип експозиция	Ефект върху здравето
0.5 ppm	TWA (Time-Weighted Average, 8 h)	Допустима среднодневна експозиция – приета за работна среда
3 ppm	STEL (Short-Term Exposure Limit, 15 min)	Максимална краткотрайна експозиция – може да предизвика раздразнение
10 ppm	IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health)	Много опасна концентрация – изисква незабавна евакуация
30 ppm	Критична граница	Потенциално фатално при краткотрайно вдишване без защита

Аерозоли и твърди частици

Освен газове, при горенето на батерии, се отделят и аерозолни частици с диаметър под 1 микрон, носещи със себе си тежки метали като:

- Кобалт (Co), Манган (Mn), Никел (Ni), присъстващи в катодния материал;
- Литий (Li) – макар и в по-малки количества, той може да предизвика корозия на инфраструктурата при реакция с вода.

Тези частици могат да проникнат дълбоко в дихателната система и са свързани с повишен риск от респираторни и неврологични заболявания, особено при продължително излагане (Feng et al., 2020; Larsson et al., 2017).

Термична нестабилност и "thermal runaway"

Феноменът „термично изтичане“ при литиево-йонните батерии представлява верижна екзотермична реакция, при която отделните клетки се нагряват, разпадат и освобождават горими и токсични газове. В този етап се отделят допълнителни съединения, включително въглеводороди, ацетонитрил и органофлуориди, които са не само високотоксични, но и възпламеними, като при контакт с въздух могат да предизвикат експлозивни реакции (Zhao et al., 2021).

Сравнение с пожар при автомобил с ДВГ

При пожари на превозни средства с двигатели с вътрешно горене (ДВГ) също се отделят токсични газове — основно въглероден оксид (CO), азотни оксиди (NOx) и димни аерозоли от горивни и пластмасови материали. Въпреки това, флуорсъдържащите съединения и тежките метални частици присъстват в значително по-ниски концентрации в сравнение с пожарите на електрически превозни средства.

Освен това, рискът от повторно запалване при електрическите автомобили е по-висок поради остатъчния заряд в батериите, което увеличава времето на експозиция и опасността за спасителните екипи и околната среда.

Рискове за здравето и околната среда при пожар в затворени пространства

Пожарът на електрически автомобил в затворено пространство, като подземен гараж, създава особено опасна среда поради ограничената въздушна циркулация, ниския таван и бавното отвеждане на дим и токсични газове. Това превръща подобни инциденти в потенциално фатални както за хората в близост, така и за околната среда. (Македонска Д. и др. 2016.; Makedonska D. et al 2019).

Рискове за човешкото здраве

Основният риск произтича от отравяне чрез вдишване. Сред най-опасните продукти на горене, отделяни при пожар на електрически автомобили, са флуороводород (HF), въглероден оксид (CO), ацетонитрил, както и дразнещи газове като хлороводород (HCl) и серен диоксид (SO_2). Вдишването на тези вещества крие сериозни рискове за здравето. Според данни на OSHA, пределно допустимата концентрация за HF е 3 ppm, докато при пожар стойностите могат да достигнат 50–100 ppm само за няколко минути при липса на ефективна вентилация (Ola Willstrand et al., 2020).Тези вещества могат да причинят:

- Остро дразнене на дихателните пътища – кашлица, задух, ларингоспазъм;
- Белодробен оток – животозастрашаващо състояние, което може да настъпи часове след експозицията;
- Невротоксични ефекти – замайване, главоболие, загуба на съзнание;
- Сърдечни усложнения – при наличие на CO в кръвта (карбоксихемоглобин) (Ola Willstrand et al., 2020).

Дългосрочната експозиция повишава риска за здравето. Ако няма адекватна вентилация и почистване, фините прахови частици и химични остатъци от пожара могат да останал дълго време във въздуха и по повърхностите на затворени помещения. Това създава риск от:

- Хронични респираторни заболявания (астма, ХОББ);
- Повишен канцерогенен риск – особено при органофлуориди и тежки метали;
- Увреждане на очите и кожата – особено при контакт с остатъци от електролити.

Налице е и опасност за спасителните екипи. Пожарникарите са изложени на сериозни рискове, дори при използване на лични предпазни средства. Трудността да се определи точният тип батерия, фазата на горене и наличието на вторични запалвания, поставя екипите в условия на висока несигурност и натоварване на защитните системи и личните предпазни средства.

Влияние върху околната среда

Замърсяване на въздуха - токсичните газове, особено HF, HCL, CO и органичните съединения не само вредят на хората, но и имат разграждащ ефект върху озоновия слой и могат да се натрупат в атмосферния въздух около мястото на пожара. Това е особено опасно в градски условия.

Замърсяване на почви и води

Остатъците от пожар (остатъчен електролит, разтопени метали и продукти от реакция с водата) често съдържат токсични метали и киселини, които могат да попаднат в канализацията или в подпочвени води. Това застрашава:

- Водни екосистеми – особено при наличие на литий и никел;
- Почвено биоразнообразие – поради висока киселинност и тежки метали;
- Човешкото здраве при вторичен контакт – чрез верига на хранене или питейна вода.

В затворени помещения като подземни паркинги, пожарите на електрически автомобили създават изключително агресивна токсична среда, която крие сериозни непосредствени и дългосрочни рискове за човешкото здраве. Същевременно, екологичният отпечатък от такива инциденти също не бива да бъде подценяван, особено в контекста на замърсяване на въздуха, водата и почвите.

Необходимост от аварийна вентилация в закрити паркинги

В контекста на зачестяващото използване на електрически автомобили и свързаните с тях пожароопасности, особено в закрити паркинги (Михайлов М. и др. 2017), наличието на ефективна аварийна вентилация не само че придобива значение, но и би следвало да бъде задължителен елемент на проектната безопасност.

Обикновените вентилации не са оразмерени и не могат ефективно да отведат токсичните газове, отделяни при термично разрушаване на литиево-йонни батерии. Например, HF и други киселинни газове се разпространяват бързо, образуват плътни облаци и остават ниско над земята – поведение, което стандартните вентилационни отвори често не могат да компенсират без специални сензори и насочен въздушен поток.

Реални рискове при липса на аварийна вентилация:

- Бързо насищане на въздуха с токсични вещества, които надвишават допустимите експозиционни лимити многократно (HF > 50 ppm, CO > 500 ppm);
- Невъзможност за евакуация на хора в рамките на безопасен интервал от време;
- Затруднена намеса на спасителните екипи, които не могат да навлязат безопасно без тежка защитна екипировка;
- Риск от вторични пожари или експлозии при натрупване на газообразни горими вещества.

Препоръчителни параметри за аварийна вентилация.

В допълнение, някои европейски директиви (като EN 12101) препоръчват използване на насочена струйна вентилация

(jet fans), която създава въздушен поток, водещ токсичния дим към изходи или пречиствателни модули.

Препоръки

- Предлага се въвеждане на нормативно изискване за аварийна вентилация в затворени паркинги, особено в обекти, предназначени за зареждане или съхранение на електрически превозни средства. Необходимо е актуализиране на действащата нормативна база в България, включително Наредба № Із-1971 от 29 октомври 2009 г. и по-специално Глава IX, чл. 113, ал. 5, т. 2, с цел аварийната вентилация да стане задължителна за всички подземни и безпрозоречни гаражи — независимо от броя на автомобилите;
- Осигуряване на газоанализатори и автоматизирани системи за управление на вентилацията, способни да откриват и отвеждат токсични газове като флуороводород (HF), въглероден оксид (CO) и хлороводород (HCl) в реално време;
- Провеждане на специализирано обучение за обслужващ персонал и аварийно-спасителни екипи относно рисковете при пожар на електрически автомобили и работа в среда с токсични и корозивни газове.

Заключение

С нарастващото интегриране на електрическите превозни средства като ключов компонент на устойчивата транспортна система, възникват нови и комплексни предизвикателства в областта на пожарната безопасност. Наред с трудната за прогнозиране термична нестабилност на акумулаторните батерии, особена загриженост буди високата токсичност на емисиите, отделяни при пожар, които могат да представляват сериозна заплаха за човешкото здраве и околната среда, особено в затворени пространства като подземни паркинги. Сред най-опасните химични съединения се откроява флуороводородът (HF), който, дори при ниски концентрации, е силно корозивен и способства за сериозни физиологични увреждания при вдишване или контакт с кожата. Особено притеснителен е фактът, че този газ често остава неуловим за сетивата в началните фази на пожара, което допълнително затруднява ранната реакция.

Настоящият анализ показва, че емисиите от пожари на електрически превозни средства се характеризират с по-висока токсичност, устойчивост и трудност при овладяване в сравнение с тези от конвенционални автомобили. При липса на специализирани аварийни вентилационни решения, рисковете от такива инциденти значително нарастват, както за обитателите на сградите, така и за аварийните служби.

По тази причина въвеждането на аварийна вентилация следва да се разглежда не просто като препоръчителна техническа мярка, а като съществен и неотменим елемент на съвременната противопожарна концепция в урбанизираната среда. Без нейното наличие електрификацията на транспорта остава компрометирана в контекста на безопасността особено в подземни и безпрозоречни пространства.

Литература

Македонска Д., Ел. Д. Власева. (2016). Пожарни инциденти в транспортни тунели – статистика, анализ, моделиране. *59-та Международна научна конференция МГУ „Св. Иван Рилски“,* стр.56 – 63, ISSN 1312-1820.

Михайлов М., Д. Македонска. (2017). Намаляване на пожарния риск в пътни тунели. *VIII Научна конференция с международно участие „Гражданска безопасност 2017“ в Академия на МВР*, ISSN 1313-7700 стр.168-170.

Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. Energy Storage Materials, 10, 246–267, Available on: https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.07.003, 2020

Jiseong Jang, Joonho Jeon, Chang Bo Oh, Risk Assessment of Toxic Gas Dispersion from Electric Vehicle Fires in Underground Apartment Parking Garages Using Numerical Analysis, Fire, Volume 8, Issue 3, Article 96,. **DOI:** 10.3390/fire8030096, 2025

Jonna Hynynen, Ola Willstrand, Per Blomqvist, Petra Andersson, Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests, Fire Safety Journal, Volume 139 **DOI:** 10.1016/j.firesaf.2023.103829, 2021

Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E., Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests. Batteries (MDPI), 2(2), 9. 10.3390/batteries2020009, 2016

Magnus Arvidson, Örjan Westlund, Water Spray Fire Suppression Tests Comparing Gasoline-Fuelled and Battery Electric Vehicles, Fire Technology, Volume 59, Pages 3391–3414, **DOI:** 10.1007/s10694-023-01473-w, 2023

Makedonska D., M. Michaylov. Need for fixed fire fighting systems in road tunnels. University of mining and geology “St. Ivan Rilski”, Journal of mining and geological sciences, Volume 62, Sofia 2019, pp. 60-65. ISSN 1312-1820.

Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson, Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles, RISE Report 2020:90, ISBN: 978-91-89167-75-9, Available on: https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1522149/FULLTEXT01.pdf, Last updated: 2023

Zhao, J., Xue, F., & Fu, Y. A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents. Process Safety and Environmental Protection, 149, 1–10. Available on **:** https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.038 2021

Държавни агенции

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), U.S. Department of Health and Human Services, Toxicological Profile for Fluorides, Hydrogen Fluoride, Fluorine. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK597858/, 2003

Centers for Disease Control and Prevention (CDC), Medical Management Guidelines for Hydrogen Fluoride, Available on:https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=1142&toxid=250, 2014

Наредби:

Наредба № Із-1971 за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар [Прегледан: 02.03.2025]. Достъпен от: https://lex.bg/laws/ldoc/2135653786

STRATEGIES FOR OPTIMISING FIRE SUPPRESSION IN ELECTRIC VEHICLES WITHIN UNDERGROUND PARKING STRUCTURES: A COMPARATIVE STUDY AND A THERMOGRAPHIC INTEGRATION PROPOSAL

Teodosi Genchev Tsankov

Academy of the Ministry of Interior; E-mail: academy@mvr.bg; teodosi.kilifarski@abv.bg
Faculty of Fire Safety and Civil Protection
Department of Tactics, 171 Pirotska Street, 1309 Sofia

ABSTRACT. The increasing prevalence of electric vehicles (EVs) poses complex challenges for fire safety, particularly in incidents involving lithium-ion battery fires. This paper presents a comparative assessment of two tactical firefighting strategies: the deployment of immersion containers for the suppression of EV fires and the implementation of the innovative Battery Extinguishing System Technology (BEST). The analysis evaluates the operational effectiveness and limitations of each approach. Furthermore, the integration of thermal imaging technology is proposed as a means to enhance situational awareness, precision, and responder safety during suppression efforts. The proposal is substantiated with considerations regarding spatial constraints in urban environments, vehicle mass, and the thermal behaviour of high-energy battery systems.

Keywords: electric vehicles (EVs), fire safety, lithium-ion batteries, underground parking garages.

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ ГАСЕНЕ НА ПОЖАРИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА С АКЦЕНТ ВЪРХУ ПОДЗЕМНИТЕ ГАРАЖИ: СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ И ПРЕДЛОЖЕНИЕ ЗА ТЕРМОГРАФСКА ИНТЕГРАЦИЯ

Теодоси Генчев Цанков

Академия на Министерството на вътрешните работи
Факултет „Пожарна безопасност и защита на населението“
Катедра „Тактика“, ул. „Пиротска“ 171, 1309 София

РЕЗЮМЕ. С нарастващата употреба на електрически превозни средства, пожарите в литиево-йонни батерии поставят нови предизвикателства пред пожарните служби. В този труд се представя сравнителен анализ на някои тактически решения за гасене: използването на пожарни контейнери за потапяне на горящи електромобили и прилагането на иновативни системи BEST. Анализира се ефективността на системи и се предлага интегриране на термокамера като средство за повишаване на прецизността и безопасността на гасене. Предложението е подкрепено с аргументи, свързани с пространствени ограничения в градски условия, масата на автомобилите и температурните характеристики на батериите.

Ключови думи: електрически превозни средства, пожарна безопасност, литиево-йонни батерии, подземни гаражи.

Въведение

С навлизането на електрически превозни средства (ЕПС) в ежедневната мобилност пожарите, възникващи вследствие на термично неконтролируема реакция (THP)" thermal runaway" в батериите, изискват нови подходи за справяне. Стандартните противопожарни тактики не винаги са ефективни или приложими при такива случаи, особено в ограничени пространства като подземни гаражи.

Електрическите превозни средства притежават съществени конструктивни различия спрямо конвенционалните превозни средства с вътрешно горене, най-вече заради литиево-йонните батерии с висока енергийна плътност. При пожар тези батерии могат да създадат ситуации, които изискват различен подход на гасене и спасителни действия в сравнение с традиционните автомобилни пожари.

Целта на настоящия доклад е да представи основните предизвикателства, пред които са изправени пожарникарите при гасене на ЕПС, както и препоръки за подобряване на безопасността и ефективността на реакцията при подобни инциденти.

Кратко представяне на електрическия автомобил

Електрическият автомобил (EV) е превозно средство, задвижвано основно или изцяло чрез електрическа енергия, съхранена в акумулаторна батерия. Основните компоненти на един електрически автомобил включват:

- Електрическа батерия (обикновено литиево-йонна), която съхранява енергията;
- Електродвигател или двигатели, които преобразуват електрическата енергия в механична;
- Инвертор и контролери, които управляват потока на енергия между батерията и двигателя;
- Бордова електроника за управление, заряд и комуникация.

Най-широко използваната батерия в електрическите автомобили е литиево-йонната. Тя се отличава с:

- Висока енергийна плътност;
- Дълъг експлоатационен живот;
- Относително ниска загуба на капацитет при циклично зареждане и разреждане.

Въпреки предимствата си, литиево-йонните батерии представляват значителен риск в случай на пожар или механично увреждане. Те съдържат запалими електролити и активни материали, които при критични условия (механичен удар, дефект, прегряване и др.) могат да доведат до така наречената термично неконтролируема реакция (THP) " thermal runaway" — неконтролируема верижна реакция с високо топлоотделяне и отделяне на токсични газове.

Често срещани причини за пожари в електрически автомобили

Макар електрическите автомобили да са общо взето безопасни, някои технически или външни фактори могат да предизвикат пожар. Най-често срещаните причини включват:

• *Термично изтичане* ("thermal runaway"). Повишаване на температурата вътре в батерията до точка, при която настъпват екзотермични реакции, самоподдържащи горенето (Larsson et al., 2016);

• *Механично увреждане на батерията*. Удар при катастрофа или пробив на батерийната обвивка може да доведе до късо съединение и запалване (Feng et al., 2020);

• *Дефект в батерийните клетки или системите за управление*. Производствени дефекти или грешки в батерийните системи за термична защита могат да бъдат причина за самозапалване (Zhao et al., 2021);

• *Външни фактори (пожар в околната среда).* Пожар, започнал извън електромобила, също може да доведе до нагряване и детонация на батерията.

Според проучване на (Ola Willstrand et al., 2020), една от ключовите разлики спрямо автомобилите с вътрешно горене е, че веднъж започнал, пожарът при EV може да доведе до многократни възпламенявания, дори часове след първоначалното потушаване. В затворени и подземни пространства това води до редица усложнения (Македонска и др. 2016).

Предизвикателства пред пожарникарите

Необходимост от големи количества вода

При пожар на електрически автомобил (EV) основната задача на пожарникарите не е само да угасят откритият пламък, а да охладят литиево-йонната батерия до безопасна температура, за да се предотврати THP ("thermal runaway") и последващи възпламенявания. Според препоръките на (Ghiji, M et al., 2020) за гасене на горящ електрически автомобил са необходими между 11 000 и 30 000 литра вода, в зависимост от мащаба на пожара и достъпа до батерийния модул. Необходимите огромни количества вода се обуславят от следните факти:

• Литиево-йонните батерии продължават да генерират голямо количество топлина дори след потушаване на външния огън;

• Всяка клетка в батерийния пакет съдържа химическа енергия, която при повреда освобождава топлина в неконтролируема екзотермична реакция (Feng et al., 2020);

• Температурите във вътрешността на батерията могат да надхвърлят 800°C, което води до изпускане на запалими газове (водород, метан, въглеводороди) (Larsson et al., 2016).

В практиката пожарникарите са затруднени от следните фактори:

• *Достъп до вода.* В подземни паркинги или на отдалечени места количеството налична вода често е ограничено до стандартните резервоари/цистерни на пожарните коли (около 1000–3000 литра). Особено ако подземният паркинг е с по-малко от 10 паркоместа. В тези случаи Наредба № Із-1971 от 29 октомври 2009 г., и по-специално Глава IX, чл. 113, ал. 5, т. 2 не изисква подземния гараж да има изградена пожарогасителна система. Следователно се разчита изцяло от водата в пожарния автомобил и последвало водоснабдяване от хидрант, ако има такъв.

• *Продължително охлаждане.* Операциите за гасене може да продължат с часове, като е необходимо непрекъснато обливане на батерията с вода за поддържане на температурата под критичната граница.

• *Специални техники за охлаждане.* В някои случаи пожарникарите използват специални системи за директно инжектиране на вода вътре в батерията, за да се увеличи ефективността на охлаждането (т.нар. "injection cooling") (Bisschop, R et al. 2020).

• Въпреки обилното количество, водата не спира напълно химическите реакции вътре в клетките.

• Реакцията между литий и вода може да доведе до допълнително отделяне на водороден газ (H_2), който е лесно запалим (Feng et al., 2020).

Повторно възпламеняване

Повторното възпламеняване е явление, при което батерията на електрически автомобил се самозапалва отново часове или дори дни след привидното потушаване на първоначалния пожар. Основните причини за това са:

• Останали активни клетки в батерийния пакет продължават да генерират топлина;

• Вътрешно скрити повреди в структурата на батерията могат да задействат допълнително термично изтичане (Zhao et al., 2021);

• Токсични и запалими газове, натрупани в корпуса на батерията, могат да доведат до експлозия или пламък при контакт с кислород.

Според NFPA (2020), в около 25% от пожарите на EV, наблюдавани в САЩ, е било регистрирано поне едно повторно възпламеняване в рамките на 24 часа след първоначалната интервенция. Това поставя пожарникарите пред следните предизвикателства:

• Трудно е да се определи кога батерията е "безопасна";

• Няма универсален метод за гарантиране на пълно охлаждане без демонтаж на батерийния модул;

• Изисква се постоянен мониторинг на температурата на батерията в продължение на часове (често чрез термокамери).

Трудности при достъп до батерията

В много електрически автомобили батерийният модул е разположен в пода на автомобила (платформата на шасито), обграден от здрави защитни капаци от алуминий или стомана, които са устойчиви на механични въздействия и топлина. Най-често срещаните трудности са:

• *Невъзможност за директно охлаждане*. Водата, насочена отгоре, рядко достига директно до батерията, особено ако корпусът е цялостен и неповреден.

• *Механична защита*. Налага се използване на хидравлични инструменти или рязане на корпусни елементи за достъп до батерията, което е времеемко и рисково.

• *Опасност от електрически удар*. Дори след пожар, част от батерията може да остане под напрежение (до 400–800 V), което поставя пожарникарите в риск от токов удар.

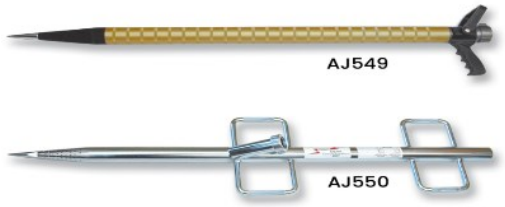
Практически решения

1. Използване на специални инструменти за пробиване на корпуса (например, „fire fighting piercing nozzle

systems“, Rosenbauer BEST (Battery Extinguishing System Technology) и др.).

2. Обучение за идентифициране на безопасни точки за рязане – автомобилните производители започват да предоставят "Emergency Response Guides" (ERG), указващи къде може безопасно да се направи отвор в корпуса на батерията.
3. •Контейнер за потапяне. Тази практика включва потапяне на целия автомобил във воден контейнер.

На фигура 1 са показани крайните елементи на системата „fire fighting piercing nozzle systems“.



Фиг.1. Накрайници на „fire fighting piercing nozzle systems“ [https://shop.darley.com/product/flamefighter-piercing-nozzles/01tUS0000047ar8YAA]

При гасене на пожари в електрически превозни средства (ЕПС), особено в затворени пространства като подземни гаражи, се разглежда тактиката за накланяне или повдигане на автомобила, за да се осигури достъп до батерийния пакет и да се улесни охлаждането му. Тази практика е описана в ръководства за пожарна безопасност и се използва от някои пожарни служби за насочване на водната струя директно към батерията, разположена в пода на автомобила (Firehouse, 2022).

Въпреки това, прилагането на тази тактика в подземни гаражи е практически невъзможно поради няколко причини:

1.*Ограничена височина на пространството*. Подземните гаражи обикновено имат ограничена височина, което затруднява или прави невъзможно използването на подемна техника за повдигане или накланяне на автомобила.

2.*Тегло на електрическите превозни средства*. ЕПС са значително по-тежки от конвенционалните автомобили поради масивните си батерийни пакети. Например, Tesla Model S тежи около 2,241 кг, а Audi e-tron – около 2,490 кг. Това прави ръчното накланяне или повдигане от няколко пожарникари практически невъзможно, особено при активен пожар.

3.*Високи температури при пожари на батерии*. Пожарите в литиево-йонни батерии могат да достигнат температури над 900°C. Тези екстремни температури, съчетани с отделянето на токсични газове, представляват сериозна опасност за пожарникарите, което прави физическото манипулиране на горящия автомобил изключително рисковано (Цанков, Т., 2025).

Освен това, в затворени пространства като подземни гаражи, натрупването на горими газове под тавана може да доведе до експлозивни ситуации. Изследвания показват, че при пожар на ЕПС в полузатворени пространства, температурата на горещите газове в горната част на помещението може да бъде повече от два пъти по-висока в сравнение с открити пространства, което увеличава риска от бързо разпространение на пожара и вторични експлозии (Kang, S. et al. 2025).

Същите ограничения и рискове важат и при пожари на открито, където въпреки по-добрия достъп, теглото на ЕПС и високите температури при пожара продължават да представляват сериозни предизвикателства за пожарните служби.

Поради тези фактори, тактиката за накланяне или повдигане на ЕПС при пожар в подземен гараж и използването на системата „fire fighting piercing nozzle systems“ е не само непрактична, но и опасна. Алтернативни методи, като използване на специализирани системи за пробиване и охлаждане на батериите (например системата Battery Extinguishing System Technology (BEST) на Rosenbauer, която е показана на фиг 2), могат да предложат по-безопасни и ефективни решения за справяне с такива инциденти.



Фиг. 2. Някои компоненти от системата Battery Extinguishing System Technology

Според официалния сайт на Rosenbauer America (https://rosenbaueramerica.com/rosenbauer-battery-extinguishing-system-technology/) техническата спецификация и предимства на техния продукт са:

• *Бързо и лесно използване и настройка*. О отнема по-малко от 2 минути. Активирането на пробивната дюза става за 8 милисекунди, като така се осигурява достъп до вътрешността на батерията за ефективно охлаждане на всички нейни компоненти.

• *Ефективност*. Насочва водата точно там, където е нужно – за охлаждане на батерийния пакет, модулите и клетките отвътре. Пожар от „термален runaway“ (самозапалваща се батерия) може да се прекрати само за 10 минути, с дебит от 30 литра в минута при налягане 6.9 бара (100 PSI) – значително по-малко от препоръките в ръководствата на производителите на EV, които изискват над 30,000 литра вода за същия ефект.

• *Безопасност*. Доказалият се в практиката дизайн държи оператора на около 800 см (8 метра) разстояние от горящия електромобил, като така се ограничава излагането му на топлина и високотоксични изпарения, отделяни при пожар на литиево-йонна батерия.

• *Задейства се от бутилка със сгъстен въздух*, която е стандартна за пожарникарите (около 300 бара), което позволява 3-4 активации на системата BEST.

Като се има в предвид горепосоченото тази система значително намалява нужния обем вода (примерно от 30 000 литра до под 500 л). Но това може да е така само ако системата се ползва ефективно – трябва отвора, който се създава (примерни такива са показани на фиг.3) да е на точното място. Батерията в пода на ЕПС е разпределена по цялата площ, а т.нар. термичен „runaway“ често започва локално – в един модул или клетка. Следователно отворът и пожарогасенето трябва да е точно там. Използването на термокамера е логичен и силно препоръчителен подход. С

термокамера може ясно да се идентифицира прегрятата зона (където температурата често надвишава 200–300°C дори преди да избухне огън) и там да се постави дюзата. Това значително увеличава ефективността на охлаждане, намалява риска от повторно запалване и съкращава времето за овладяване на инцидента.



Фиг. 3. Отвори направени в корпуса на батерията чрез Battery Extinguishing System Technology

Потапянето на ЕПС в контейнер макар и ефективно при охлаждане също има недостатъци. Изисква специализирана логистика и транспорт до мястото на инцидента. При пожар в подземен гараж тази тактика е практически неприложима поради ограничена височина и пространство и невъзможност за въвеждане на тежка подемна техника. Такъв подобен контейнер е показан на фиг. 4.



Фиг. 4 Специализиран контейнер за потапяне на ЕПС

От представеният сравнителен анализ става ясно, че пожарите в батерии могат да достигнат температури над 900°C, генерират токсични газове и се характеризират с многократни възпламенявания. Традиционният подход с обилно обливане с вода (над 30 000 литра) често не гарантира пълно потушаване на пожара. Достъпът до батерийния модул е силно затруднен поради неговото разположение и защитна структура, а в подземни гаражи накланяне или обръщане на ЕПС е практически невъзможно.

В този контекст, използването на съвременни системи като BEST (Battery Extinguishing System Technology) или други подобни системи предоставя интегрирано решение, което отговаря на трите най-важни изисквания:

• *Бързина на действие* – достъп до батерията и охлаждане в рамките на минути;

• *Ефективност* – значително намаляване на нужния воден ресурс и фокусирано гасене отвътре;

• *Безопасност* – дистанционно управление и ограничаване на риска за пожарникарите.

Заключение

Преминаването към интелигентни, специализирани системи за гасене на пожари в електрически автомобили не е само въпрос на иновация, а на необходимост, продиктувана от реалните рискове, пред които е изправен всеки екип за аварийна реакция. Институционалното приемане на тези методи, както и осигуряването на подходящо оборудване и обучение, трябва да се превърне в приоритет за всяка съвременна пожарна служба. Също така трябва да се промени Наредба № Із-1971 от 29 октомври 2009 г., и по-специално Глава IX, чл. 113, ал. 5, т. 2 и да се изграждат пожарогасителни системи във всеки подземен гараж не зависимо от броя паркоместа, като може да са подобни на тези описани в [Kostadinova, N. et al. 2023].

В допълнение, докладът подчертава нуждата от използване на термокамери, които да насочат гасителната дюза точно към зоната на прегряване. Това не само увеличава ефективността, но и минимизира риска от повторно възпламеняване.

Литература

Цанков Т. (2025). *Пожарна безопасност при експлоатация на електроавтомобили в подземни гаражи*. Монография, ISBN: 978-619-93275-0-0, София.

Македонска Д., Ел. Власева. (2016). Пожарни инциденти в транспортни тунели – статистика, анализ, моделиране. *59-та Международна научна конференция МГУ „Св. Иван Рилски“,* стр.56 – 63, ISSN 1312-1820.

Bisschop, R., Willstrand, O., & Rosengren, M. (2020). Handling lithium-ion batteries in electric vehicles: Preventing and recovering from hazardous events. *Fire Technology, 56,* 2671–2694. https://doi.org/10.1007/s10694-020-01038-1 2020

Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2020). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials, 10,* 246–267, https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.07.003.

Firehouse (2022). Available on https://www.firehouse.com /operations-training/article/21255066/university-of-extrication-electric-vehicle-fire-suppression?utm_source= chatgpt.com

Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., & Gamble, G. A. (2020). Review of lithium-ion battery fire suppression. *Energies, 13(19),* 5117. https://doi.org/10.3390/en13195117.

Kang, S., Kwon, M., Choi, J.Y. et al. (2025). Full-Scale Fire Testing to Assess the Risk of Battery Electric Vehicle Fires in Underground Car Parks. *Fire Technol.* https://doi.org/10.1007/s10694-024-01694-7

Kostadinova, N., D. Makedonska, B. Vladkova, (2023). Application of Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels in Bulgaria, *Proceedings of the 5th International Underground excavations symposium* 5-6-7 June / Haziran 2023 – Istanbul / Turkiye, ISBN: 978-605-01-1568-0, pp. 477-488.

Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests. Batteries (MDPI), 2(2), 9. DOI: 10.3390/batteries2020009, 2016

Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson. Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles, RISE Report 2020:90, ISBN: 978-91-89167-75-9, Available on: https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1522149/FULLTEXT01.pdf, Last updated: 2023

Zhao, J., Xue, F., & Fu, Y. A comparative study on the thermal runaway inhibition of 18650 lithium-ion batteries by different fire extinguishing agents. Process Safety and Environmental Protection, 149, 1–10. Available on : https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.038 2021

NFPA. (2020). EV Stranded Energy. NFPA Journal, January–February, Available on https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2020/January-February-2020/Features/EV-Stranded-Energy 2020

TECHNICAL SOLUTIONS FOR ORE QUALITY CONTROL IN UNDERGROUND MINING

Erik Tsentovskiy, Sergey Mihalev

Dundee Precious Metals Chelopech, 2087 Chelopech; E-mail: Erik.Tsentovskiy@dundeeprecious.com; Sergei.Mihalev@dundeeprecious.com

ABSTRACT This report examines the systems and methods for quality control of the ore mined at the *Chelopech* mine. The report focuses on the wireless system for initiating production blasts, introduced at the beginning of 2025. A specific example is given of a stope mined using the system, and the results achieved are presented.

Key words: ore quality control, wireless blasting.

ТЕХНОЛОГИЧНИ РЕШЕНИЯ ЗА УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОТО НА РУДАТА В УСЛОВИЯТА НА ПОДЗЕМЕН РУДНИК

Ерик Центовский, Сергей Михалев

„Дънди Прешъс Металс Челопеч“, 2087 Челопеч

РЕЗЮМЕ. Настоящия доклад разглежда системите и методите за контрол на качеството на рудата при добива осъществяван в рудник „Челопеч“. Акцент на доклада е въведената в началото на 2025 г. безжична система за иницииране на производствените взривявания. Разгледан е и конкретен пример за добита със системата камера и постигнатите резултати.

Ключови думи: контрол на качеството; безжично иницииране на взривяването.

Въведение

Развитието на технологиите в последните десетилетия, водят до значително повишаване на производителността в добивната индустрия. Разработването на нови минни машини позволява достигането на добив от милиони тонове руда на година. За покриването на производствените необходимости освен повишеното количество на добитите суровини се изисква и все по-прецизно управление на качеството на добиваните подземни богатства.

Най-ефикасно е максимална част от управлението на качеството на рудата да се случва още при процеса на нейния добив. Съществуват механизми добита руда с показатели извън оптималните стойности да се обработи и да се приведе в желаните граници, но това са времеотнемащи процеси, които допълнително оскъпяват крайната продукция. В настоящия доклад са разгледани възможностите и технологичните решение, за управление на качеството на рудата посредством иновативно планиране и проектиране на добивни дейности, станали възможни в следствие на технологични нововъдения в минния бранш и взривното дело. Обектите на анализ в настоящия доклад са част от Рудник „Челопеч“, разработван от Дънди Прешъс Металс.

Общи сведения за находището

Рудник Челопеч се намира на около 70км източно от град София. Начинът на разкриване на находището в дълбочина се базира на проучване и икономическа оценка на установените рудни тела, както и на прилагане на подходящи технологии на разработване. Към настоящия момент находището е разкрито с четири вертикални и две наклонени шахти. Системата на разработване е камерна с последващо запълнение на изветото пространство. Годишният добив на руда е 2.2 млн.т. а за подготовка на добивните изработки ежегодно се прокарват 7000м капитални и нарезни изработки (Годишен проект, 2025).

Дейности прилагани за контрол на качеството на рудата в рудник Челопеч

Основни етапи за контрол на качеството на рудната прилагани в условията на рудник Челопеч са:

- ***Проучвателни дейности:*** От ключово значение за ефективното разработване на едно находище, в това число и контрола на качеството, е геоложката проученост на рудните тела. В условията на рудника ежегодно се реализират над 40000 м проучвателни сондажи, благодарение на които се откриват допълнителни ресурси и се повишава степента на изученост за наличните запаси и ресурси, което позволява по-коректното планиране на минните дейности;
- ***Минно планиране:*** Базирано на геоложката изученост и използваните технологии, ключова роля за качеството на добитата руда играе минното планиране. В реалността рудните блокове не са хомогенни и в различни части от масива имат различни съдържания на полезни компоненти, разнородни геоложки структури и т.н. Минното планиране има за цел находището да се разработва по начин и последователност, които да осигурят във всеки момент добитата руда да отговаря на изискванията. Още в етап на планиране се разглеждат прогнозните количества и съдържания при добив от различните добивни камери и разработването се планира по начин, при който добивът и шихтоването на добитата минна маса осигуряват руда със средно съдържание в границите на необходимите параметри.
- ***Система на разработване и прилагани технологии:*** Системата на разработване и прилаганите технологии определят както количеството, така и качеството на добитата руда. Системата на разработване се определя още началния етап на планиране, преди да е започнало разработването на дадено находище.
- ***Геоложки мониторинг и контрол:*** Друга стъпка в контрола на качеството на рудата е мониторингът на вече отбитата чрез ПВР руда и управлението на

нейното извозване от добивните камери. Целта на този процес е чрез наблюдение и анализ на вече отбитата руда (количество, зърнометрия, примеси и др.) да се направи график за извоз от различните добивни камери, така че да се подсигури в обогатителна фабрика да постъпва руда с осреднени показатели в границите на целевите параметри. За целта се прави визуален оглед на добивните камери и се взимат проби за лабораторен анализ на добитата руда. Съгласно събраната информация се оптимизира плана за извоз (Цялостен проект, 2029).

Безжична система за инициииране (Презентация Webgen, 2024)

Основната технология за контрол на качеството при взривното отбиване на рудата, разглеждана в настоящия доклад, е безжичната система за инициииране – Webgen. Системата се използва успешно в рудник „Челопеч“ от началото на 2025 г. При нея използваният програмируем електронен детонатор се инициира от безжичен приемник с антена. Системата позволява всички взривни сондажи да бъдат предварително заредени (до 25 дни преди желаното взривяване) и с определена последователност на взривяване.

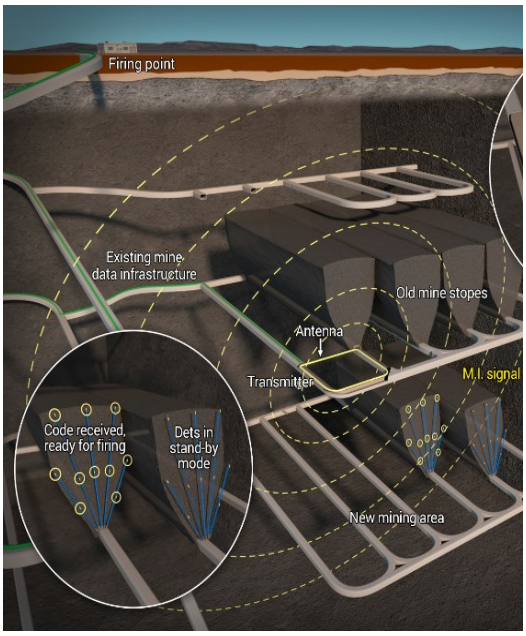


Фиг. 1. Сглобен бустер WebGen и отделните му компоненти

За инициииране на сигнала се използва нискочестотна антена. Използва се нискочестотния диапазон, заради свойството на вълните с ниски честоти да имат много по-добра пенетрация във всякаква среда – скала, вода и др.

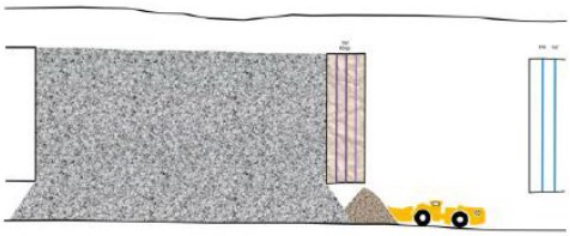
За да се гарантира наличието на обхват във взривните сондажи, където ще се намират безжичните детонатори, преди зареждането им се извършва изследване на силата на сигнала.

Използването на безжични детонатори разкрива нови възможности и позволява различен подход при разработването на добивни камери, който е невъзможен при системи, които разчитат на „линия“, която да пренася сигнала за инициииране (кабел при електрическата и електронната системи, ударна тръбичка при неелектрическата или огневи шнур при огнево инициииране). Основна особеност е, че след предварително зареждане на цялата добивна камера, в последствие добивните ветрила могат да се взривяват на части, поетапно и в произволна последователност. Така след първоначалното инициииране, впоследствие има възможност да бъдат взривени части, до които вече няма физически достъп. По този начин се разгръща потенциал за много по-комплексно проектиране на взривните работи в добивните камери, което позволява последователност на взривяване, невъзможна при използването конвенционални технологии.



Фиг. 2 Примерна схема на рудник разработван с помощта на системата WebGen

Пример за такъв подход е взривяването на цялата добивна камера без оставен временен целик, който държи съседната камера в запълнение стабилна и намалява вероятността за внасяне на примеси от нея и обедняване на рудата. Системата WebGen позволява този целик да бъде зареден заедно с останалите части от добивната камера, но да се взриви последен, когато вече няма физически достъп до него, след като останалата част от камерата е иззета. Това осигурява минимално обедняване и то само в частта от целика, а не от цялата добивна камера (фиг.3.)

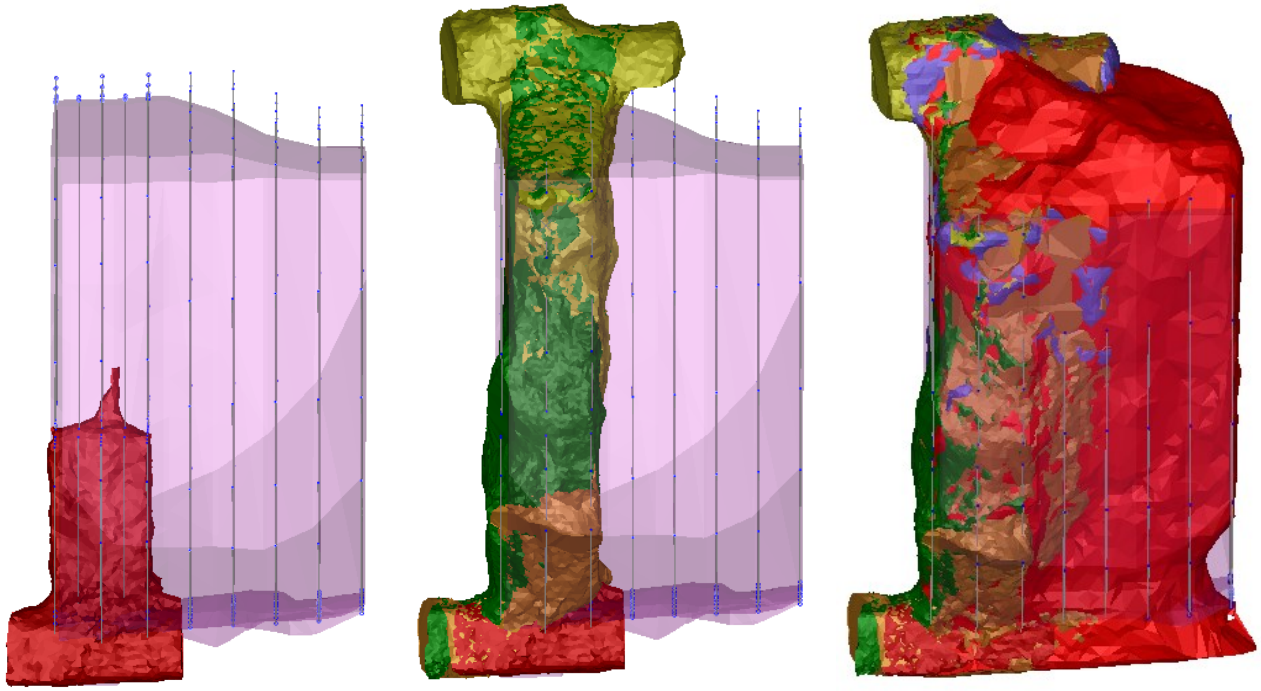


Фиг. 3 Пример за временен целик, взривен след изземването на останала част на добивната камера

Прилагането на системата дава възможност за намаляване на необходимите проходчески дейности. При конвенционалните методи е необходимо нарезните работи да стигат до края на проектната камера. В случая с WebGen има възможност горното ниво да бъде изпълнено единствено до отрезното пространство, което спестява време и средства. Предварителното зареждане на взривните сондажи и възможността за програмиране дава възможност на избор за последователността на взривяване на всеки отделен участък/зона от добивната

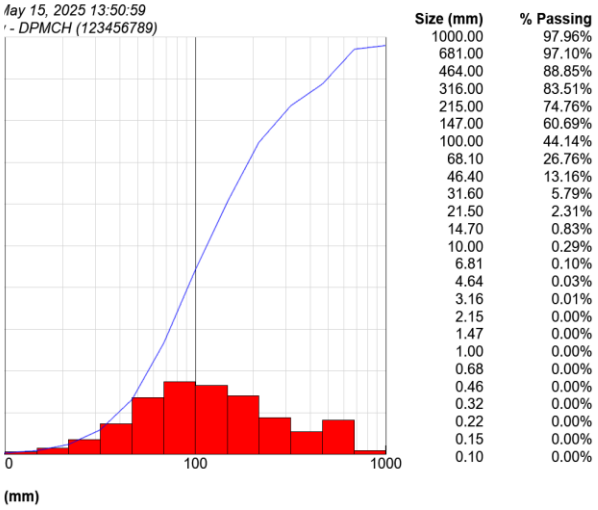
камера. По този начин към настоящия момент в условията на рудник „Челопеч“ са приложени вариантите с оставяне на временен целик пред камера в процес на запълнение, както и вариантът с намаляване на проходческите дейности на горното ниво и обратна посока на взривяване на добивните ветрила.

За първото прилагане на системата в рудник Челопеч е избран вариантът с елиминиране на част от проходческите дейности и обратна посока на взривяване при камера в блок 152. Вземайки предвид възможностите на системата WebGen, при проектирането на подготвителните работи необходимите проходчески дейности са намалени с над 30м. А обратната посока на взривяване на основната част от камерата осигурява възможност по-малък обем от рудата да бъде извозен в дистанционен режим, повишавайки интензитета на извозните дейности (База данни ДПМЧ, 2025).



Фиг. 4. Триизмерен модел, на добивна камера 152-165-5А в различни етапи от добива

Основните постигнати резултати от добива на камерата са представени в таблица 1, а резултатите от анализа за едрината на късовете – на фигура 5.



Фиг. 5. Резултати от зърнометричния анализ на камера 152-165-5А

Таблица 1. *Параметри от добива на камера 152-165-5А*

Камера:	Надработка [t/%]	Подработка [t/%]
152-165-5А	3938/12.9%	2385/7.8%

Получените резултати ясно показват възможностите на безжична система за инициириане. Добивна камера 152-165-5А се намира в една от най-предизвикателните зони за добив в рудник Челопеч и въпреки това дадени стойности за надработка и подработка са значително по-ниски от средните за рудника (Презентация ДПМЧ, 2025).

При конвенционалните методи и поетапното зареждане на сондажи има вероятност те да бъдат нарушени от структурите и вибрациите, генерирани от предходни взривявания. Това от своя страна налага препробиване на сондажите, което отнема допълнителни време и ресурс. Въпреки че в източната част на камера 5В е установена структурна нарушеност, предварителното зареждане на всички сондажи осигури безпроблемното осъществяване на всички взривявания

Заключение

Най-широко използваната в наши дни технология за инициириане при извършване на взривни работи е

неелектрическата система за взривяване. Тя има редица предимства – сравнително лесна е за работа, има ниска себестойност, осигурява високи нива на безопасност. Това е най-широко използваната система както при прокарването на пътно-транспортни тунели и изработки в подземни рудници, така и при извършване на производствени взривявания за добив на руда и инертни материали в подземни и открити рудници. С напредването на технологията се разработват програмируеми електронни детонатори – те са значително по-скъпи, но закъснението на всеки от тях може да се програмира с точност до 1ms и това може да се извършва непосредствено преди поставянето на детонатора във взривната дупка или сондаж. Това позволява проектирането на взривни работа с висока точност, като много прецизно се направлява разпространението на ударната вълна; сеизмиката, създадена от взривните работи; посоката на отхвърляне на взривената маса и редица други. Това ги налага като предпочитано средство при изпълнението на специализирани взривни работи в цивилното строителство (събаряне на сгради, взривни работи в близост до населени места и ключова инфраструктура и др.) и при необходимост от взривни работи с висока прецизност в минния бранш.

Следващото достижение на тези технологии е разгледаната и представена в тази доклад технология за безжично иницииране на взривни работи Webgen.

Системата изисква по-високи оперативни разходи и високо квалифициран персонал, но навлиза все повече в минното дело.

Освен вече изброените предимства на електронната система (Webgen също използва програмируеми електронни детонатори), възможността за дистанционно и безжично иницииране на детонатори посредством нискочестотни електромагнитни сигнали дава нови възможности при проектиране на взривни работи.

Ключово предимство на системата е възможността за иницииране на взривяване на зони без физически достъп. Работата със системата е свързана с много прецизно планиране на пробивно-взривните работи. За прилагането й се изисква повече подготвителни дейности (преди започване на добива), но след приключване на зареждането, процесът на добив се ускорява значително.

Както всяка иновация в индустрията, и в случая на безжичната система за иницииране има редица предизвикателства, свързани с въвеждането на нови методи и технологии, но също така се разкриват и множество възможности за добив по начин и на места, на които досега това не е било възможно с конвенционалните методи на иницииране. При разумно и рационално използване, безжичната система може да даде решение на проблеми, които до преди това са смятани за нерешими и да отключи зони, които са били смятани за недостъпни или прекалено рискови за добив. Това в комбинация с други фактори, като дизайн съобразен с извоза и оптимизирано отхвърляне на добитата рудна маса към точката за извоз на добивната камера, повишената сигурност на бустерите с безжичен детонатор Webgen, повишен контрол върху сеизмиката при взривни работи и други демонстрират високия потенциал на системите за контрол на качеството при добива на руда от подземни рудници.

Литература

Годишен проект ДПМЧ 2025 г.

Цялостен проект ДМПЧ 2023 – 2029 г.

База данни ДПМЧ. (2025). отдел „Технически служби“.

Презентация ДПМЧ. (2025). Резултати показани от безжична система за иницииране на взривни работи Webgen при разработването на добивна камера 152-165-5А, отдел „Технически служби“.

Презентация Webgen. (2024). Безжична система за иницииране на взривни работи Webgen. Орика Мед България.

MINERAL COMPOSITION OF OXIDE ORES FROM A PORPHYRY COPPER DEPOSIT AND TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES FOR COPPER EXTRACTION

Teodora Yankova, Mihail Petrov, Nikolay Nestorov, Irena Grigorova

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

ABSTRACT. Laboratory test work has been conducted to examine the mineral and chemical composition of oxide ores from a porphyry copper deposit to determine their beneficiation potential. The studies included chemical analysis and X-ray diffraction analysis of material from a technological sample, phase analysis to identify the forms of copper (Cu) presence in the ore, and microscopic studies using a polarising and scanning electron microscope of polished sections from ores samples and polished briquettes, prepared from ore fraction 3 - 0 mm. The results obtained indicate that 90% of copper minerals are soluble in H_2SO_4, highlighting the need to conduct technological studies for maximum copper extraction from the ore by chemical leaching.

Key words*:* mineral composition, oxide ores, leaching.

МИНЕРАЛЕН СЪСТАВ НА ОКСИДНИ РУДИ ОТ МЕДНОПОРФИРНО НАХОДИЩЕ И ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗВЛИЧАНЕ НА МЕД

Теодора Янкова, Михаил Петров, Николай Несторов, Ирена Григорова

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

РЕЗЮМЕ. Проведени са изследвания за изучаване на минералния и химичен състав на оксидни руди от меднопорфирно находище с цел определяне на тяхната обогатимост. Извършените изследвания включват химичен анализ и дифрактометричен рентгеноструктурен анализ на материал от техноложка проба, фазов анализ за определяне формите на присъствие на мед (Cu) в рудата, микроскопски изследвания с поляризационен и сканиращ електронен микроскоп на препарати от късови образци и препарати-брикети от класа 3 – 0 mm на рудата. Получените резултати показват, че 90% от медните минерали са разтворими в H_2SO_4, което обуславя необходимостта от провеждането на технологични изследвания за максимално извличане на медта от рудата чрез химично излужване.

Ключови думи: минерален състав, оксидни руди, химично излужване.

Въведение

Металът мед има разнообразни приложения в енергетиката, електрониката, строителството, машиностроенето и др. Глобалното търсене на метали като мед, желязо, алуминий, никел и злато, както и на енергийни ресурси като петрол и уран, нараства значително, особено в бързоразвиващите се икономики като Китай, Индия и Бразилия, което предизвиква съществени промени в минната индустрия (Tomova, 2023). Това важи в особена степен за медта, която намира широко приложение в енергетиката, електрониката, строителството, машиностроенето и други сектори.

Нарастващото търсене и потребление на медта, свързано с прехода към зелена икономика и увеличеното производство на електромобили води до нарастване на цените на метала.

Меднопорфирните находища представляват най-важният източник на мед, но са носители и на други метали като молибден, злато и сребро, в някои случаи и на елементи от групата на платината (PGE)(John and Taylor, 2016). Находищата се характеризират с прожилково-впръслечна сулфидна минерализация с ниско съдържание на мед, но поради наличието на редица съпътстващи метали, както и по-евтиният добив на рудите, извършван по открит способ, експлоатацията им е икономически най-ефективна (Dilles and John, 2021). За детайлното картиране на скалните разновидности и определянето на характеристиките на находището могат да се прилагат геофизични методи, които са сравнително лесни за изпълнение и се основават на разликите във физичните свойства между рудните минерали и вместващите ги скали (Томова, 2023). Чрез подобна допълнителна информация могат да се установят сложни процеси при формирането на находищата.

В много от меднопорфирните находища в резултат на супергенни процеси се формира вторична вертикална зоналност с развитие на окислителна зона, зона на вторично сулфидно обогатяване и първично сулфидно орудяване, разположено в дълбочина (Богданов, 1987). Оксидните и сулфидни медни руди се различават по минерален и химичен състав, което предопределя различията в технологиите за тяхната преработка, използвани в минно-добивната промишленост. Сулфидните медни руди се подлагат на обогатяване чрез флотация (Янкова и др., 2021; Янкова, Григорова, 2022) и металът от флотационните концентрати се получава с последващи конвенционални пирометалургични процеси. Оксидните медни руди са съставени главно от медни силикати, карбонати и оксиди и се класифицират като по-нискокачествени от сулфидните. Според някои автори (Feng et al., 2022) за тях също е приложим флотационният метод, но на практика за добив на мед от оксидни медни руди най-широко използвани са хидрометалургичните процеси с прилагането на различни излужващи реагенти.

Ефективността на добива на мед зависи не само от минералният състав на рудите, но и от прилаганите технологии. В тази връзка, управлението на качеството на добива на руда, с използването на съвременни методи, например за контролиране на движението на взривената скална маса, подчертава значението на иновативните решения за мониторинг и контрол, които допринасят за по-прецизно отделяне на ценните минерали и намаляване на загубите (Александрова и др. 2018).

Глобалната тенденция за постепенно изчерпване на ресурсите от медни сулфидни руди води до разработването на алтернативни икономически ефективни подходи за добив на мед от оксидни медни руди (Bingöl and Canbazoğlu, 2004; Helle and Kelm, 2005; Liu et al., 2016; Nicol, 2018; Nicol and Akilan, 2018; Kang et al., 2021; Mohanraj et al., 2022; Feng et al., 2022)

В настоящата работа се привеждат резултатите от извършените изследвания за определяне на минералния и химичен състав на оксидна руда от меднопорфирно находище, с цел избор на ефективна и икономически най-изгодна технология за извличане на мед от рудата.

Методи и материали

За целта на проведените изследвания е взета техноложка проба с тегло 500 kg от оксидна руда от меднопорфирно находище, която е подложена на трошене, пресяване и квартоване. От получения материал са отделени три частни проби с различна едрина – Проба № 1 – с едрина 50 – 0 mm, Проба № 2 – с едрина 25 – 0 mm и Проба № 3 – с едрина 12.5 – 0 mm. От частна Проба № 3 след трикратно квартоване е отделено количество от 50 kg, което е натрошено до едрина 3 - 0 mm с предназначение за химични и други изследвания. От проба № 1 са заделени образци за изработване на микроскопски препарати и изучаване минералния състав на рудата.

За изучаване на минералния и химичен състав на оксидната руда са извършени следните изследвания: химичен анализ; фазов анализ за определяне формите на присъствие на медта в рудата (разтворима във вода мед, оксидна мед свързана и свободна, вторични и първични медни сулфиди); дифрактометричен рентгеноструктурен анализ; минераложки изследвания с поляризационен и сканиращ електронен микроскоп на микроскопски препарати, изготвени от рудни късове и полирани препарати-брикети от класа 3 - 0 mm на рудата.

Подготовката на техноложката рудна проба за провеждане на различни изследвания е извършена в лабораториите на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“. Химичните изследвания, фазовият анализ и рентгеноструктурният дифрактометричен анализ са проведени в лабораториите на „Евротест - Контрол“ ЕАД, а минераложките изследвания – в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ с използването на поляризационен микроскоп MEIJI MT 9430 и сканиращ електронен микроскоп JEOL JSM-6010 Plus/LA. Извършени са количествени рентгеноспектрални микроанализи на отделни медсъдържащи и глинести минерали, присъстващи в оксидната руда.

Резултати и дискусия

Химичен анализ на оксидна руда

Резултатите от извършения химичен анализ на оксидна руда от меднопорфирно находище показват, че тя се характеризира с високо съдържание на мед – 3.10 % (Табл. 1). Установява се повишено съдържание на SiO_2 (62.68 %), Al_2O_3 (13.65 %), K_2O (3.69 %) и наличие на Na_2O, CaO, MgO, свързано с присъстващите в рудата нерудни фази.

Таблица 1. *Химичен анализ на оксидна руда от техноложката проба*

Компоненти	Съдържание
Cu	3.10 %
S	<0.01 %
Fe (Fe_2O_3)	2.2 (4.96) %
Mo	9 g/t
Pb	47 g/t
Zn	80 g/t
As	<3 g/t
SiO_2	62.68 %
Al_2O_3	13.65 %
CaO	1.44 %
MgO	0.81 %
Na_2O	1.57 %
K_2O	3.69 %
Au	<0.05 g/t
ЗПН	7.15 %

Фазов анализ на медта в оксидна руда от техноложката проба

Таблица 2. *Фазово разпределение на медта в оксидна руда от техноложката проба*

Форма на съединението	Съдържание, (%)	Разпределение, (%)
Cu, разтворима във вода	0.020	0.66
Оксидна Cu, свободна	2.550	83.88
Оксидна Cu, свързана	0.209	6.88
Вторични Cu сулфиди	0.091	2.99
Първични Cu сулфиди	0.170	5.59
Обща Cu	3.040	100.0

Данните от извършения фазов анализ на оксидна руда от техноложката проба са представени в Табл. 2. Основната част от медта е във формата на свободна оксидна мед – 83.88 %. В по-малко количество е представена оксидната свързана мед – 6.88 %, следвана от медта във вид на първични сулфиди (5.59 %) и вторични сулфиди (2.99 %).

Рентгеноструктурен анализ на медна оксидна руда

Данните от извършения рентгеноструктурен анализ на оксидна руда, показват наличие в изследваната проба предимно на скалообразуващи минерали от вместващите скали и съдържание на 4 % рудни фази (Табл. 3).

Скалообразуващите минерали са представени от кварц (42 %), мусковит (14 %), албит (10 %), ортоклаз (9 %), хлорит – клинохлор (9 %), пироксен – диопсид (5 %). Нерудните фази, съпътстващи медната минерализация са представени преимуществено от кварц, калцит (2 %), доломит (2 %) и барит (2 %). В техноложката проба е установено наличието на следните рудни фази: тенорит (2 %), куприт (1 %) и халкопирит (1 %).

Таблица 3. *Минерален състав на оксидна руда от технологката проба*

Компоненти	Съдържание, (%)
Кварц - SiO_2	42
Мусковит – $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(F,OH)_2$	14
Албит - $NaAlSi_3O_8$	10
Ортоклаз - $KAlSi_3O_8$	9
Хлорит (Клинохлор) - $Mg_5Al(AlSi_3)O_{10}(OH)_8$	9
Пироксен (Диопсид)- $CaMgSi_2O_6$	5
Калцит - $CaCO_3$	2
Доломит - $Ca,Mg(CO_3)_2$	2
Барит – $BaSO_4$	2
Тенорит - CuO	2
Куприт – Cu_2O	1
Халкопирит - $CuFeS_2$	1

Минераложка характеристика на оксидните руди от технологката проба

Визуално макроскопски в изследваните рудни образци се наблюдава наличие на вторична медна минерализация, която ги оцветява в различни нюанси на зеления цвят (от яркозелено до синьозелено). Наблюдава се изобилие от фини прожилки, гнезда, налепи и финопрашести маси от вторични медни фази, отложени по пукнатини, празнини и пори сред вместващите скали. По повърхността на някои образци се наблюдават налепи с черен цвят от манганови хидроксиди, с примеси от железни хидроксиди.

В окисните руди се установява наличието на медни карбонати - малахит $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ и азурит $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$; медни силикати – хризокола $(Cu,Al)_2H_2Si_2O_5(OH)_4.nH_2O$; медни оксиди – куприт Cu_2O и тенорит CuO и др.

Малахитът се наблюдава във вид на фини прекъснати жилки, прожилки, гнезда, корички с радиалнолъчест строеж, налепи, финозърнести агрегати и импрегнации. В количествено отношение преобладава финопрашестият малахит, диспергиран по пукнатини и пори във вместващите скали като ги пигментира в характерния зелен цвят.

Азурит. В сравнение с малахита е много по-слабо застъпен. Наблюдава се в асоциация с малахит и под формата на малки гнезда сред вместващите скали или сред хризокола, както и във вид на фини импрегнации.

Хризокола. Хризоколата макроскопски е наблюдавана в асоциация с малахит и монтморилонит в променени, аргилизирани вместващи скали във вид на импрегнации от финопрашести агрегати. В микроскопските препарати се срещат фини жилки с дебелина под 1 mm, натечни и прашести агрегати, често неоднородни, образуващи смеси с глинести минерали или с малахит (фиг. 1a). Данни за химичния състав на сравнително еднородна хризокола от оксидната руда (1) и хризокола с примеси от глинести минерали (2, 3) са показани в табл. 4. Съгласно литературните източници хризоколата се характеризира с неуточнена структура, променлив химичен състав и непостоянно съдържание на вода.

Таблица 4. *Химичен състав на хризокола от оксидна руда*

Компоненти	Съдържание, (%)		
	1	2	3
CuO	37.56	22.35	21.15
SiO_2	32.38	41.67	41.41
Al_2O_3	2.82	6.18	11.40
FeO	1.09	5.13	1.35
CaO	4.70	2.01	1.41
MgO	-	0.24	0.20
Na_2O	0.33	1.33	0.86
K_2O	1.09	0.20	0.19
TiO_2	0.14	0.08	0.12
SO_3	-	0.82	1.91
H_2O	19.89	19.99	19.99
Σ	100.00	100.00	100.00

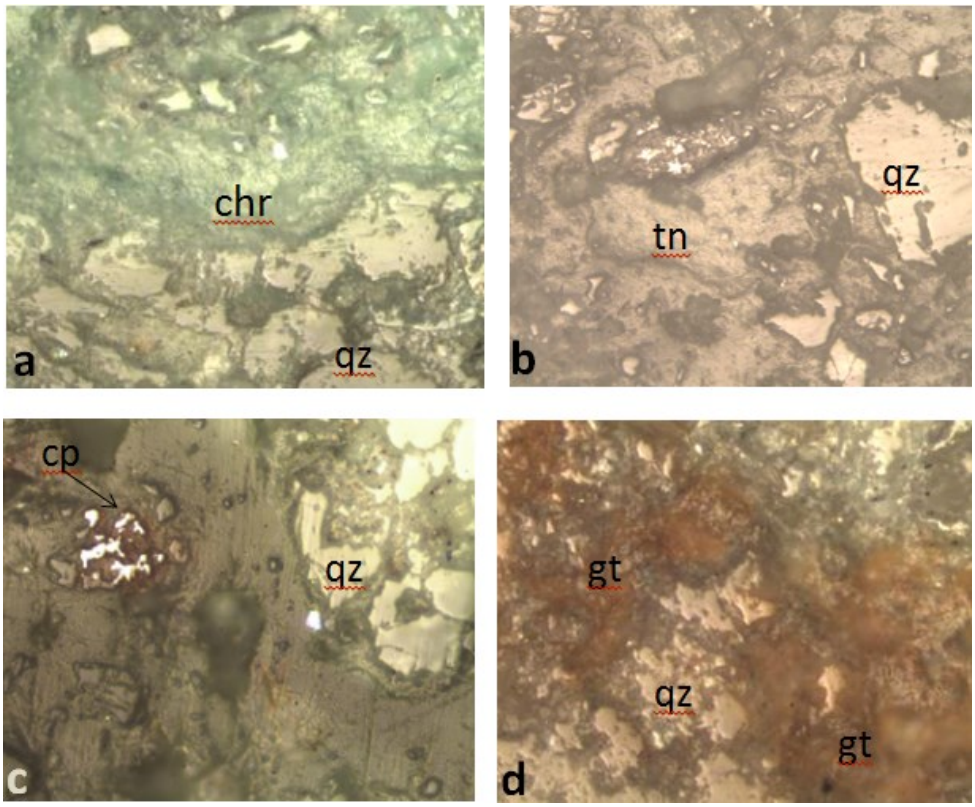
Тенорит и *куприт.* Наблюдавани са единични частици от тенорит и отделни, кородирани зърна от куприт (фиг. 1b, c).

Железни хидроксиди (гьотит). Железните хидроксиди са образувани в резултат на окислението на първични железни сулфиди (пирит), от които не се наблюдават реликти. Срещат се налепи и прашести агрегати от гьотит с охрестожълти и ръждивокафяви вътрешни рефлекси в ожелезнените на места вместващи скали (фиг. 1d).

Глинести минерали. Глинестите минерали са отложени по пукнатини, под формата на налепи и импрегнации сред вместващите скали. Данните от проведените анализи показват наличие на илит и каолинит (Табл. 5). Установено е и присъствие на медсъдържащ монтморилонит с бледозелен цвят или жълтеникаво зелен и кафяв цвят вследствие примеси от железни хидроксиди. С бензидин медсъдържащият монтморилонит се оцветява с характерен син цвят, а от солна киселина се обезцветява с отделяне на фини мехурчета и бял глинест остатък. Медсъдържащият монтморилонит е нееднороден и показва различия в съдържанието на мед.

Таблица 5. *Химичен състав на глинести минерали от оксидна руда*

Компоненти	Илит	Каолинит
	Съдържание (%)	
SiO_2	47.21	31.43
Al_2O_3	27.05	46.72
Na_2O	0.26	0.36
K_2O	11.79	0.70
FeO	5.09	1.89
CaO	5.34	0.84
MnO	0.57	0.03
MgO	2.09	0.87
CuO	0.57	2.01
SO_3	-	0.27
H_2O	-	14.88
Σ	99.97	100.00



Фиг. 1. Микрофотографии на минерали от оксидна руда, техноложка проба. Отразена светлина, N II, размер на видното поле 425 µm – a, d; 840 µm – b, c; a) Нехомогенна хризокола (chr) с примеси от глинести минерали и кородиран кварц (qz); в) Частица от тенорит (tn) и кородиран кварц (qz); c) Кородирани частици от куприт (cp) и кварц (qz); d) Fe хидроксиди – гьотит (gt) в нерудна основна маса.

Заключение

Резултатите от проведените изследвания показват, че оксидната руда от техноложката проба се характеризира с високо съдържание на мед – 3.14 %.

Медта е представена главно от оксидни медни минерали – около 90 % от общата мед. Съдържанието на първични и вторични сулфиди е сравнително незначително - под 9 %.

Оксидната мед в рудата присъства във формата на карбонати, силикати и оксиди – малахит, азурит, хризокола, куприт, тенорит и др, които са лесно разтворими в H_2SO_4 при стайна температура.

Общото съдържание на мед и съдържанието на разтворима мед в рудата показват, че методът на химично излужване е подходящ за извличане на метала.

Присъстващите в рудата и вместващите скали глинести минерали – каолинит и илит според Helle and Kelm (2005) не оказват влияние върху ефективността на химичното излужване, докато смектитите понижават ефективността.

Необходимо е провеждането на технологични изследвания за определяне на възможността за ефективно извличане на медта от оксидната руда чрез прилагане на химично излужване със H_2SO_4

Методът на химично излужване представлява широко използван метод за извличане на мед от оксидни медни руди поради неговата висока ефективност, по-ниски разходи и консумация на електроенергия в сравнение с другите методи за получаване на метала.

Литература

Александрова, Е., Д. Георгиев, Д. Кайков, И. Копрев. (2018). Управление на качеството на добива на руда в полиметални находища с използване на съвременни технологии за контролиране на движението на взривената скална маса. *VI Национална научно-техническа конференция с международно участие „Технологии и практики при подземен добив и минно строителство“, Девин*, България, стр. 78-81.

Богданов, Б. (1987). *Медните находища в България*. Техника, 388 с

Янкова, Т., И. Григорова (2022). Разработване на технология за обогатяване на първични сулфидни руди, *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски, 65,* 55-60. https://doi.org/10.5281/zenodo.14412125

Янкова, Т., Т. Ангелов, И. Нишков (2021). Изследвания върху веществения състав и физико-механичните свойства на меднопорфирна руда. *Год. МГУ „Св. Иван Рилски”, 64*, 103-108.

Bingöl, D., M. Canbazoğlu (2004). Dissolution kinetics of malachite in sulphuric acid. *Hydrometallurgy, 72*, 159–165. doi:10.1016/j.hydromet.2003.10.002

Dilles, J. H., D. A. John (2021). Porphyry and Epithermal Mineral Deposits. In: *Encyclopedia of Geology (Second Edition),* 847-866. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102908-4.00005-9

Feng, Q., W. Yang, Sh. Wen, H. Wang, W. Zhao, G. Han (2022). Flotation of copper oxide minerals: A review. *International*

Journal of Mining Science and Technology, 32, 1351-1364. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.09.011

Helle, S., U. Kelm (2005). Experimental leaching of atacamite, chrysocolla and malachite: Relationship between copper retention and cation exchange capacity. *Hydrometallurgy, 78,* 3–4, 180-186. doi:10.1016/j.hydromet.2003.10.002

John, D. A., R. D. Taylor. (2016). By-products of porphyry-copper and molybdenum deposits: Chapter 7. In: *Rare earth and critical elements in ore deposits, v. 18 (Eds. Verplanck,* P. L., M. *W. Hitzman),* 137-164. https://doi.org/10.5382/Rev.18.07

Kang, C-U., S.-E. Ji, T. Pabst, K.–W. Choi, M. A. Khan, R. Kumar, P. Krishnaiah, Y. Han, B.-H. Jeon, D.–H. Kim (2021). Copper Extraction from Oxide Ore of Almalyk Mine by H_2SO_4 in Simulated Heap Leaching: Effect of Particle Size and Acid Concentration. *Minerals 11, 1020,* 1-14. https://doi.org/10.3390/min11091020

Liu, M., J. Wen, G. Tan, G. Liu, B. Wu (2016). Experimental studies and pilot plant tests for acid leaching of low-grade copper oxide ores at the Tuwu Copper Mine. *Hydrometallurgy, 165*, 227–232. http://dx.doi.org/10.1016/ j.hydromet.2016.04.009

Mohanraj, G. T., M. R. Rahman, S. B. Arya, R. Barman, P. Krishnendu, S. S. Meena. (2022) Characterization study and recovery of copper from low grade copper ore through hydrometallurgical route. Advanced Powder Technology, 33, 103382. https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.12.001

Nicol, M. J. (2018). The kinetics of the dissolution of malachite in acid solutions. *Hydrometallurgy, 177*, 214-217. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.03.017

Nicol. M. J., C. Akilan (2018). The kinetics of the dissolution of chrysocolla in acid solutions. *Hydrometallurgy, 178*, 7–11. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.04.001

Tomova, M. (2023). Possibilities of geophysical methods for monitoring an integrated mine waste facility, Annual of the UMG, vol. 66 – 66 International Scientific Conference, 20.10.2023, Sofia, Bulgaria (180-185). https://zenodo.org/records/ 8334672.

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26, 341-347.

TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES FOR THE BENEFICIATION OF OXIDE ORES FROM A PORPHYRY COPPER DEPOSIT

Teodora Yankova, Mihail Petrov, Nikolay Nestorov, Irena Grigorova

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

ABSTRACT. This paper summarises the results of technological laboratory studies conducted to establish the beneficiation of oxide copper ore from a porphyry copper deposit. The conducted studies include material and particle size ore composition, as well as the acid absorption of the technological sample. The aim of our research is to present laboratory experiments for establishing the possibility and prospects for chemical leaching to extract copper from oxide ores. The results of the studies and the estimated calculations indicate that a 75 % copper extraction can be achieved within 90 - 95 days at a consumption of H_2SO_4 46 kg/t ore - 2.0 t/t extracted copper.

Key words: oxide copper ore, beneficiation.

ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ОБОГАТЯВАНЕ НА ОКСИДНА РУДА ОТ МЕДНОПОРФИРНО НАХОДИЩЕ

Теодора Янкова, Михаил Петров, Николай Несторов, Ирена Григорова

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

РЕЗЮМЕ. Настоящата разработка представя резултати от извършените технологични лабораторни изследвания за установяване обогатимостта на оксидна медна руда от меднопорфирно находище. Проведените изследвания обхващат изучаване на вещества и зърнометричен състав на рудата, както и на киселинопоглъщаемостта на техноложката проба. Основната цел на проведените лабораторни експерименти е да се установи възможността и перспективността за прилагане на химичното излужване за извличане на медта от оксидните руди. Получените резултати от изследванията и прогнозните разчети показват, че 75 % извличане на медта може да се постигне за 90 - 95 дни при разход на H_2SO_4 46 kg/t руда – 2,0 t/t извлечена мед.

Ключови думи: оксидни медни руди, обогатяване.

Въведение

Медта е един от металите, който има решаваща роля в прогреса и развитието на човешкото общество. Икономическата глобализация и развитието на нововъзникващите индустрии продължават да разширяват областите на приложение на медта (Xie et al., 2023).

Металът мед намира много широко приложение в редица индустрии, като глобалното търсене на медни находища нараства значително (Tomova, 2023). Търсенето и проучването на меднопорфирни находища включва комбинация от геоложки, геофизични, геохимични и други методи (Tomova, 2023).

Медните руди обикновено са полиметални, тъй като медта асоциира с почти всички рудни и скалообразуващи минерали. В тях почти винаги присъстват Fe, Au, Ag, Zn, Cd, Pb, Ni, Co, Mo, V, Ti и други метали. Основните скални минерали са кварц, калцит и карбонати. Основните оксидни медни минерали са малахит, азурит, хризокола, куприт, тенорит и атакамит.

Основен процес за обогатяване на сулфидни медни руди е флотационният, но при оксидните медни руди процесът флотация не е ефективен. Причините за това са следните: на първо място разлика в свойствата на минералните повърхности. Сулфидните медни минерали имат хидрофобна повърхност, което им позволява лесно да се свързват с флотационните реагенти колектори (ксантогенати).

Оксидните минерали притежават хидрофилни повърхности, което означава, че те лесно се омокрят от водата и не се прикрепят ефективно към въздушните мехурчета, в резултат на което не може да се реализира елементарен акт на флотация.

При сулфидните руди се използват реагенти ксантогенати, които селективно се свързват със сулфидните повърхности и ги правят хидрофобни. При оксидните руди ксантогенатите не действат защото няма сулфидни йони, към които да се прикрепят.

Разбира се, оксидните руди могат да бъдат изкуствено сулфидирани с натриев сулфид (Na_2S), който ги превръща във "фалшиви" сулфиди, но този процес на предварителна сулфидизация на оксидните повърхности и следващо флотиране чрез реагенти събиратели за сулфидни руди е сложен и не винаги икономически ефективен. Поради тези причини оксидните медни руди обикновено не се подлагат на традиционно обогатяване чрез флотация, а директно се подлагат на хидрометалургична обработка.

Същността на хидрометалургичната преработка се състои в разтваряне на медта с подходящ разтворител (например H_2SO_4, $Fe_2(SO_4)_3$, NH_4OH) и последващото й отделяне от разтвора под формата на метал или оксид чрез електролиза, цементация и др. (Chen & He, 2021).

В настоящата разработка се представят резултати от извършените технологични изследвания за обогатимост на оксидна медна руда от меднопорфирно находище. Подготовката на представителна проба и изследванията за установяване на технологичните възможности за извличане на мед от оксидната руда са извършени в лабораториите на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини”, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски”.

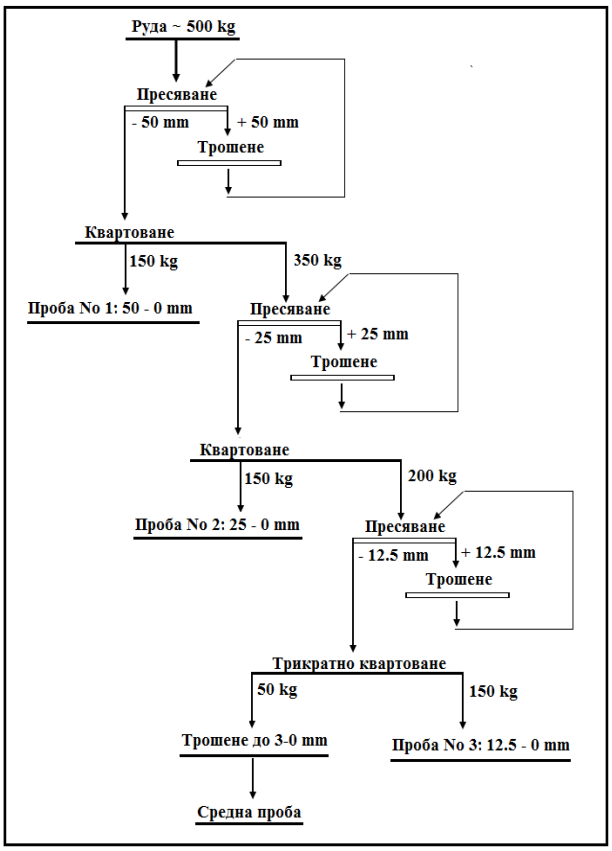
Представената за изследване на обогатимост техноложка проба характеризира оксидна медна руда. Медта е представена главно от оксидни медни минерали (под формата на карбонати, силикати и оксиди – малахит, азурит, хризокола, куприт, тенорит и др.) – около 90 % от общата мед. Съдържанието на първични и вторични сулфиди е сравнително незначително - под 9 % (Янкова и др., 2025).

Посредством методите на химичен и дифрактометричен рентгеноструктурен анализ на представителна проба от

изследвания материал, както и фазов анализ за определяне формите на присъствие на мед (Cu) в рудата, микроскопски изследвания с поляризационен и сканиращ електронен микроскоп на препарати от късови образци и препарати-брикети от класа 3 – 0 mm на рудата, са изучени и установени минералния и химичен състав на оксидните руди от меднопорфирното находище, с цел определяне на тяхната обогатимост. Получени са резултати, даващи основание да се твърди, че 90 % от медните минерали са разтворими в H_2SO_4, което предоставя възможност да бъдат приложени химични методи за обогатяване (Янкова и др., 2025).

Методи и материали

Техноложката проба е разработена по схемата представена на фигура 1. В резултат на операциите трошене, пресяване и квартоване са получени три частни проби с различна едрина – проба 1, с размери на частиците 50 – 0 mm; проба 2, с размери: 25 – 0 mm; проба 3: 12.5 – 0 mm. От частната проба 12.5 – 0 mm, чрез трикратно квартоване, е сепарирано количество от 50 kg, което е натрошено до едрина 3 – 0 mm. На така получената средна рудната техноложка проба е изучен веществения (химически и минерален) състав с цел установяване на технологичните възможности за обогатяване на оксидната медна руда.



Фиг. 1. Схема за разработване на рудна техноложка проба

Зърнометричният състав на фракциите от техноложката проба за химично излужване е представен в таблици 1, 2 и 3.

Таблица 1. *Зърнометричен състав на техноложка проба за химично излужване 1*

Класи, mm	Добив, %	
	Частен	Сумарен
- 50 +22	28.94	28.94
- 22 +10	35.56	64.50
- 10 +6	11.02	75.52
- 6	24.48	100.0
	100.0	
Среден диаметър	d = 17.72 mm	

Таблица 2. *Зърнометричен състав на техноложка проба за химично излужване 2*

Класи, mm	Добив, %	
	Частен	Сумарен
- 25 +12,5	28.23	28.23
- 12,5 +6	39.19	67.42
- 6 +3,15	6.46	73.88
- 3,15	26.12	100.00
	100.0	
Среден диаметър	d = 9.63 mm	

Таблица 3. *Зърнометричен състав на техноложка проба за химично излужване 3*

Класи, mm	Добив, %	
	Частен	Сумарен
- 12,5 +6	63.33	63.33
- 6 +3,15	10.10	73.43
- 3,15 +1	11.80	85.23
- 1	14.77	100.00
	100.0	
Среден диаметър	d = 6,64 mm	

Киселинопоглъщаемост на техноложката проба

Фазовият анализ на медта в техноложката проба показва, че 90 % от медта е представена от окисни медни минерали разтворими в сярна киселина. Минераложкият анализ на пробата от своя страна показва, че една част от нерудните минерали са силно променени, като често образуват вторични продукти, също разтворими в сярна киселина. Освен това пробата се характеризира и с монтморилонитови глинести минерали, в които е включен медмонтитът.

Наличието на голям брой медни минерали и променени рудовместващи скали, разтворими в сярна киселина, налага да се определи киселинопоглъщаемостта на рудната проба и възможностите за максимално извличане на медта при химично излужване. Съгласно използваната методика, киселинопоглъщаемостта на рудата от техноложката проба беше определена чрез агитация в динамични условия, създавани от механична бъркалка при съотношение твърдо към течно 1 : 10. На агитация с различна концентрация на сярна киселина в разтвора: 1, 5 и 10 g/l се подлага руда с едрина 3 - 0 mm. През интервал, съответно, 30, 90, 150, 210 и 300 минути от началото на агитационния процес, от разтвора се взема проба за

химически анализ на Cu и Fe. Разтворът се титрува за определяне на остатъчната концентрация на H_2SO_4 в него. След това към него се добавя ново количество сярна киселина до получаване на съответната изходна концентрация.

В таблица 4 са представени резултатите от извличането на медта и разходът на сярна киселина при химическото агитационно излужване на рудата. За представената техноложка проба, като оптимална концентрация на H_2SO_4 в излужващия разтвор, може да се приеме 5 g/l. При тази концентрация се получава пълно извличане на медта от окисните медни минерали – 82.9 % извличане при разход на H_2SO_4 51.5 kg/t руда или 2.3 t/t извлечена мед.

Така полученият разход на сярна киселина на тон руда показва възможностите за степента на извличане на медта при определена концентрация на H_2SO_4 в процеса на химично излужване. Действителният разход на H_2SO_4, при химично излужване на едрокъсова руда в полупромишлени и промишлени условия, е значително по-нисък. Той се определя основно от вида на окисните медни минерали, коефициента на филтрация на излужващия разтвор, градиента на концентрацията на H_2SO_4 по височината на рудния масив (стълб) и наличието на лесно разтворими рудовместващи скали.

Получените резултати от минераложките изследвания и тестовете за киселинната консумация на оксидната руда наложи технологичните изследвания за обогатимост на оксидната руда да се реализират с химично излужване.

Таблица 4. *Кинетика на извличане на медта и разхода на сярна киселина при агитационното излужване на рудата от техноложката проба*

Опит №	Концентрация на H_2SO_4 в излужващия разтвор, g/l	Време на агитация, min	Разтвор след излужване		Извлечена мед, %	Разход на H_2SO_4	
			Cu, g/l	Fe^{2+}, g/l		kg/t руда	t/t мед
1	1	30	0.194	-	7.05	10.0	5.1
		90	0.485	0.110	17.6	20.0	4.2
		150	0.744	0.110	27.1	30.0	4.0
		210	1.180	0.110	42.9	30.0	2.5
		300	1.220	0.110	44.4	30.0	2.5
2	5	30	1.490	0.110	51.2	25.6	1.7
		90	2.280	0.220	82.9	51.5	2.3
		150	2.460	0.220	89.5	68.3	2.8
		210	2.620	0.220	95.3	77.1	2.9
		300	2.785	0.280	98.5	78.9	2.9
3	10	30	2.416	0.110	58.7	60.1	2.5
		90	2.635	0.110	96.0	71.2	2.7
		150	2.690	0.110	96.5	71.8	2.7
		210	2.715	0.430	96.8	71.8	2.7
		300	2.755	0.430	98.2	71.8	2.7

Технологични изследвания за химично излужване на оксидни руди

При провеждането на лабораторни изследвания, основната цел е да се установи възможността и перспективността за прилагане на химичното излужване за извличане на медта от определен тип руда (Shayestehfar et al., 2008). Тъй като химичното излужване на медни руди е сложен и многофакторен процес, протичането му в промишлени условия на насипища и неговата ефективност зависят от много фактори, а именно: минерален и веществен състав на рудата; общо съдържание на мед; едрина на рудните късове; височина на стъпалата на насипищата; схема, технологичен и реагентов режим на процеса на химично излужване; климатични условия и др. (Liu et al., 2016), (Bogdanović et al., 2016).

За разработване на технология и определяне на технологичната и технико-икономическата ефективност на процеса се провеждат полупромишлени изследвания. При тези изследвания, с достатъчно висока достоверност, се моделира процесът, който би протичал в промишлени условия. Получените резултати от полупромишлените изследвания позволяват да се прогнозират показателите на химичното излужване в промишлени условия за дадения тип медна руда.

Фазовият анализ на техноложката проба показва, че 84 % от медта е представена от оксидни медни минерали, лесно разтворими в сярна киселина.

При изучаване на киселинопоглъщаемостта е установено, че, в зависимост от концентрацията на сярна киселина, може да бъде постигнато над 90 % извличане на медта при разход 70 kg/t руда (2.7 t/t мед). Тези данни показват, че в процеса на излужването основна роля ще има химическото разтваряне на оксидните медни минерали. В конкретния случай, при излужването на медта от оксидните руди, бактериално окислителните процеси са напълно изключени.

Във връзка с гореизложеното, лабораторните технологични изследвания, в които са включени и елементи от полупромишлени тестове, целяха да се провери какво е влиянието върху извличането на медта основно на следните параметри на процеса: разход на сярна киселина; едрина на рудните късове и височина на рудния масив.

Тестовете са проведени в колони от PVC с диаметър 110 mm и полезна височина на насипаната руда от 1 m или 5 m. За получаване на височина от 5 m на рудния стълб, последователно са свързани 3 колони с дължина по 2 m.

Прието бе един цикъл да се състои от 5 или 4 дни на оросяване и 7 дни на излужване. На събрания разтвор от всеки един цикъл се измерва обемът и се взема средна проба за анализиране на мед (Cu). По съдържанието на мед в разтвора и средното съдържание на мед в рудната проба се изчислява извличането й за цикъла.

Резултатите от проведените експерименти са представени в таблица 5.

Таблица 5.

Височина на рудния стълб, m	Едрина на рудата, mm	Разход на H_2SO_4, kg/t руда	Извлечена мед, %
1	25-0	19.32	47.50
1	25-0	25.31	56.30
5	25-0	19.0	45.10
5	25-0	25.0	54.5

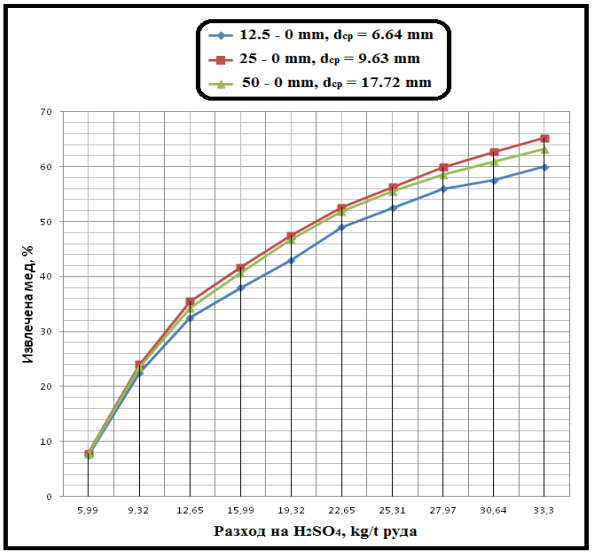
Данните, представени в таблица 5 показват, че извличането на медта е в пряка зависимост от разхода на сярна киселина в kg/t излужвана руда и почти не се влияе от височината на рудния стълб в границите 1 - 5 m.

На фигура 2 е представена зависимостта между едрината на рудата и разхода на сярна киселина върху кинетиката на извличане на медта при излужване на оксидните руди.

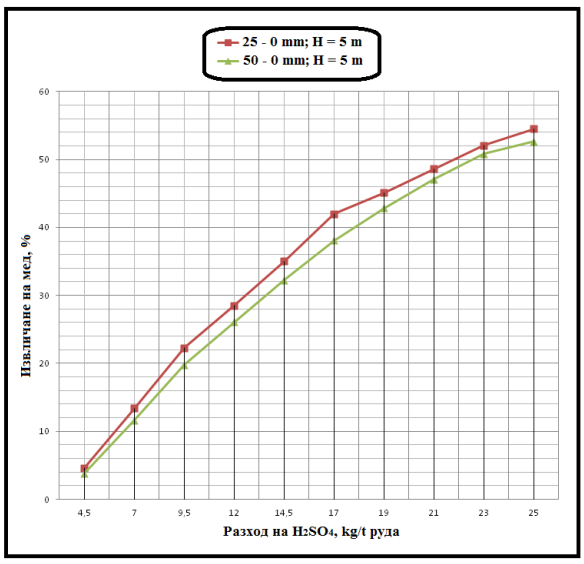
Фигури 2 и 3 показват, че скоростта на излужване на медта от оксидната руда не затихва съществено и при

постигане на 55 % или 65 % извличане на медта. Но, независимо от това, че се подава едно и също количество сярна киселина – kg/t руда, извличането на медта в проценти/24 часа да намалява.

Основен въпрос при технологията на химично насипищно излужване е необходимият минимален разход на сярна киселина, с който може да се извлече цялото количество мед под формата на оксидни, карбонатни и силикатни форми. Този въпрос, в конкретния случай, има съществено значение за технолого-икономическите показатели на процеса на излужването поради наличието на продукти от разлагането на скалообразуващите минерали в рудата, които лесно взаимодействат със сярната киселина и обуславят сравнително високият ѝ разход.



Фиг. 2. Влияние на едрината на рудата и разхода на сярна киселина върху кинетиката на извличане на медта при излужване на оксидните руди



Фиг. 3. Влияние на едрината на рудата, височината на рудния стълб и разхода на сярна киселина върху извличането на медта при химичното излужване на оксидните руди

Главният фактор, от който зависи минималният разход на сярната киселина, необходим за пълно извличане на медта от оксидните минерали, е нейната концентрация в излужващия разтвор. При по-ниска концентрация, за сметка на разликата в скоростта на взаимодействие на медните и скалообразуващите минерали, може да се намали необходимият абсолютен разход на сярна киселина за получаването на определено извличане на медта от рудата. Провеждането на процеса на химично излужване при по-ниска концентрация на сярна киселина води до намаляване на скоростта и степента на извличане на медта, в резултат на което се увеличава необходимото време за постигане на зададеното извличане. Ако излужването се осъществява с висока концентрация на сярна киселина, скоростта и степента на извличане на медта се повишава, но същевременно с това се увеличава безполезният разход на сярна киселина.

Като се изхождаше от резултатите за определяне на киселинопоглъщаемостта на рудата (Табл. 4) е прието изследванията да бъдат проведени при концентрация на сярна киселина в излужващия разтвор от 5 g/l.

Данните, представени на фиг. 2 и фиг. 3 показват, че така приетият технологичен режим за химично излужване на оксидните руди е високо ефективен.

Резултати и дискусия

В лабораторни условия, при посочения технологичен режим, в продължение на 77 дни (11 цикъла и 50 оросявания), разход на H_2SO_4 33.3 kg/t руда и височина на рудния стълб от 1 m са получени следните показатели:

- За руда с едрина на рудните късове 12.5 - 0 mm (среден размер – 6.64 mm) е постигнато извличане на медта 60.0 %, като разходът на H_2SO_4 е 1.79 t/t извлечена мед;
- От руда с едрина 25 - 0 mm (среден размер – 9.63 mm) са извлечени 65.2 % мед, при разход на сярна киселина 1.65 t/t извлечена мед;
- От руда с едрина на рудните късове 50 - 0 mm (среден размер – 17.72 mm) е постигнато 63.15 % извличане на медта, като разходът на H_2SO_4 възлиза на 1.70 t/t извлечена мед.

В резултат на проведените наблюдения е доказано, че в лабораторни условия степента на извличане на медта почти не се влияе от едрината на излужваната руда в интервала 50 - 0 mm. По всяка вероятност основната причина за това са супергенните и хидротермалните промени, на които са били подложени рудовместващите скали. В резултат на споменатите въздействия, а също така и на допълнителното натрошаване на пробата, вместващите скали са станали по-крехки, по-лесно трошливи и по-порьозни. Така придобитите свойства на вместващите скали благоприятстват за постигане на лесен и бърз контакт на излужващия разтвор с разтворимите оксидни медни минерали.

В лабораторни условия при осъществяване на излужването от руден стълб с височина 5 m, за 77 дни (11 цикъла и 50 оросявания) и разход на H_2SO_4 25 kg/t руда са постигнати следните резултати:

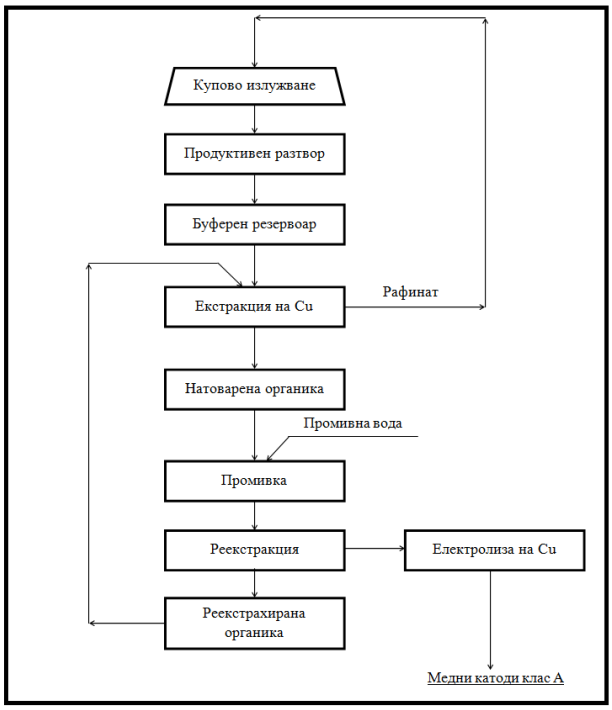
От руда с едрина на рудните късове 25 - 0 mm (среден размер 9.63 mm) е получено 54.5 % извличане на медта, при разход на H_2SO_4 1.48 t/t извлечена мед.

От руда с едрина 50 - 0 mm (среден размер – 17.72 mm) е получено 52.65 % извличане на медта, като разходът на

H_2SO_4 възлиза на 1.58 t/t извлечена мед. Едрината на рудните късове в интервала 50 - 0 mm и при височина на рудния стълб от 5 m не оказва влияние върху скоростта на излужване на медта.

Независимо, че оптималните параметри и технологичните показатели на излужването в промишлени условия се определят след провеждане на окрупнени полупромишлени изследвания, на настоящия лабораторен етап също може да се предложи схема с предварителни технологични показатели.

Минералният състав на оксидната руда и получените резултати от технологичните изследвания дават основание да се предложи като най-перспективна за излужване в промишлени условия принципната технологична схема, представена на фигура 4.



Фиг. 4. Принципна технологична схема на куповото излужване и извличането на медта от разтворите с получаване на медни катоди

Характерно за химичното излужване на изучаваните оксидни руди е, че процесът протича на два етапа с различна скорост и технологичен режим за всеки един от тях. За първи етап може да се приеме времето, за което се получава 45 – 50 % извличане на медта от рудата. През този период се извършва неутрализация на рудата и се извлича медта от разкритите и лесно разтворими оксидни медни минерали. През втория период на излужване са подложени по-трудно разтворимите и по-слабо разкрити оксидни минерали.

В промишлени условия, за да се запази висока скорост на процеса без да се увеличава безполезния разход на сярна киселина, е целесъобразно излужването да се провежда при норма на оросяване и концентрация на H_2SO_4 (5 g/l), осигуряваща pH = 1.9 – 2.1 на разтворите, постъпващи на екстракция. Височината на насипания материал за излужване не трябва да надвишава 5 - 7 m. В този случай може да се достигне извличане на мед от рудата 75 – 80 %.

За да се постигне в промишлени условия висока технологична ефективност при минимален разход на сярна киселина, необходимо е да се осъществи схемата с послойно и поетапно излужване на рудата. За тази цел след натрупване на слой с височина 5 - 7 m се пристъпва към неговото излужване до получаване на около 50 % извличане на медта, след което върху него се натрупва слой със същата височина. Общата височина на насипището не трябва да надвишава 20-25 m.

Заключение

Анализирайки данните от проведените опити се установява, че 42.0 % извличане на медта се постига за 35 дни (оросявания). Следващите 12.5 % извличане на медта са получени за 16 дни, а останалите 10.5 % до 65.0 % общо извличане на медта са постигнати за 17 дни. Въз основа на тези данни може да се прогнозира, че за получаване на допълнително 10 % извличане на медта ще са необходими 25 дни (оросявания) и разход на H_2SO_4 от 12.5 kg/t руда.

Получените резултати от изследванията и прогнозните разчети показват, че 75 % извличане на медта може да се постигне за 90 - 95 дни при разход на H_2SO_4 46 kg/t руда – 2.0 t/t извлечена мед.

Литература

Янкова, Т., М. Петров, Н. Несторов, И. Григорова. (2025). Минерален състав на оксидни руди от меднопорфирно находище и технологични възможности за извличане на мед, *Год. на МГУ, т. 68. 68-ма Международна научна конференция, 17.10.2025*, София, България (под печат).

Bogdanović, G.D., Stanković, V.D., Trumić, M.S., Antić, D.V., Trumić, M.Ž. (2016). Leaching of low-grade copper ores: A case study for ‘Kraku Bugaresku-Cementacija’ deposits (Eastern Serbia). *J. Min. Met. A Min., (*52), 45–56.

Chen, L., He, H.P. (2021). Experimental study on beneficiation of one low-grade copper oxide in Xinjiang. *Yunnan Metall*, (50), 18.

Liu, M., Wen, J., Tan, G., Liu, G., Wu, B. (2016). Experimental studies and pilot plant tests for acid leaching of low-grade copper oxide ores at the Tuwu Copper Mine. *Hydrometallurgy*, (165), 227–232.

Shayestehfar, M., Nasab, S.K., Mohammadalizadeh, H. (2008). Mineralogy, petrology, and chemistry studies to evaluate oxide copper ores for heap leaching in Sarcheshmeh copper mine, Kerman, Iran. *J. Hazard. Mater*, (154), 602–612.

Tomova, M., Possibilities of geophysical methods for monitoring an integrated mine waste facility, Annual of the UMG, vol. 66 – 66 International Scientific Conference, 20.10.2023, Sofia, Bulgaria, 180-185. https://zenodo.org/records/8334672.

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26, 341-347.

Xie, Q., Liu, Y., Chen, Q., Geng, X., Liang, Ch., Zhang, P., Wang, L. (2023). Failure and regeneration of hydroxyoxime in copper solvent extraction process: A review, *Hydrometallurgy*, (221), 106128.

СЕКЦИЯ

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА МИНИТЕ

SECTION

MINE MECHANISATION, ELECTRIFICATION, AND AUTOMATION

COMPUTER PROCESSING OF DATA OBTAINED FROM SEMI-AUTOGENOUS MILL CONTROL SYSTEMS

Ralitsa Boncheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, E-mail: boncheva81@gmail.com

ABSTRACT. The present work is aimed at computer processing of data obtained from the control and management system of a semi-autogenous drum mill used for the grinding of copper and gold ores. Statistical computer processing is aimed at solving the problem of connecting control parameters and objective functions using various computer programs. Analysis is made of all aspects of obtaining a mathematical model in terms of its adequacy. Comparative analysis aims to obtain results for the objective function of energy consumption, for which the best mathematical model and the most suitable computer program are selected. The results are displayed graphically and instructions for the answer are given.

Key words: mill, energy consumption, model, grinding.

КОМПЮТЪРНА ОБРАБОТКА НА ДАННИ, ПОЛУЧЕНИ ОТ СИСТЕМИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ПОЛУАВТОГЕННА МЕЛНИЦА

Ралица Бончева

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящата разработка е направена компютърна обработка на данни, получени от системата за управление и контрол на барабанна полуавтогенна мелница, използвана за смилане на медно златни руди. Направена е статистическа компютърна обработка на данните, за да се намери връзка между управляващи параметри и целеви функции посредством използването на различни компютърни програми. Анализирани са всички получени математични модели относно тяхната адекватност. Направен е сравнителен анализ на получените резултати за целевата функция енергоразход, като е избран най-добрият получен математичен модел и е най-подходящата компютърна програма. Резултатите са показани графично и са направени съответните изводи.

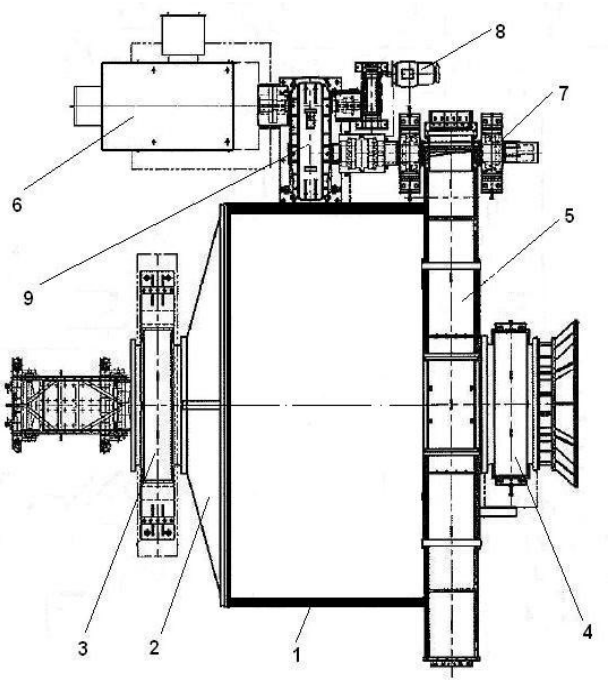
Ключови думи мелница, енергоразход, модел, смилане.

Въведение

Повишаването на производителността на компаниите от миннодобивната промишленост през последните години доведе до промяна на схемата за трошене и смилане на рудите или разкриването на минералните зърна. Тази промяна, в повечето случаи, се осъществи в преминаването от топково барабанно смилане в полуавтогенно, при което отпада необходимостта от средно и ситно трошене (Минин, 2012). Това наложи подмяната на няколко на брой барабанни топкови мелници с, най-често, една или две едрогабаритни съвременни барабанни полуавтогенни. Основната разлика между тези типове машини е, че полуавтогенните използват до 10-15% обем на топки в барабана си като смилаща среда, докато при топковите този процент е 40%. За компенсиране на това, барабанните полуавтогенни мелници като смилаща среда използват и едри късове руда, което води до отпадане на процесите на средно и ситно трошене в процеса на разкриване на минералните зърна.

Съвременните барабанни полуавтогенни мелници са оборудвани с модерни системи за контрол и управление, които записват тези параметри във времето и са налични при необходимост.

Мелница тип SAG – барабанни полуавтогенни мелници (Фиг. 1) се състоят от барабан 1, със страничните дъна (капаци) 2, на които са монтирани шийките лагерувани на плъзгащите лагери 3 - заден и 4 - преден. Двигателят 6 задвижва чрез съединител редуктора 9, който е куплиран на вал-зъбното колело 7, зацепено със зъбният 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. Смилането в барабана става чрез удар, стриване и смачкване на рудата от едрите късове руда и топките.



Фигура 1. Общ изглед на мелница тип SAG

Определяне на целевата функция и управляващи параметри

Първата задача, която се решава при моделирането на процесите в барабанни полуавтогенни мелници, е ясно формулиране на целта. Като се има предвид бедната информация за обекта на изследване и голямата сложност на изследването, става ясно, че този етап е един от трудните и в същото време един от най отговорните. Погрешно формулираната цел прави безсмислено или, най-малкото, непълно изследването. Очевидно, за да бъде постигната поставената цел, необходимо е преди всичко тя да бъде ясно и точно характеризирана.

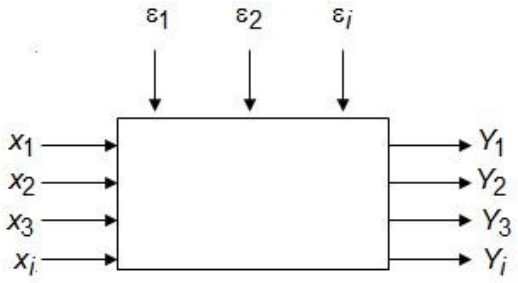
Като етап в процеса на моделиране, изборът на целева функция трябва да ни осигурява възможност за прилагане на методите на математическата статистика.

Поради тази причина целевата функция трябва да отговаря на някои изисквания като: да се характеризира количествено, т.е. за всяка комбинация от стойности на входните фактори да се характеризира с число и да бъде единствена. Множеството от стойности, които целевата функция може да приема, се нарича област на нейното определение. Тази област може да бъде ограничена или неограничена, непрекъсната или дискретна.

За да се задава целевата функция трябва да може да се измерва.

В много случаи това изискване се изпълнява автоматично, т.е. целта е поставена строго конкретно и характеристиката й е една. Най-често такива са икономическите целеви функции (себестойност, енергоразход и др.).

В други случай целта е поставена по-общо и това позволява да се формулират няколко целеви функции, като всяка от тях характеризира определена страна на поставената цел. При това в повечето такива случаи е трудно, а много често и невъзможно, да се отдаде предпочитание само на една от тях. Такива са най - вече целевите функции при изследване на качеството на предметите. Такива обекти се представят както на фиг.1.



Фиг. 2. Схема на черна кутия

Както целевите функции, така също има изисквания и за управляващите параметри които й влияят. Те трябва да могат да бъдат управлявани, да могат да бъдат измервани и да няма връзка между тях.

Броят на набелязаните първоначални управляващи фактори се съкращава съгласно по-горните 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. С това, обаче, изборът на съществени фактори не е приключил. След провеждането на експериментите, при статистическия анализ на получените резултати, може да се окаже, че не са включени всички съществени фактори, т.е. моделът е неадекватен, при което се налага моделирането да се върне отново в етапа на избора на управляващите фактори.

Задачата на настоящето изследване е да се намери връзката между управляващи параметри на мелница тип SAG и една целева функция посредством обработката на данни, получени от системите за контрол и управление на машината. Като за целта те биват обработени статистически с няколко различни компютърни програми. За целева функция (зависим параметър) е избрана величината изразходвана мощност от двигателя на мелницата (P, kW). Управляващите параметри, които биват измервани и записвани от системата за управление и контрол са:

1. *Скорост на въртене на барабана*. Тази скорост е относителната скорост на барабана и се дава в проценти - ψ, %.
2. *Дебит на постъпващата в мелницата руда за единица време* – Q, t/h. Този параметър отразява 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. *Износване на барабана на мелницата* – i, %. Този параметър не се получава от системите за управление, а е определен след лазерно сканиране на облицовките.

Данни за обработка

На таблица 1 са показани данните, подлежащи на обработка, които са мащабирани поради изискванията за конфиденциалност.

Таблица 1

ψ, %	$Q_B, m^3/h$	$Q, t/h$	M, t	i, %	P, kW
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
67,6	108,9	111,2	134	12,40	1354
80,7	115,1	112,4	133	24,61	1646
80,9	91,9	114,9	133,6	38,05	1760
77,2	108	114,1	134,5	45,38	1551
82,7	103,7	108,5	134,5	57,58	1906
77,9	79,1	109,8	134,6	67,47	1751
71,7	81,8	106,7	134,2	77,63	1479
75,4	86,1	112,9	136,9	90,24	1594
76,8	94,4	107,5	137,5	100	1797
76,5	88,2	107,9	137,8	0	1879
69,5	92,2	109,1	136,4	11,76	1411
76,8	86,1	107,8	137,6	18,76	1437
75,9	93,6	108,3	138,5	33,36	1559
81,3	105,6	95,1	145	40,07	1830

73	89,7	103,2	143,6	51,34	1639
79,3	77,9	93,4	144,7	60,33	2136
72,6	82,7	94,9	143,4	70,94	1936
77,7	61,2	95	143,9	77,32	2150
74,6	82,9	93,8	143,3	0	2045
70,1	76,8	96,8	141,2	15,36	1593
82,2	81,1	97,2	142,3	21,73	1503
85,8	151,2	95,7	144,6	31,22	1600
89	122,3	88,1	149,8	42,64	1923
88,9	102,8	90,5	149,2	50,37	1995
76,9	99,6	98,1	150,7	58,31	1733
76,3	33,3	75,1	142,8	0	1778
73,9	34,9	73,4	142,8	7,21	1300
84,8	78,5	82,6	149,6	16,84	1747
82,6	78,3	95,6	159,7	25,12	2063
83,7	91,7	97,7	157,7	35,93	2004
78,6	94,3	95,4	156,7	36,80	1767
72,8	40,1	52,4	151,9	54,36	1851
72,4	111,9	100,5	151,4	56,26	1770
77,9	125,3	103,7	156,6	0,00	2095
68,5	126,7	95,7	151,5	8,80	1369
72,2	83,8	105,3	155,9	21,58	1615
86,5	107,8	104,8	157,5	27,79	1942
74,5	79,5	102,3	156,6	39,28	1597
74,2	71,9	80,2	141,3	0	1631
77,7	80,35	82,5	142,3	12,40	1758

Резултати от обработката на даниите от системите за управление на мелница тип SAG

Тези данни се обработиха статистически с програмите STATGRAPHIC и R STUDIO като се получиха множество модели с различни параметри за адекватност. Оценката на значимостта на коефициентите на регресия се извършва по критерия на Стюдент при ниво на значимост $\alpha = 0,05$ и минимум 8 броя степени на свобода $\nu \succ$. В програмата тази процедура е известна като се оценява вероятността за значимост на коефициентите на регресия. Ако тази вероятност е

$$P - Value \prec \alpha \ , \qquad (1)$$

то коефициентът на регресия е значим (α - доверителна вероятност).

Аналогично се оценява и адекватността на уравнението посредством значимостта на критерия на Fisher.

Най добър и адекватен модел се получи посреством използването на програмата STATGRAPHICS и основните му параметри за адекватност са показани в Таблица 2.

Разглеждайки параметрите на този модел се вижда, че коефициентът на множествена корелация е 99%, а коригираният коефициент на множествена корелация е над 98%. Стойността на показателя на доверителна вероятност (P-Value<0,05) за модела е под критичната, т.е. може да се приеме, че моделът е адекватен.

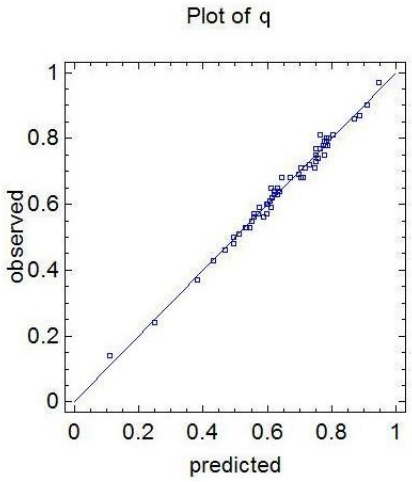
Математическият модел може да се представи във вида:

$$P = 1,5.10^2.M.\psi + 2.6.10^4.Q.i^2, \ kW \qquad (2)$$

Таблица 2. *Параметри на модела от STATGRAPHICS*

Parameters	**Estimate**	**Standard error**		**P-value**
$M.\psi$	0, 1503	0,00317303		0.000
$Q.i^2$	0,00026	0,0000112		0.027
	Sum of squares of the model	***Degrees of freedom***	***F-ratio***	**P-value**
Model	1249E8	2	6,044E7	0.000
Residual	2,2184E6	38		
Total	1,2271E8	40		
R-squared			99,007 %	
R-squared (adjusted for d.f.)			98.981 %	
Standard error of Est.			179,06	
Mean absolut Error			139,55	
Statistics of Durbin - Watson			1.2874	

На фигура 2 е показана графично корелационната връзка между експерименталните данни и получения модел.



Фиг. 2. Корелация между експериментални данни и математичен модел

Този модел се получи и посредством използването на програмата R STUDIO, като резултатите са показани на таблица 3.

Таблица 3 Параметри на модела от R STUDIO

Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
$M.\psi$	0,150277	0,003173	47,361	$\prec$
$Q.i^2$	0,000263	0,0000112	2,323	0,0257
	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
Model	1	121316646	121316646	$\prec$
Residual	1	172929	172929	0,02567
Total	38	1218410	32063	
Статистика на модела				
R^2 =			99,01	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			98,95	%
Standard Error of Est. =			179,1	
F-statistic =			1895	
p-value =			< 2,2e-16	

Изводи

На база на настоящето изследване става ясно, че могат да бъдат направени следните изводи:

1. Мощността, изразходвана от двигателя на мелницата, се влияе основно от четири параметъра: масата на пълнежа, износването на облицовките, относителната скорост на барабана на мелницата и натоварването на мелницата с руда.

2. При повишаване масата на пълнежа се повишава изразходваната мощност поради увеличаване на съпротивлението от триене в лагерите.

3. При износване на облицовките се повишава вътрешния диаметър на барабана, което повишава мощността за издигане на топки и едри късове руда.

4. Скоростта на въртене на барабана също повишава изразходваната мощност поради това, че мощността е произведение между ъглова скорост и съпротивителния момент.

5. Повишаването на натоварването на мелницата с руда води до повишаване на изразходваната мощност на машината поради повишаване на масата на пълнежа и увеличаване на съпротивленията от триене.

6. Резултатите при използването на двата програмни продукта са идентични (с минимални разлики в параметрите), което показва, че имат еднакъв алгоритъм и би трябвало да се използва този който е най-лесен за употреба.

Литература

Цуцеков, Е. А., П. Недялков, Л. Лазов, Др. Вражилски. (2005). „Методика за синтез на двумасови вибрационни машини”. ISSN: 1312 – 1820, *Годишник на Минно Геоложки Университет – Том 48, свитък III*, стр. 45-47.

Lazov, L., P. Nedyalkov and Dr. Vrazhilski, Influence of the sheet metal quality over the characteristics for the main girder at bridge crane applications, ISSN: 1847-7917, strojarska-technologija.hr/img/pdf/Conference_ Proceedings_MTSM_2023.pdf

Nedyalkov, P. (2020). Reliability function improved fitting using goodness-of-fit procedures", *Journal of Mining and Geological Sciences, Vol.63, Part III*, Sofia, pp. 161-166, ISSN: 2683-0027.

Minin, Iv., P. Nedyalkov, S. Savov. (2021). Research of charge load influence over tumbling mill characteristic through general utility function, *Journal of Chemical Technology and Metalurgy*, Sofia, pp. 819-826, ISSN:1314-7471.

Nedyalkov, P. (2019). *Надеждностно моделиране в минно-обогатителната техника*, Авангард Прима, София, ISBN: 978-619-239-270-3.

STRESSES AND DISPLACEMENTS AROUND A CIRCULAR MINE TUNNEL DRIVEN IN A ROCK MASSIF WITH ORIENTED CRACKING

Rayna Vucheva, Violeta Trifonova–Genova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: rayna.vucheva @mgu.bg; violeta.trifonova@yahoo.com

ABSTRACT: The article addresses the issue of determining stresses and displacements around a circular mine tunnel. It passes through a rock massif with oriented cracking. Cracks are located in systems. This type of rock massif is represented as an equivalent uniform transversely isotropic medium. For it, the expressions for the technical constants, which involve geometric characteristics of the cracks, are given. The specified class of problems is solved using complex potential theory. The expressions for the stresses and displacements along the contour of a circular hole are in a cylindrical coordinate system.
A real massif has two systems of cracks. The technical constants have been determined for it. The tangential normal stresses and displacements at points on the vertical and horizontal axes along the contour of the tunnel cross section were calculated.

Key words: complex potential theory, systems of oriented cracks.

НАПРЕЖЕНИЯ И ПРЕМЕСТВАНИЯ ОКОЛО КРЪГОВ МИНЕН ТУНЕЛ ПРОКАРАН В СКАЛЕН МАСИВ С ОРИЕНТИРАНА НАПУКАНОСТ

Райна Вучева*, *Виолета Трифонова–Генова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ: В статията се разглежда въпросът за определяне на напреженията и премествания около кръгов минен тунел. Той преминава през скален масив с ориентирана напуканост. Пукнатините са разположени в системи. Този вид скален масив се представя като еквивалентна еднородна трансверзално изотропна среда. За нея са дадени изразите за техническите константи, в които участват геометрически характеристики на пукнатините. Указаният клас задачи се решава с комплексната потенциална теория. Изразите за напреженията и преместванията по контура на кръгов отвор са в цилиндрична координатна система.
Реален масив има две системи пукнатини. За него са определени техническите константи. Изчислени са тангенциалните нормални напрежения и преместванията в точки от вертикалната и хоризонталната ос по контура на напречното сечение на тунела.

Ключови думи: комплексната потенциална теория, системи от ориентирани пукнатини.

Introduction

The rock massif is formed in different geological and climatic conditions under the influence of various factors. They are characterised by non-homogeneity, anisotropy and the presence of cracks. Each crack is characterised by length, width, roughness, wall curvature, and spatial orientation. There are unfilled and filled cracks. According to the length of the cracks, five types of cracks are distinguished: crystal lattice defects, micro cracks at the level of mineral grain sizes, macro cracks, discontinuities, and large tectonic faults (Rupeneit, 1975). The subject of the research is macro cracks, called cracks for short. They actively influence the strength and deformability of the rock massif.

Today, methods are actively being developed that describe the behaviour of cracked rock masses using models. For the most part, these models use the linear relationship between stresses and strains at points around a mine gallery. Analysis of these models can be performed with the general method for solving the plane problem using the theory of functions of the complex variable (Mushkhelishvili, 1953; Muskhelishvili et al., 1953; England, 2003; Verruit, 2003; Lu et al., 2024).

The aim of this work is to investigate the influence of closely spaced cracks in the rock massif on the stresses around a horizontal mine gallery. This influence will be determined using the methods described in the literature sources cited above.

Methods

1. Problem formulation

The mine gallery has a circular cross-section with radius r_o. It is driven to a depth of H. The influence of the opening extends over a square area of size $12 r_o$ (Fig. 1).

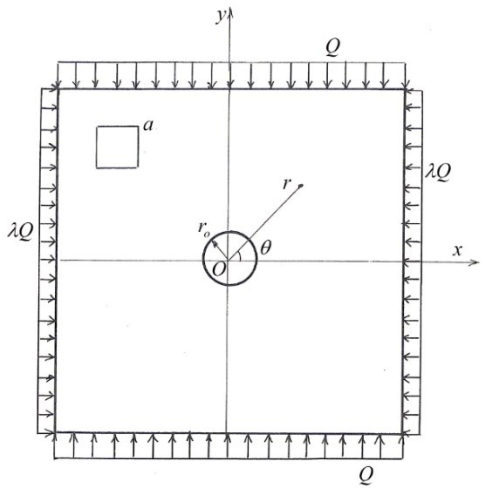


Fig. 1. Calculation scheme

The load along the contour of the area is equal to the stresses in the rock massif Q and λQ:

$$Q = \gamma H\ ;\ \lambda = \frac{\mu_2}{1-\mu_1}\ , \tag{1}$$

where

γ is the volumetric weight of the rock massif,

μ_1 is Poisson's ratio in the horizontal direction Ox (Fig. 1),

μ_2 is Poisson's ratio in the vertical direction Oy Fig. 1).

The Cartesian coordinate system has its origin at the centre of the hole (Fig.1). A cylindrical coordinate system is selected ($r\theta z$). The z -axis is perpendicular to the drawing. Angle θ a is measured from the horizontal axis x to y .

The rock massif around the tunnel has two types of crack system (Fig. 1). One is horizontal and the other is inclined (fig. 2).

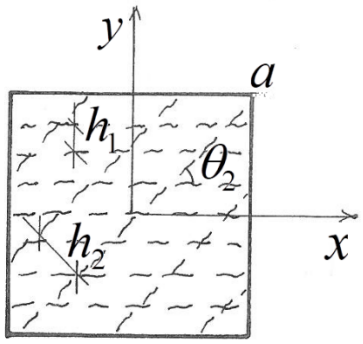


Fig. 2. Crack systems

2. Mechanical coefficients in a cracked environment

The described rock massif has the following parameters (Rupeneit, 1975):

$$E_2 = \frac{E}{1+\sum_{i=1}^{n}\eta_i\left(1-\sin^4\theta_i\right)};$$

$$E_1 = \frac{E}{1+\sum_{i=1}^{n}\eta_i\left(1-\cos^4\theta_i\right)};$$

$$\mu_i = \mu + \sum_{i=1}^{n}\eta_i \sin^2\theta_i\cos^2\theta_i\ ; \tag{2}$$

$$G_2 = \frac{E}{2\left(1+\mu+\sum_{i=1}^{n}\eta_u\cos^2\theta\right)}.$$

Here, θ_i is the angle of inclination of the crack system i to the horizontal plane (Fig. 2),

n is the number of crack system,

E_1 is the modulus of deformation in the horizontal direction Ox (Fig. 2),

E_2 is the modulus of deformation in the vertical direction Oy (Fig. 2),

G_2 is the shear modulus in the vertical direction Oy (Fig. 2),

E is Young's modulus in an isotropic area,

μ is Poison's ratio in an isotropic rock massif.

The geometric characteristic in formulae (2) has the form:

$$\eta_i = \frac{\delta_i}{h_i\xi_i}\ , \tag{3}$$

where

h_i is the average distance between crack systems (Fig. 2),

δ_i is the average width of the crack opening,

i is the number of the crack system,

ξ_i is the relative area of the rock contacts. It is studied using special experiments and the method of probability theory.

3. Characteristic equation

The behavior of the rock massif is described by a fourth-order differential equation. Its characteristic equation is (Ivanova, 2022):

$$b_{11}s^4 + b_{17}s^2 + b_{33} = 0\ , \tag{4}$$

where

$$b_{17} = 2b_{13} + b_{55}\ .$$

The coefficients in this equation have the following form:

$$b_{11} = \frac{1-\mu_2\mu_1}{E_2}\ ;\ b_{33} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}\ ; \tag{5}$$

$$b_{13} = -\frac{\mu_2\left(1+\mu_1\right)}{E_2}\ ;\ b_{55} = \frac{1}{G_2}\ .$$

The roots of equation (4) are:

$$s_1 = \beta_1 i\ ;\ s_2 = \beta_2 i\ ;\ s_3 = -\beta_1 i\ ;\quad s_4 = -\beta_2 i\ . \tag{6}$$

Here, i is an imaginary unit.

The obtained roots allow us to determine the complex function of the stresses and, through it, to obtain the expressions for the stresses at any point around the hole.

4. Stresses

There are no radial and tangential stresses along the contour of the mine gallery opening, and the normal tangential stresses (Fig. 1). They have the appearance (Vucheva et al., 2023):

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{e_1}\left(e_2+e_3+e_4\right), \tag{7}$$

where

$$e_1 = d_1d_2\beta_3\ ;\qquad e_2 = \beta_1d_1d_2\beta_3\ ;\ e_3 = d_3d_2\beta_4\ ;$$
$$e_4 = d_4d_1\beta_5\ ;\ \beta_3 = \beta_1 - \beta_2\ ;\qquad \beta_4 = \beta_2 - \lambda\ ;$$

$\beta_5 = \lambda - \beta_1$.

The remaining coefficients in these expressions for points on the horizontal axis ($\theta = 0$) are:

$$d_3 = -\beta_1;\ d_4 = -\beta_2; d_1 = \beta_1^2;\ d_2 = \beta_2^2$$

and for points on the vertical axis are ($\theta = 90°$):

$$d_3 = -\beta_1^2;\ d_4 = -\beta_2^2;\ d_1 = 1;\ \ d_2 = 1. \quad (8)$$

5. Stresses in an isotropic medium

The stresses along the contour of the cross-section of the circular mine gallery are obtained from (7) and have the form:

$$\sigma_{r,o} = 0;\ \sigma_{\theta,o} = Q\left(\sigma_{\theta,5} + \lambda\sigma_{\theta,6} + \sigma_{\theta,7}\right);\ \tau_{r\theta,o} = 0;$$
$$\sigma_{z,o} = \nu\sigma_{\theta,o}. \quad (9)$$

The coefficients in these expressions for points on the horizontal axis are ($\theta = 0$):

$$\sigma_{\theta,5} = 1;\ \sigma_{\theta,6} = -1;\ \sigma_{\theta,7} = 2. \quad (10)$$

The coefficients in (9) for points on the vertical axis have the form:

$$\sigma_{\theta,5} = \lambda;\ \sigma_{\theta,6} = 2;\ \sigma_{\theta,7} = -1. \quad (11)$$

The stresses in equations (7) and (9) are symmetric about the vertical and horizontal axes of the cross-section of the hole (Fig. 1).

6. Displacements

The displacements along the contour of the mine gallery opening at points of a vertical section have the form:

$$u = \frac{q}{E_{11}}\left(E_{12}E_{33} - E_{12} + \mu_{12}\right), \quad (11)$$

The displacements at points of a horizontal section are:

$$u = \frac{q}{E_{11}}\left(E_{33} - E_{12} + \mu_{12}\right), \quad (12)$$

The parameters on the right-hand side of expressions (11) and (12) are:

$$E_{12} = \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}};\quad E_{33} = \sqrt{2\left(E_{12} - \mu_{12}\right) + \frac{E_{11}}{G_2}};\quad (13)$$
$$E_{11} = \frac{E_1}{1-\mu_1^2};\quad E_{22} = \frac{E_2}{1 - \frac{E_2}{E_1}\mu_2^2};\ \mu_{12} = \frac{\mu_2}{1-\mu_1},$$

where

G_2 is the shear modulus in the vertical direction Oy (Fig. 2).

7. Numerical example

The cracks are located in two planes: one horizontal and the other inclined (Fig. 2). The inclination of the planes in which the crack systems are located relative to the horizon, the average crack width, and the average distance between the crack systems are given in Table 1.

Table 1. Characteristics of a cracked environment

medium	θ_i	δ_i	h_i
dimension	$[°]$	$[cm]$	$[cm]$
1	0	0,02	80
2	45	0,02	100

The relative area of the rock contacts is $\xi_1 = \xi_2 = \xi = 3.10^{-4}$. The characteristics of the isotropic medium are given: $E = 10^4 MPa$, $\nu = 0{,}2$, $\gamma = 2{,}5.10^{-3} MN/m^3$. Parameters related to the mining gallery are: $r_o = 1{,}5m$ and $H = 300m$.

The parameters of the cracked rock massif were calculated using (2). Then, expressions (7) and (9) were applied and the tangential normal stresses in the cracked medium and those in an isotropic medium were obtained. These stresses are referred to the stress in an unbroken array Q. The results are given in Table 2.

Table 2. *Relative tangential normal stresses*

σ_θ^V / Q	σ_θ^H / Q	σ_θ^o / Q
1.966	1.973	1.78

The displacements along the contour of the mine gallery opening at points of the vertical and horizontal cross-section are calculated according to (11) and (12). The horizontal displacements are 1.5mm, and the vertical displacements are 2mm.

The following conclusions follow from Table 2:

- horizontal tangential normal stresses are greater than and those along the vertical axis. This difference is small or 0.38%;
- the difference between the horizontal tangential normal stresses in a cracked medium and those in an isotropic medium is 9.5%;
- the vertical tangential normal stresses in a cracked medium and those in an isotropic medium differ by 9.8%.

8. Keys finding

From the results given above, it can be concluded that the stresses in a cracked environment are greater than the stresses in an isotropic environment. This requires taking this heterogeneity into account and applying the environmental model proposed in the work.

The method described in the article is easy to implement. It does not use software packages, but spreadsheets (Aleksander et al., 2022).

Conclusion

The method is used for rock masses possessing oriented fracture systems. This non-uniformity can be taken into account when studying the stress state around a mine gallery.

The development can be used by qualified engineers when investigating stresses around underground facilities with different tunnel shapes.

This method complements the existing analytical models and methods. But these methods are only applicable to a simple and regular geometric system of cracks. When the cracks are many and of different sizes, FEM is applied (Whintely, (2017). It uses elements that model the cracks. Another numerical method is the boundary element method (Crouch et al., 1983). It uses boundary contact elements in tension and compression.

References

Aleksander, M. & Kusleika, D. (2022). *Microsoft Excel 365* Bible 1st Edition, Wiley, 1072 p. ISBN 978-1119835103.

Crouch, S. I. & Starfield, A. M. (1983). *Boundary element method in solid mechanics*, George § Awuin, London-Boston-Sydney, 322 p.

England, A. H. (2003). *Complex Variable Methods in Elasticity*, Courier Corporation, 197 p.

Ivanova, M. (2022). Stresses in transversely isotropic rock mass around a circular opening. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Iv, Rilski” – Sofia. 65*, Section: Mining and Mineral Processing, 26-29.

Lu, A., Wang, H. & Zhang, L. (2024). *Complex variable solution in the Mechanical Analysis of Tunnels*. Springer, 400 p. ISBN-10 981971690X.

Muskhelishvili, N. I. (1953). *Some basic problems of the mathematical Theory of Elasticity*. - Gromingen: Nordhoft, 706 p.

Muskhelishvili, N. I. & Radok J. R. M. (1953). *Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*, Cambridge University Press, London, UK, 718 p.

Rupeneit, K. V. (1975). Deformiruemost masivov treschtinovatyh gornyh porod. Moskva: Nedra, 223 p.

Verruit, A. (2003). *Complex Variable Solution of Elastic Tunneling Problems*, Report website http://go.verruit.net.

Vucheva, R. & Trifonova-Genova, V. (2023). Stress around a circular horizontal opening driven in cracked rock mass. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” – Sofia*. *66*, Section: Mechanisation, Electrification, and Automation, 195-198.

Whintely, J. (2017). *Finite element method*. Springer, 232 p. ISBN 978-3-319-49970-3.

SYMMETRICALLY SPACED ELECTRICAL RESISTANCES

Angel Zabchev

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

ABSTRACT. The resistances between two points in three Platonic solids with metal edges, which have certain resistances, are determined. The problem is solved by converting resistances for a tetrahedron, an octahedron, and a cube.

Key words: resistance, tetrahedron, octahedron, cube.

СИМЕТРИЧНО РАЗПОЛОЖЕНИ В ПРОСТРАНСТВОТО ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СЪПРОТИВЛЕНИЯ

Ангел Зъбчев

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

Резюме: Определени са съпротивленията между две точки в три платонови тела с метални ръбове, които имат определени съпротивления. Задачата е решена чрез преобразуване на съпротивления за тетраедър, октаедър и куб.

Ключови думи: съпротивление, тетраедър, октаедър, куб.

В една електрическа схема, начертана в равнината, която се състои само от съпротивления, можем да намалим броя на съпротивленията, при условие, че съществуват групи, които са съставени от последователно, успоредно или смесено свързани съпротивления.

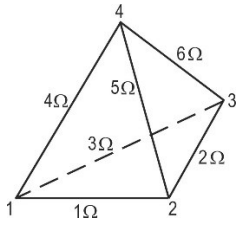
Така можем да достигнем до едно съпротивление между две точки – еквивалентното съпротивление на веригата между тези предварително зададени точки.

Ако съществуват групи от три съпротивления, свързани в звезда или триъгълник, можем да ги преобразуваме от звезда в триъгълник и обратно, като броят на съпротивленията се запазва. Тези преобразования имат смисъл само ако водят до образуването на нови групи от последователно или успоредно свързани съпротивления, чийто брой може да се намали чрез обединяване в една група.

Тук ще разгледаме три случая на разположени в пространството различни съпротивления, а именно съпротивленията в ръбовете на три платонови тела – тетраедър, октаедър и куб.

Тетраедър

Тетраедър е платоново тяло с 4 стени, 6 ръба и 4 върха. На фиг.1 е даден пример за такова тяло с означени върхове и съпротивления на ръбовете.



Фиг. 1.

Необходимо е да се определят съпротивленията между всеки два върха.

1) Преобразуваме звездата с център 4 и върхове 1, 2 и 3 в триъгълник с върхове 1, 2 и 3.

Съпротивленията на този новообразуван триъгълник са:

$$r_{12} = 4 + 5 + \frac{4 \,.\, 5}{6} = 12.33$$

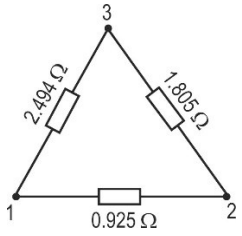
$$\mathrm{r}_{23} = 5 + 6 + \frac{5 \,.\, 6}{4} = 18.5$$

$$r_{13} = 4 + 6 + \frac{4 \,.\, 6}{5} = 14.8$$

Тези три съпротивления са свързани успоредно към трите съпротивления на основата, съответно 1Ω, 2Ω и 3Ω.

Като обединим успоредно свързаните съпротивления достигаме до триъгълника от фиг.2, където:

$$0.925 = \frac{1 \,.12.33}{1+12.33}; \quad 1.805 = \frac{2 \,.18.5}{2+18.5}; \quad 2.494 = \frac{3 \,.14.8}{3+14.8}$$



Фиг. 2.

Съпротивленията между върховете 1, 2 и 3 на тетраедъра са:

$$R_{12} = [0.925^{-1} + (2.494 + 1.805)^{-1}]^{-1} = 0.7612$$

$$R_{23} = [1.805^{-1} + (0.925 + 2.494)^{-1}]^{-1} = 1.181$$

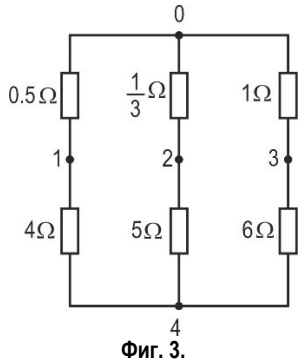
$$R_{31} = [2.494^{-1} + (0.925 + 1.805)^{-1}]^{-1} = 1.303$$

2) Преобразуваме триъгълника на основата с върхове 1, 2 и 3 в звезда с център O и върхове 1, 2 и 3.

Съпротивленията на тази новообразувана звезда са:

$$r_{01} = \frac{1.3}{1+2+3} = 0.5\ ;\ r_{02} = \frac{1.2}{1+2+3} = \frac{1}{3};\quad r_{03} = \frac{2.3}{1+2+3} = 1$$

На фиг.3 двете звезди O(123) и 4(123) са свързани в точките 1, 2 и 3 и тази схема е еквивалентна на тетраедъра. Останалите три съпротивления между върховете на тетраедър според фиг.3 са:



Фиг. 3.

$$R_{14} = \{4^{-1}+[0.5 + (5.33^{-1} + 7^{-1})^{-1}]^{-1}\}^{-1} = 1.874$$

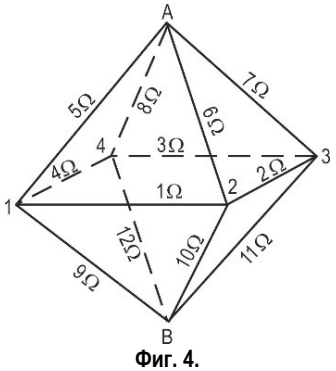
$$R_{24} = \{5^{-1}+[0.333 + (4.5^{-1} + 7^{-1})^{-1}]^{-1}\}^{-1} = 1.903$$

$$R_{34} = \{6^{-1}+[1 + (4.5^{-1} + 5.33^{-1})^{-1}]^{-1}\}^{-1} = 2.186$$

Така сме направили най-краткото определяне на шестте съпротивления между върховете на тетраедъра.

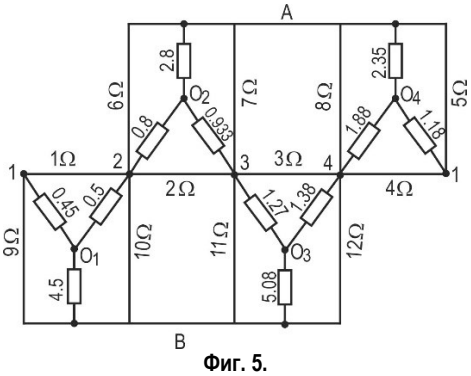
Октаедър

Платоново тяло с 8 стени, 12 ръба и 6 върха. На фиг.4 е представен октаедър с номерирани върхове и означени съпротивления на ръбовете. Необходимо е да се определи съпротивлението между двата срещуположни върха A и B - R_{AB}.



Фиг. 4.

На фиг.5 е показана с отсечки разгъната схема на октаедъра. Връх A е свързан с върховете 1, 2, 3, и 4, а връх B е свързан с 1, 2, 3 и 4.



Фиг. 5.

Разглеждаме триъгълника (12B), който преобразуваме в звезда с център O_1.

$$(12B) \rightarrow O_1(12B)$$

$$R_{0_1 1} = \frac{1.9}{1+9+10} = 0.45$$

$$R_{0_1 2} = \frac{1.10}{1+9+10} = 0.5$$

$$R_{0_1 B} = \frac{9.10}{1+9+10} = 4.5$$

По този начин правим още три преобразования на триъгълник в звезда.

$$(34B) \rightarrow O_3(34B)$$

$$R_{0_3 3} = \frac{3.11}{3+11+12} = 1.27$$

$$R_{0_3 4} = \frac{3.12}{3+11+12} = 1.38$$

$$R_{0_3 B} = \frac{11.12}{3+11+12} = 5.08$$

$$(23A) \rightarrow O_2(23A)$$

$$R_{0_2 2} = \frac{6.2}{6+2+7} = 0.8$$

$$R_{0_2 3} = \frac{2.7}{6+2+7} = 0.933$$

$$R_{0_2 A} = \frac{6.7}{6+2+7} = 2.8$$

$$(41A) \rightarrow O_4(41A)$$

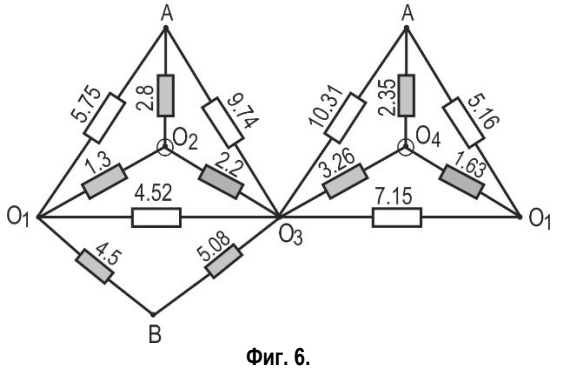
$$R_{0_4 4} = \frac{8.4}{8+4+5} = 1.88$$

$$R_{0_4 1} = \frac{4.5}{8+4+5} = 1.18$$

$$R_{0_4 A} = \frac{5.8}{8+4+5} = 2.35$$

Така на фиг.5 имаме новообразувани четири звезди с центрове O_1, O_2, O_3 и O_4, общо 12 съпротивления. Премахваме възлите 1, 2, 3 и 4 като обединим съпротивленията, свързани към тези точки.

Така се стига до схемата от фиг.6 от 8 маркирани съпротивления: две звезди $O_2(O_1O_3A)$ и $O_4(O_3O_1A)$ плюс двете съпротивления, свързани към т.В.



Фиг. 6.

Преобразуваме двете звезди в триъгълници:

$$O_2(O_1O_3A) \rightarrow (O_1O_3A)$$

$$R_{0_1 0_3} = 1.3 + 2.2 + \frac{1.3 \,.\, 2.2}{2.8} = 4.52$$

$$R_{0_1 A} = 1.3 + 2.8 + \frac{1.3 \,.\, 2.8}{2.2} = 5.75$$

$$R_{0_3 A} = 2.2 + 2.8 + \frac{2.2 \,.\, 2.8}{1.3} = 9.74$$

$$O_4(O_1O_1A) \rightarrow (O_3O_1A)$$

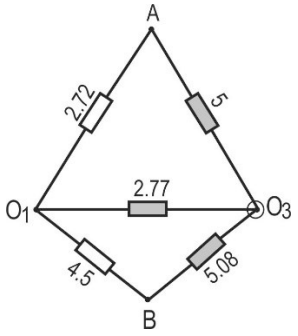
$$R_{0_3 0_1} = 3.26 + 1.63 + \frac{3.26 \,.\, 1.63}{2.35} = 7.15$$

$$R_{0_3 A} = 3.26 + 2.35 + \frac{3.26 \,.\, 2.35}{1.63} = 10.31$$

$$R_{0_1 A} = 1.63 + 2.35 + \frac{1.63 \,.\, 2.35}{3.26} = 5.16$$

Двата новополучени триъгълника (O_1O_3A) са успоредно свързани. Обединяваме ги и достигаме до фиг.7, на която е показан еквивалентния триъгълник (O_1O_3A) и двете съпротивления към т.В.

Преобразуваме маркираната звезда от фиг.7 в триъгълник.



Фиг. 7.

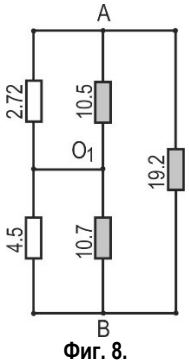
$$O_3(AO_1B) \rightarrow (AO_1B)$$

$$R_{A0_1} = 5 + 2.77 + \frac{5 \,.\, 2.77}{5.08} = 10.5$$

$$R_{0_1 B} = 2.77 + 5.08 + \frac{2.77 \,.\, 5.08}{5} = 10.7$$

$$R_{AB} = 5 + 5.08 + \frac{5 \,.\, 5.08}{2.77} = 19.2$$

На фиг.8 имаме маркирания новополучен триъгълник плюс двете съпротивления от предишната фигура.



Фиг. 8.

Петте съпротивления редуцираме до едно

$$R_{AB} = \{19.2^{-1} + [(2.72^{-1} + 10.5^{-1})^{-1} + (4.5^{-1} + 10.7^{-1})]^{-1}\}^{-1} = 4.171$$

Това е стойността на търсеното съпротивление между двата върха на октаедъра А и В, именно $R_{AB} = 4.171\Omega$.

За да определим съпротивлението R_{13} между срещуположните върхове 1 и 3, завъртаме октаедъра от фиг.4 около оста 2-4 на 90°. Връх 1 отива на мястото на връх А, а връх 3 – на мястото на връх В. Прехвърляме съпротивленията на ръбовете на новите им места и повтаряме цялото изчисление за определяне на R_{AB}.

В този случай се получава стойност: $R_{13} = 1.625\Omega$.

За да определим R_{24} завъртаме на 90° октаедъра около ос 1-3. Още веднъж изчисляваме и се получава: $R_{24} = 1.902\Omega$.

С това съпротивленията между срещуположните върхове са определени. В табл. 1 са дадени съпротивленията на ръбовете при определяне на R_{AB}, R_{13} и R_{24}.

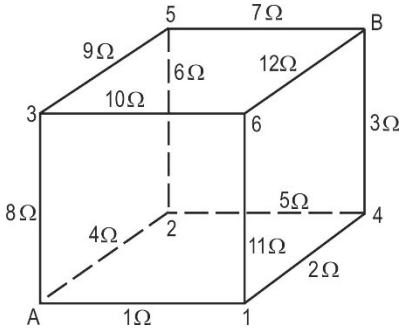
$$R_{AB} = 4.171\Omega\,; \quad R_{13} = 1.625\Omega\,; \quad R_{24} = 1.902\Omega$$

Таблица 1.

ръб	R_{AB}.	R_{13}.	R_{24}.
A1	5	9	1
A2	6	1	10
A3	7	5	2
A4	8	4	6
B1	9	11	4
B2	10	2	12
B3	11	7	3
B4	12	3	8
12	1	10	9
23	2	6	11
34	3	8	7
41	4	12	5

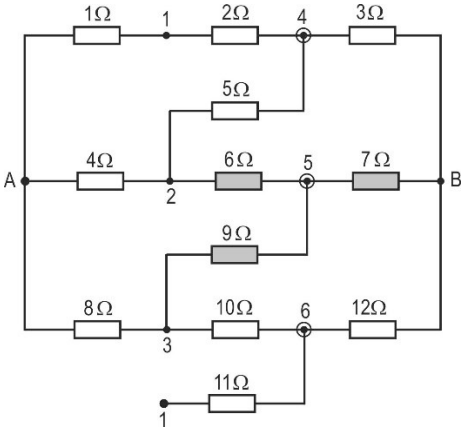
Куб

Платоново тяло с 6 стени,12 ръба и 8 върха. На фиг.9 са номерирани върховете и са означени съпротивленията на ръбовете на един куб. Необходимо е да се определи съпротивлението между двата срещуположни върха A и B.



Фиг. 9.

На фиг.10 е показана електрическата верига, съответстваща на куба. Към всеки възел са свързани по три съпротивления. Съпротивленията 1-4, 2-4 и B-4 образуват звезда с център 4, която ще означаваме 4(12B).

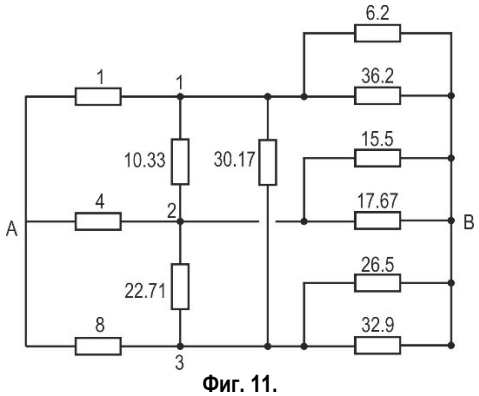


Фиг. 10.

Преобразуваме тази звезда в триъгълник (12B).
Правим още две преобразования звезда – триъгълник

$$5(23B) \rightarrow (23B)\,; \qquad 6(31B) \rightarrow (31B)$$

Видът на схемата след тези преобразувания е показан на фиг.11. Броят на съпротивленията се запазва равен на 12, а възлите 4, 5 и 6 отпадат.



Фиг. 11.

Ще запишем изчисленията при тези преобразования.

$$4(12B) \rightarrow (12B)$$
$$R_{12} = 2 + 5 + \frac{2\,.\,5}{3} = 10.33$$
$$R_{2B} = 5 + 3 + \frac{5\,.\,3}{2} = 15.9$$
$$R_{1B} = 2 + 3 + \frac{2\,.\,3}{5} = 6.2$$

$$5(23B) \rightarrow (23B)$$
$$R_{23} = 6 + 9 + \frac{6\,.\,9}{7} = 22.71$$
$$R_{3B} = 9 + 7 + \frac{9\,.\,7}{6} = 26.5$$
$$R_{2B} = 6 + 7 + \frac{6\,.\,7}{9} = 17.67$$

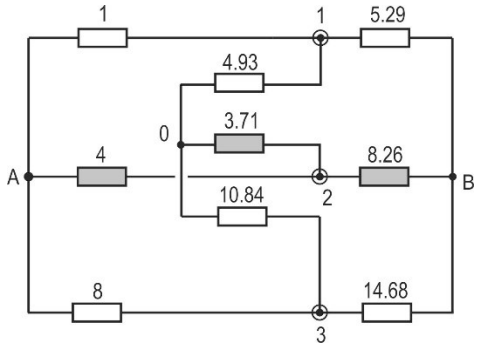
$$6(31B) \rightarrow (31B)$$
$$R_{31} = 10 + 11 + \frac{10\,.\,11}{12} = 30.17$$
$$R_{1B} = 11 + 12 + \frac{11\,.\,12}{10} = 36.2$$
$$R_{3B} = 10 + 12 + \frac{10\,.\,12}{11} = 32.9$$

Стойностите на изчислените съпротивления са нанесени на фиг.11.

Трите двойки успоредно свързани съпротивления са:

$$(6.2^{-1} + 36.2^{-1})^{-1} = 5.29$$
$$(15.5^{-1} + 17.67^{-1})^{-1} = 8.26$$
$$(26.5^{-1} + 32.9^{-1})^{-1} = 14.68$$

Тези три съпротивления, свързани към точка B са показани на фиг.12.

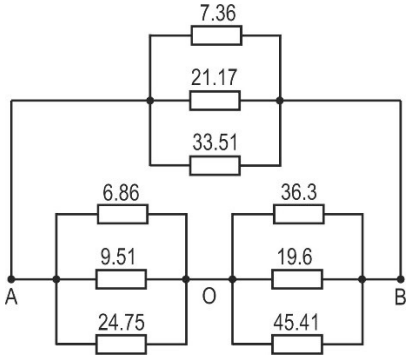


Фиг. 12.

Преобразуваме триъгълника (123) в звезда 0(123).

$$(123) \rightarrow 0(123)$$
$$R_{01} = \frac{10.33 \,.\, 30.17}{10.33 + 30.17 + 22.71} = 4.93$$
$$R_{02} = \frac{10.33 \,.\, 22.71}{10.33 + 30.17 + 22.71} = 3.71$$
$$R_{03=} \frac{22.71 \,.\, 30.17}{10.33 + 30.17 + 22.71} = 10.84$$

От схемата на фиг.12 преминаваме към схемата на фиг.13.



Фиг. 13.

Чрез три преобразования звезда в триъгълник:

$$1(AOB) \rightarrow (AOB)$$
$$R_{AO} = 1 + 4.93 + \frac{1 \,.\, 4.93}{5.29} = 6.86$$
$$R_{OB} = 4.93 + 5.29 + \frac{4.93 \,.\, 5.29}{1} = 36.3$$
$$R_{AB} = 1 + 5.29 + \frac{1 \,.\, 5.29}{4.93} = 7.36$$

$$2(AOB) \rightarrow (AOB)$$
$$R_{AO} = 4 + 3.71 + \frac{4 \,.\, 3.71}{8.26} = 9.51$$
$$R_{OB} = 3.71 + 8.26 + \frac{3.71 \,.\, 8.26}{4} = 19.6$$
$$R_{AB} = 4 + 8.26 + \frac{4 \,.\, 8.26}{3.71} = 21.17$$

$$3(AOB) \rightarrow (AOB)$$
$$R_{AO} = 8 + 10.84 + \frac{8 \,.\, 10.84}{14.68} = 24.75$$
$$R_{OB} = 10.84 + 14.68 + \frac{10.84 \,.\, 14.68}{8} = 45.41$$
$$R_{AB} = 8 + 14.68 + \frac{8 \,.\, 14.68}{10.84} = 33.51$$

На фиг.13 имаме три групи с по три успоредно свързани съпротивления:

$$(7.36^{-1} + 21.17^{-1} + 33.51^{-1})^{-1} = 4.696$$
$$(6.86^{-1} + 9.51^{-1} + 24.75^{-1})^{-1} = 3.433$$
$$(36.3^{-1} + 19.6^{-1} + 45.41^{-1})^{-1} = 9.941$$

Събираме последните две (3.433 + 9.941 = 13.374) и окончателно за търсеното съпротивление R_{AB} намираме

$$R_{AB} = (4.696^{-1} + 13.374^{-1})^{-1} = 3.476\Omega$$

Ако завъртим куба от фиг. 9 на 90° около вертикална ос, минаваща през центъра, всички ръбове ще разменят местата си.

Повтаряме всички преобразувания от фиг. 9 до фиг. 13 с новите стойности на съпротивленията, които са дадени в таблица 2 под R_{15}. Например ръба А1 ще има стойност 2Ω, ръба А2-1Ω и т.н. Последната изчислена стойност на R_{AB} всъщност ще бъде $R_{15} = 4.090\Omega$

Таблица 2.

ръб	R_{AB}.	R_{15}.	R_{43}.	R_{26}.
A1	1	2	5	4
A2	4	1	2	5
A3	8	11	3	6
B4	3	6	8	11
B5	7	9	10	12
B6	12	7	9	10
14	2	5	4	1
24	5	4	1	2
25	6	8	11	3
35	9	10	12	7
36	10	12	7	9
16	11	3	6	8

За да намерим R_{43} и R_{26} работим със стойностите от таблица 2 и определяме:

$$R_{43} = 5.086\Omega \quad \text{и} \quad R_{26} = 6.033\Omega$$

Така съпротивленията между всички противоположни върхове на куба са определени.

$$R_{AB} = 3.476\Omega\,; \quad R_{15} = 4.090\Omega\,;$$
$$R_{43} = 5.086\Omega; \quad R_{26} = 6.033\Omega$$

Литература

Уилсон, Р. (1977). *Введение в теорию графов*. Мир, Москва.

Харари, Ф. (1973). *Теория графов*. Мир, Москва.

Козаров А., Ст. Стефанов. (1978). *Теоретични основи на електротехниката*, Техника, София.

ON DETERMINING STRESSES AND DISPLACEMENTS AROUND A VERTICAL SHAFT IN A CRACKED ROCK MASSIF

Malina Ivanova

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

ABSTRACT: A vertical circular shaft has been dug into a cracked massif. Cracks are locations in systems that are oriented. Rock masses with such cracks are represented as transversely isotropic. For them, the expressions for the technical constants, in which the geometric characteristics of the cracks participate, are given. The analytical expressions for the stresses and displacements at points around the hole are determined using the complex function method. Three types of real rock massif are examined. The first has a system of cracks located in horizontal planes. The second rock massif has two systems of cracks: one is horizontal and the other is inclined. The third rock massif is isotropic. For these rock masses, the diagrams of the relative tangential normal stresses along the contour of the vertical shaft are given. The radial displacements along the contour of the hole in a cross section at a certain depth are determined.

Key words: vertical circular shaft, cracked massif, complex function method.

ВЪРХУ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НАПРЕЖЕНИЯТА И ПРЕМЕСТВАНИЯТА ОКОЛО ВЕРТИКАЛНА ШАХТА В НАПУКАН СКАЛЕН МАСИВ

Малина Иванова

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

РЕЗЮМЕ: Вертикална кръгова шахта е прокопана в напукан масив. Пукнатините са разположение в системи, които са ориентирани. Скалните масиви с такива пукнатини са представят като трансверзално изотропни. За тях са дадени изразите за техническите константи, в които участват геометричните характеристики на пукнатините. Аналитичните изрази за напреженията и преместванията в точки около отвора се определят с метода на комплексна функция. Разгледани са три вида реални скални масиви. Първият притежава една система от пукнатини, разположени в хоризонтални равнини. Вторият скален масив притежава две системи пукнатини: едната е хоризонтална, а другата е наклонена. Третият скален масив е изотропен. За тези скални масиви са дадени диаграмите на относителните тангенциални нормални напрежения по контура на вертикалната шахта. Определени са радиалните премествания по контура на отвора в напречно сечение на определена дълбочина.

Ключови думи: вертикална кръгова шахта, напукан масив, метода на комплексна функция.

Introduction

The cracks in the rock massifs vary in size and location. This article considers cracks of limited size that form networks (Rupeneit, 1977). According to the orientation of the cracks, networks are divided into systematic, polygonal, and chaotic. The first networks are observed in sedimentary soil masses and are characterised by a significant density of cracks. In these rock masses, one of the crack systems is parallel to the soil layer. Then it is anisotropic in mechanical properties. The polygonal network of cracks has one system of cracks and many other cracks perpendicular to the common axis. These cracks occur in igneous rocks (basalts, andesites, trachytes, liparites) and coarse-grained rocks (gabbro, diorites and granites). Massifs with such cracks are considered to be transversely isotropic (Vucheva et al., 2023). The plane of isotropy is in the direction of the single crack system. The chaotic crack network consists of cracks with disordered orientation. Such systems are observed in metamorphic rocks. These arrays are presented as quasi-isotropic media in terms of their mechanical properties. The modulus of linear deformation is smaller than the Young's modulus in the isotropic medium.

The work considers rock masses with *n* number of crack networks. For it, the stresses and displacements in a horizontal cross-section of a vertical shaft will be determined.

Methods

1. Problem formulation

A vertical shaft with a circular cross-section has been driven into a massif bounded by a horizontal surface r_o. The coordinate system is cylindrical with a center at the center of the circle O and an axis z coinciding with the axis of manufacture (Fig. 1).

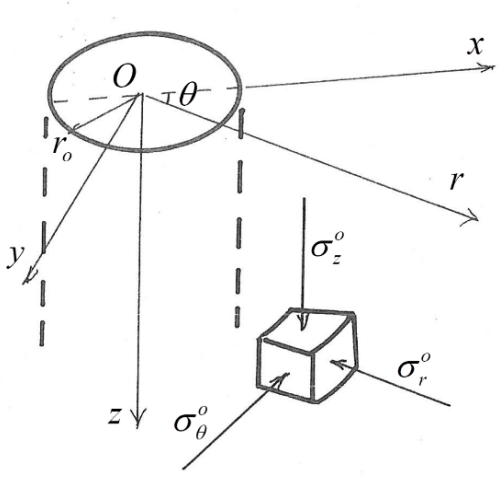


Fig. 1. Stresses around a vertical shaft

The stresses in an undisturbed massif before driving the hole are:

$$\sigma_r^o = \sigma_\theta^o = k_1\sigma_z^o \quad \tau_{rz}^o = 0 \quad \sigma_z^o = \gamma z\,. \tag{1}$$

Here, γ is the volumetric weight, and k_1 is the coefficient of lateral pressure:

$$k_1 = -\frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}}, \quad (2)$$

Coefficients in these expressions are expressed by the constants of isotropic and transversely isotropic media in (Vucheva et al., 2024), and for cracked media they will be given below in the article.

2. Technical constants in a cracked environment

In the rock massif with oriented cracking, anisotropy is formed with the following parameters: (Rupeneit, 1975):

$$E_2 = \frac{E}{1+\sum_{i=1}^{n}\eta_i\left(1-\sin^4\theta_i\right)};$$

$$E_1 = \frac{E}{1+\sum_{i=1}^{n}\eta_i\left(1-\cos^4\theta_i\right)};$$

$$\mu_i = \mu + \sum_{i=1}^{n}\eta_i \sin^2\theta_i\cos^2\theta_i. \quad (3)$$

Here, θ_i is the angle of inclination to the horizontal plane of crack system i,

n is number of system cracks,

E_1 is the modulus of deformation in the horizontal direction Ox or Oy (Fig. 1),

E_2 is the modulus of deformation in the vertical direction Oz (Fig. 1),

μ_1 is Poisson’s ratio in the horizontal direction,

μ_2 is Poisson’s ratio in the vertical direction,

E is Young’s modulus in isotropic medium,

μ is Poisson’s ratio in isotropic medium.

The geometric characteristic of the crack system has the form:

$$\eta_i = \frac{\delta_i}{h_i\xi_i}, \quad (4)$$

where

h_i is the average distance between system of cracks,

δ_i is average crack opening width,

i is crack system number,

ξ_i is the relative area of the rock contact. It is studied using special experiments and the method of probability theory.

3. Stresses and displacements

Considering the axial symmetry of the problem, the components of stresses, strains, and displacements do not depend on angle φ. The r and z coordinates are quite sufficient. Stresses at a point in the rock massif are (Lekhnitskii, 1977, 1981):

$$\sigma_r = \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}}\sigma_z^o\left(1-\frac{r_o^2}{r^2}\right);\ \tau_{rz}=0;$$

$$\sigma_\theta = \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}}\sigma_z^o\left(1+\frac{r_o^2}{r^2}\right);\ \sigma_z=\sigma_z^o, \quad (5)$$

where

$$a_{11}=\frac{1}{E_1};\ a_{12}=-\frac{\mu_1}{E_1};\ a_{13}=-\frac{\mu_2}{E_2}.$$

In these expressions, r is the current coordinate of the point.

The components of the displacement vector have the form:

$$u = \frac{\left(a_{11}-a_{12}\right)a_{13}}{a_{11}+a_{12}}.\gamma z.\frac{r_o^2}{r};$$

$$w_1 = w_1 + w_2 + w_o; \quad (6)$$

$$w_1 = \frac{2a_{13}^2 - a_{33}\left(a_{11}+a_{12}\right)}{a_{11}+a_{12}}.\gamma z;$$

$$w_2 = -\frac{a_{13}\left(a_{11}-a_{12}\right)}{a_{11}+a_{12}}.\gamma r_o^2\ln\left(\frac{r}{r_o}\right).$$

Here, w_o is an initial move.

Stresses and displacements along the contour of the hole are of interest for practice. They are obtained from (5) and (6) by putting $r = r_o$ and have the form:

$$\sigma_r = 0;\ \sigma_\theta = \frac{2a_{13}}{a_{11}+a_{12}}\sigma_z^o;\ \tau_{rz}=0;$$

$$\sigma_z=\sigma_z^o;\ u = \frac{\left(a_{11}-a_{12}\right)a_{13}}{a_{11}+a_{12}}.\gamma z.r_o. \quad (7)$$

4. Numerical example

The cracks are located in planes. The obtained results are applied to three types of media: media with one crack system (Fig. 2), media with two crack systems (Fig. 3), and isotropic media.

The angle of inclination of the *i*-th crack system to the horizontal plane and the average distance between the crack systems can be seen in Figure 3. These parameters and the average distance between crack systems are given in Table 1. Environment 1 is for a rock massif with one system of cracks, and environment 2 is for a rock massif with two systems of cracks.

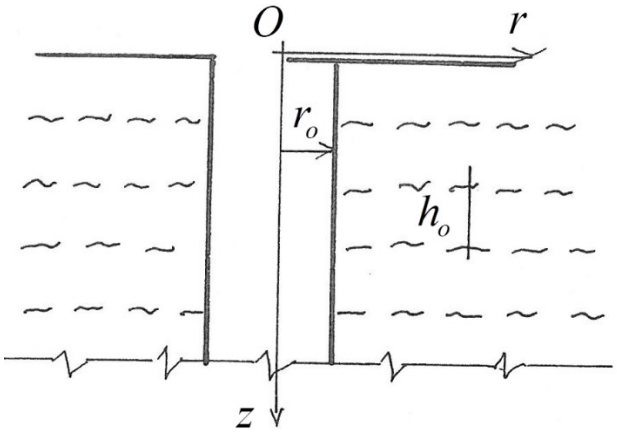


Fig. 2. Vertical shaft in a rock massif with a single system of cracks

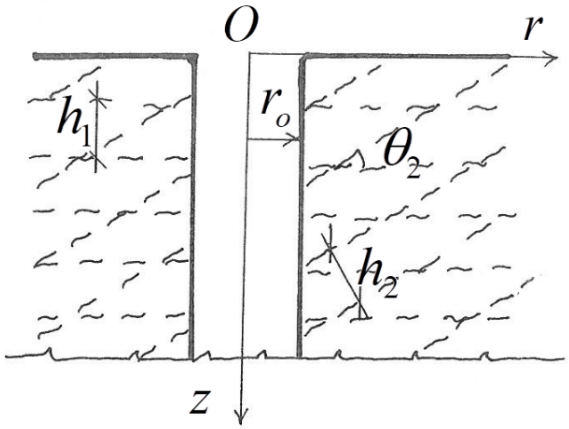


Fig. 3. Vertical shaft for rock massif with two fracture systems

Table 1. *Characteristics of a cracked environment*

medium	θ_i	δ_i	h_i
dimension	$[^\circ]$	$[cm]$	$[cm]$
1	0	0.02	80
2	30	0.02	100

The relative area of the rock contacts is $\xi_1 = \xi_2 = \xi = 3.10^{-4}$. Young's modulus and Poisson's ratio are: $E = 10^4 MPa$, $\mu = 0{,}2$. The radius of the shaft is $r_o = 1{,}5m$, the relative weight of the rock mass is $\gamma = 2{,}5.10^{-3} MN/m^3$ and the depth of the cross section is $z = 20m$.

The characteristics for the two types of cracked rock were determined according to (3) and using spreadsheets (Aleksander et al., 2022). By putting $E_1 = E_2 = E$ and $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ in (3), we obtain the technical constants for an isotropic medium. From equations (7), the tangential normal stresses and radial displacements for the three types of media were calculated. The stresses are referred to the σ_z^o in the undisturbed environment. The results are presented in Table 2.

Table 2. *Relative tangential normal stresses and displacements*

medium	$\sigma_\theta / \sigma_z^o$	u
dimension	-	mm
1	0.9	0.2
2	1.8	0.6
3	0.5	0.2

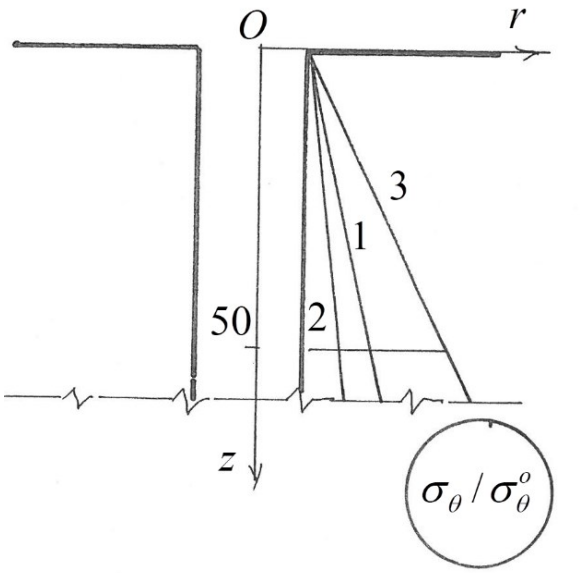


Fig. 4. Relative diagrams of normal tangential stresses

5. Key findings

The approach described in the article for determining stresses and displacements is applied to a rock massif with several crack systems.

The method is easy to use because it uses spreadsheets (Aleksander et al., 2022).

Conclusion

A method for determining the stress and strain state around a vertical shaft passing through a rock massif with oriented crack systems is described. This method can be extended to a rock massif consisting of layers with a polygonal network of cracks or of quasi-isotropic layers. The method described in Trifonova-Genova et al. (2023) is used, consisting of three stages. During the first stage, the technical characteristics of the array are determined according to (3). Then, the characteristics for an equivalent rock massif are determined. In the third stage, the stresses in each quasi-isotropic layer or in a layer with a polygonal network of cracks are determined.

Analytical expressions for stresses and displacements are applicable only for simple and correct geometry of the crack system. For rocks with a more complex system of cracks, the finite element method (FEM) is recommended. It uses models based on continuous materials and accounts for the presence of a large number of cracks of different sizes and orientations (Peng-fei He et al., 2024).

References

Aleksander, M. & Kusleika, D. (2022). *Microsoft Excel 365* Bible. 1st Edition, Wiley, 1072 p. ISBN 978-1119835103

Lekhnitskii, S. G. (1977). *Teorii uprugosti anizotropnogo tela*. Moskva: Nauka, 416 p. (in Russian)

Lekhnitskii, S. G. (1981). *Theory of Elasticity of an Anisotropic body*, 431 p. https://archive.org/details/lekhnitskii-theory-of-elasticity-of-an-anisotropic-body-mir-1981

Peng-fei He, Pnnaduwa HSW Kulatilake, Dong-qiao Liu & Man-chao He. (2024). A 3-D Strength Criterion Developed for Jointed Coal Masses Based on True Tri-axial Tests and 3-DEC Numerical modelling. *Proceedings of the 1-st ISRM Commission on Estimation of Rock Mass Strength and Deformability* - Lima, Peru, 7-8.

Rupenneit, K. V. (1975). *Deformiruemost masivov treschinovatyh gornyh porod*, Moskva: Nedra, 223 str.

Trifonova-Genova, V. & Tonkova, G. (2023). Stress around circular opening passing through two isotropic layers. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” – Sofia*, *66*, Section II: Mining and Mineral Processing, 74-77.

Vucheva, R. & Trifonova-Genova, V. (2023). Stress around a circular horizontal opening driven in cracked rock mass. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” – Sofia*, *66*, Section: Mechanisation, Electrification, and Automation, 195-198.

Vucheva, R. & Trifonova-Genova, V. (2024). Stress around a horizontal mine gallery passing through cracked rock mass. *Annual of the University of Mining and geology “St. Iv, Rilski” – Sofia*, *67*, Section: Mechanisation, Electrification, and Automation, 212-215.

RESEARCH AND ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF MAIN COMPONENTS OF *BELAZ 75131* AND *BELAZ 75137 130T* DUMP TRUCKS IN THE *ELLATZITE-MED* OPEN-PIT MINE

Evgeni Iliev, Mario Simeonov

”Ellatzite-Med” AD 2086 Mirkovo; E-mail: e.iliev@ellatzite-med.com; m.simeonov@ellatzite-med.com

ABSRACT. Automobiles are complex technical systems. Their performance in the process of operation is systematically restored by performing maintenance and current repairs. To assess and analyse the reliability of automobiles in the process of operation, it is necessary to have the main qualitative and quantitative indicators of operational reliability. The determination of the qualitative and quantitative characteristics of reliability is carried out on the basis of processing the information received about the failures and malfunctions of transport equipment that occurred in the process of operation of the vehicle fleet. The processing and analysis of information about failures and malfunctions is aimed at solving the following main tasks: determining the causes of failures and malfunctions; determining the actual level of reliability of transport equipment under different operating conditions; developing and assessing the effectiveness of actions to increase the reliability of transport equipment; developing and improving the organisation and technology for carrying out current repairs of transport equipment.

Key words: reliability, failures, technology.

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НАДЕЖДНОСТТА НА ОСНОВНИ ВЪЗЛИ ПРИ КАРИЕРНИ АВТОСАМОСВАЛИ БЕЛАЗ 75131 И БЕЛАЗ 75137 130Т. В ОТКРИТ РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ МЕД“

Евгени Илиев, Марио Симеонов

“Елаците-Мед“ АД, 2086 Мирково; E-mail: e.iliev@ellatzite-med.com

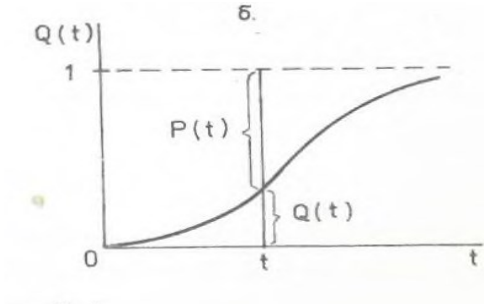
РЕЗЮМЕ. Автомобилите представляват сложни технически системи. Тяхната работоспособност в процеса на експлоатация системно се възстановява чрез извършване на операциите от техническото обслужване и текущите ремонти. За оценка и анализ на надеждността на автомобилите в процеса на експлоатация е необходимо да се разполага с основните качествени и количествени показатели на експлоатационната надеждност. Определянето на качествените и количествените характеристики на надеждността се осъществява на основата на обработката на получената информация за отказите и неизправностите на транспортната техника, възникнали в процеса на експлоатация на автомобилния парк. Обработката и анализът на информация за отказите и неизправностите имат за цел да решат следните основни задачи: определяне причините за възникване на отказите и неизправностите; определяне фактическото равнище на надеждност на транспортната техника при различни условия на експлоатация; разработване и оценка на ефективността на действията по повишаване надеждността на транспортната техника; разработване и усъвършенстване на организацията и технологията на извършване на текущите ремонти на транспортната техника.

Ключови думи: надеждност, отказ, технологии.

Въведение

Общи сведения за надеждността на автосамосвали БЕЛАЗ 75131 И БЕЛАЗ 75137 130Т:Надеждността е един от основните инженерни проблеми, който е бил обект на определено внимание от появяването на техниката до днес. Този проблем винаги е важен при конструирането, изработването, експлоатирането и ремонтирането на дадено техническо изделие или система. През последните няколко десетилетия въпросите на надеждността започнаха да се разглеждат и изучават много задълбочено и на научна основа.

Ръководството на един от водещите рудодобивни комплекси в България „Елаците Мед“ всекидневно се стреми да внедри иновации в технологиите с цел подобряване на експлоатацията и удължаване живота на наличната си карiерна техника. Ръководството на цех технологичен автотранспорт към рудодобивния комплекс, към който принадлежат автосамосвали Белаз, се стреми да поддържа карiерните автосамосвали технически изправни с цел постигане на максимално много работни часове на основни възли от задвижването на автосамосвалите и намаляване на експлоатационните разходи при възникване на аварии. В тази връзка се правят множество проучвания и изследвания. За предоставяне на нагледна графична информация, се изработват така наречените графики за вероятност на отказа фиг. 1.



Фиг. 1 Графика вероятност на отказа

Вероятността за поява на отказ Q(t) изразява появата на отказ в интервала (0,t), тоест ще се реализира събитието T<t.

Графиката за вероятността на отказ се изразява с монотонно нарастваща функция със следните гранични условия: Q(0)=0 и Q(∞)=1, фиг. 1.

За целтите на доклада е обработена информация за 10 броя автосамосвала Белаз 130т, като първият е въведен в експлоатация през 2004 година и изведен от експлоатация 2019 година. От разглежданите общо 10 броя автосамосвали, 8 от тях са с изчерпан ресурс и наработили средно 72 725 моточаса или 46 % над утвърдените 50 000

моточаса за извеждане от експлоатация от завода производител. Към момента, два броя от разглежданите автосамосвали все още са в експлоатация (таб. 1 и таб. 2).

Таблица 1. *Използвани автосамосвали*

№ Автосамосвал	Мото-часове	Километри (пълни+празни)	Тонкилометри
1	74 714	724 255	35 816 065
2	69 601	694 210	33 319 273
3	78 436	816 402	37 316 230
4	69 963	703 035	34 124 958
5	72 540	737 867	36 144 225
6	74 525	766 570	37 397 630
7	70 803	718 900	35 441 236
8	71 214	732 488	36 192 241
9	59 724	641 522	34 073 756
10	56 631	609 890	32 393 582
Общо		7 145 140	352 219 197

Таблица 2. *Експлоатация на дадените автосамосвали*

№ Автосамосвал	Дата на въвеждане	Дата на извеждане	Години в работа
1	5.4.2004	8.4.2019	15
2	14.2.2005	18.8.5021	15
3	17.4.2006	6.1.2021	14
4	19.1.2007	22.8.2022	15
5	27.1.2007	27.9.2021	14
6	19.1.2007	4.5.2020	13
7	26.11.2007	13.6.2022	15
8	26.11.2007	13.1.2022	15
9	6.4.2015	в експлоатация	11
10	6.4.2015	в експлоатация	11

Изложение:

Разгледани са отказите на основните възли от задвижването на този тип кариерна техника, а именно: откази на задвижващите електрически двигатели; откази на двигателя с вътрешно горене; отказ на двигателя с вътрешно горене; отказ на задвижващ генератор.



Фиг. 2 Графично изображение на наработените откази на десен електродвигател на 10 автосамосвала

Откази на задвижващ електрически двигател

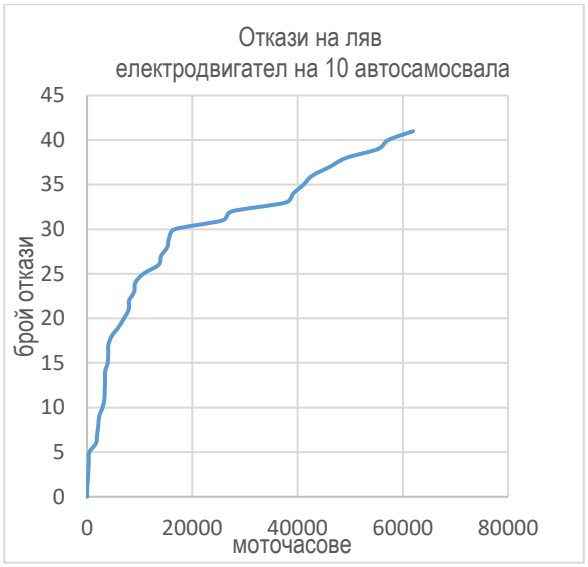
На фиг. 2 и 3 графично са представени отказите съответно на десен и ляв електродвигател на 10 самосвала, а в Таблица 3 е дадено обобщение на числовите характеристики на тези откази и наработени часове.

Таблица. 3. *Откази на електрически двигатели*

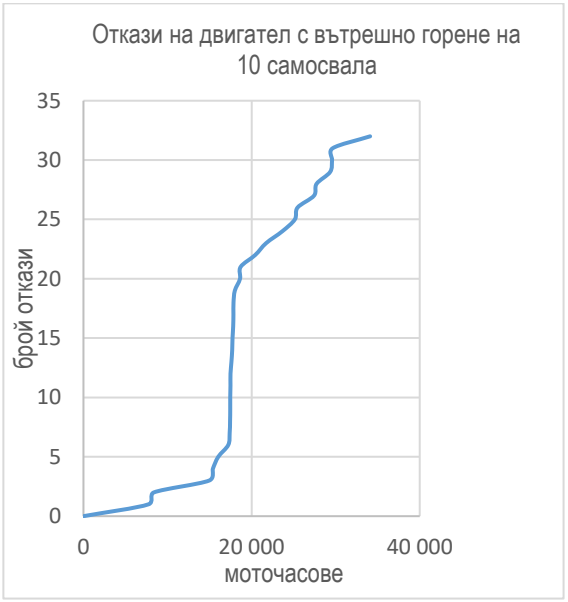
№	Автосамосвал Белаз 75131	Десен ел. двигател	№	Автосамосвал Белаз 75131	Ляв ел. двигател
		Наработил м.ч.			Наработил м.ч.
1	Белаз №1	45 042	1	Белаз №1	57 214
2		19 843	2		15 586
3		6 598	3		1 914
4		3 231	4	Белаз №2	39 168
5	Белаз №2	39 168	5		25 768
6		21 077	6		4 665
7		7 470	7	Белаз №3	42 768
8		233	8		3 422
9		1 653	9		254
10	Белаз №3	39 967	10		15 248
11		6 223	11		4 038
12		20 984	12		1 695
13		7 200	13		10 689
14		1 858	14		322
15		1 204	15	Белаз №4	41 130
16	Белаз №4	55 050	16		2 291
17		2 230	17		7 008
18		9 201	18		13 567
19		3 482	19		5 967
20	Белаз №5	33 875	20	Белаз №5	37 769
21		3 894	21		430
22		14 951	22		21
23		9 601	23		14 050
24		884	24		3 895
25		10 586	25		160
26		2 600	26		16 645
27		2 010	27	Белаз №6	61 945
28		1 455	28		3 420
29	Белаз №6	42 283	29		9 160
30		6 823	30	Белаз №7	46 125
31		3 049	31		3 295
32		557	32		7 985
33		4 813	33		3 348
34		5 315	34		7 913
35		11 685	35		2 137
36	Белаз №7	34 124	36	Белаз №8	55 290
37		27 621	37		8 961
38		9 058	38		4 022
39	Белаз №8	53 988	39		2 941
40		14 987	40	Белаз №9	27 470
41		2 239	41	Белаз №10	49 235
42	Белаз №9	36 242		Средно	16 071
43	Белаз №10	21 278			
44		22 674			
	Средно	15 189			

Откази на двигател с вътрешно горене

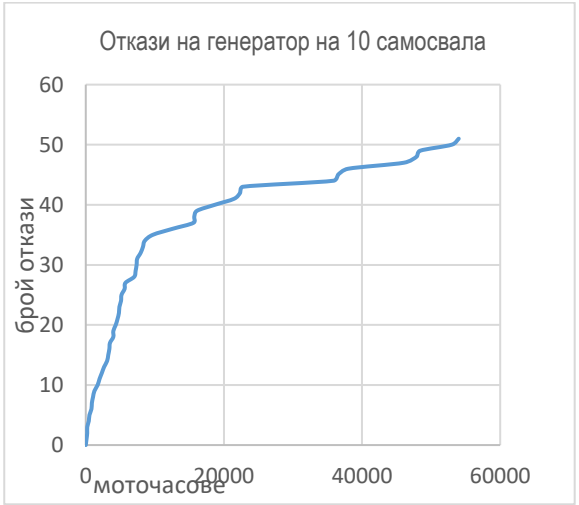
В Таблица 4 е дадена информация за отказите на двигателите с вътрешно горене на 10 самосвала, а на фиг. 4 е дадена диаграма на тези откази.



Фиг. 3 Графично изображение на наработените откази на ляв електродвигател на 10 автосамосвала



Фиг. 4 Графично изображение наработените откази на двигателя с вътрешно горене на 10 автосамосвала



Фиг. 5. Диаграма на отказите на генератори на 10 автосамосвала.

Таблица 4 *Откази на двигателя с вътрешно горене.*

№	Автосамосвал Белаз 75131	Двигател с вътрешно горене
		Наработил м.ч.
1	Белаз №1	17 733
2		17 812
3		17 440
4		21 729
5	Белаз №2	17 226
6		29 570
7		25 471
8	Белаз №3	17 850
9		7 740
10		17 460
11		20 430
12		14 956
13	Белаз №4	17 839
14		34 097
15		25 146
16	Белаз №5	17 692
17		17 393
18		27 423
19	Белаз №6	17 603
20		17 487
21		18 622
22		18 009
23		15 398
24	Белаз №7	17 492
25		23 656
26		29 655
27	Белаз №8	17 460
28		8 371
29		16 038
30		29 345
31	Белаз №9	18 700
32	Белаз №10	27 732
	Средно	**20 018**

Откази на задвижващ генератор

На фиг. 5 е дадена диаграма на отказите на генераторите на 10 самосвала, а Таблица 5 съдържа числовите характеристики на тези откази.

От информацията в таблицата може да се заключи, че средната стойност на наработените моточасове е 12 630.

Таблица 5 *Отказ на задвижващ генератор*

№	Автосамосвал Белаз 75131	Генератор Наработени м.ч.	№	Автосамосвал Белаз 75131	Генератор Наработени м.ч.
1	Белаз №1	52 985	26	Белаз №6	37 995
2		16 106	27		7 440
3		5 623	28		5 103
4	Белаз №2	48 420	29		4 802
5		7 005	30		532
6		4 600	31		7 945
7		4 341	32		2 327
8		1 050	33		206
9		3 991	34		5 175
10	Белаз №3	47 890	35	Белаз №7	46 046
11		21 473	36		15 594
12		108	37		882
13		1 720	38		8 281
14		7 215	39	Белаз №8	53 995
15	Белаз №4	22 762	40		3 502
16		35 858	41		212
17		3 985	42		3 088
18		7 358	43		3 417
19	Белаз №5	36 523	44		436
20		12 567	45		5 743
21		4 868	46		821
22		3 256	47	Белаз №9	18 700
23		1 990	48		8 545
24		2 649	49	Белаз №10	9 715
25		1 248	50		15 705
			51		22 354

Заключение:

Изменението на надеждността на изделията (машини и техните съставни елементи) в процеса на работа има за първопричина изменението в свойствата и състоянието на материалите, от които са изработени, под действието на различни външни и вътрешни фактори, съпровождащи тяхната работа или взаимосвързани с нея. Колкото по-дълбоко са изучени закономерностите, описващи тези изменения, толкова по-достоверно може да се предскаже поведението на изделията в дадени условия на експлоатация и да се осигури запазване равнището на надеждност в необходимите граници.

Основна задача на теорията на надеждността е установяването на вероятностните и статични закономерности при появата на откази в обектите в процеса на тяхната експлоатация или изпитване.

След направените изследвания, тестове и проучвания за отказите на основни възли от задвижването на кариерни автосамосвали Белаз на територията на рудодобивен комплекс „Елаците Мед“ може да се направи следния извод:

Изхождайки от диаграмите и таблиците за наработени откази при ляв и десен електродвигател става ясно, че ресурса на фабрично новия възел е около 35 000 моточаса, а след монтажа на ремонтирани възли се наблюдава ресурс средно от около 15 000 моточаса.

Отказите на най-скъпо струващия възел в кариерния автосамосвал са 32 броя за 10 автосамосвала или средно всяка една машина, за да наработи ресурс от 70 000 моточаса са й необходими 3 броя двигатели с вътрешно горене.

При анализирането на отказите на генератора може да се отчете, че фабричните генератори достигат ресурс от около 35 000 – 50 000 моточаса, а след монтаж на отремонтиран генератор отказът спада от 1 000 моточаса до 20 000 часа. Затова следва да бъде направен анализ дали е рентабилно да се монтират отремонтирани генератори или да се премине само на фабрично нови.

Обобщено, подобни анализи се извършват постоянно, за да може автосамосвалите да наработят 40% повече ресурс от заложения им от завода производител. Също така по този начин се дава яснота за заявяване на резервни части и консумативи на коментираните автосамосвали, което изисква подаването на информация предварително (6 месеца преди това) и разбиването на доставката на резервни части и консумативи по месеци, тъй като заводът, изработващ частите, е само един в света, той трябва да има точна и коректна информация от ползвателите.

Литература:

Димитров, Ж. (1988). *Надеждност на железопътната техника*. София.

Горанова, Е.(1974). *Надеждност на машиностроителните изделия.* С. Техника, 1974.

Гиндев, Е. (1982). *Избиране и нормиране на показателите на надеждността*. С. Техника, 1982.

МУ 664-80. (1980). Основни изисквания към методиките, заводски и отраслови норми и българските държавни стандарти за изпитване на изделията на надеждност. С.

МУ 22-84. (1973). *Ускорени изпитвания на изделията на надеждност*. С., Техника, 1973.

Руководства по эксплуатации на соответствующие модели и модификации карьерной техники БЕЛАЗ.

ОАО “БЕЛАЗ” – управляющая компания холдинга “БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ”, Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513 и их модификации, Руководство по ремонту, Жодино, Республика Беларусь .

Technical and operational characteristics of output goods, reference book – S.A. Boikov.

https://belaz.by/

https://www.lectura-specs.com/

ELECTRICAL EFFICIENCY OF BALL MILLS DEPENDING ON THE PERIPHERAL SPEED OF ROTATION OF THE DRUM

Zhivko Iliev, Nikolay Lakov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia

ABSTRACT. The effective operation of a ball mill depends largely on the nature of the movement of the grinding medium. At a certain relative speed and a certain filling factor of the ball mill, it operates in the so-called waterfall mode of operation**.** In this mode, the balls from all layers, rising together with the drum, break away from it and go into free flight. The grinding of the material occurs mainly by impact, with the efficiency being a function of the peripheral speed of the drum.

Key words: ball mill.

ЕЛЕКРОЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ТОПКОВИ МЕЛНИЦИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ ПЕРИФЕРНАТА СКОРОСТ НА ВЪРТЕНЕ НА БАРАБАНА

Живко Илиев, Николай Лаков

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

РЕЗЮМЕ. Ефективната работа на топковата мелница зависи до голяма степен от характера на движение на смилащата среда. При определена относителна скорост и определен коефициент на запълване на мелницата с топки, тя работи в така наречения водопаден режим на работа. При този режим топките от всички слоеве, издигайки се заедно с барабана се откъсват от него и преминават в свободен полет. Смилането на материала става главно чрез удар, като ефективността е във функция на периферната скорост на барабана.

Ключови думи: топкова мелница.

Въведение

Един от основните фактори, влияещ на ефективната работа на топковите мелници, е режимът на работа на топковия товар. Според изследване на Позднякова и Воронов (2009), не повече от 40 % от мелещите тела от общото количество, намиращо се в барабана на мелницата, имат активно участие в процеса на смилане. Останалата част във вид на плътен компактен слой се премества в централната част и по никакъв начин не влияе на смилащия се материал.

При малка ъглова скорост на мелницата целият топков пълнеж се изнася по посока на въртенето на барабана, което се нарича каскаден режим, имащ ниска производителност. С увеличаване на ъгловата скорост, топките от всички слоеве се издигат заедно с барабана, откъсват се от него и преминават в състояние на свободен полет. В този режим смилането на материала става главно чрез удар и отчасти чрез стриване. Когато ъгловата скорост на мелницата стане толкова голяма, че надмине критичната и за най-вътрешния слой от топки, целият топков пълнеж се разпределя равномерно по периферията на барабана и започва да се движи с него. Движението на смилащата среда е описано в много научни източници (Tang et al., 2016; Shah et al., 2019; Liu et al. 2020). Например в работата на Аскани и кол. (Aksani and Sonmez, 2000) е предложен модел, описващ кинематиката на ротационното движение на смилащата среда при каскаден режим на работа на барабанни топкови мелници.

В изследването на Чешьов и Джустров (Chetyov and Dzhustrov, 2020) е установено, че както завишеното, така и заниженото натоварване с руда, води до намаляване на производителността на мелницата, което предизвиква повишаване на специфичния разход на електроенергия. При оптимално натоварване на мелницата, работеща в затворен цикъл, може да се допусне повишение на циркулационния товар при едновременно увеличение на производителността, снижавайки специфичния разход на електроенергия (Багдасарян, 2011) и подобрявайки технологичните показатели.

Синхронните двигатели, използвани за задвижване на топковите мелници, се характеризират с абсолютно твърда механична характеристика, т.е. оборотите на електродвигателя не зависят от големината на товара. Известно е, че работата на топковия товар зависи от траекторията на падане на топките. Тя пък зависи от периферната скорост на барабана на мелницата и масата на отделната топка.

От 14 работещи мелници в обогатително предприятие са изследвани седем еднотипни мелници, работещи при приблизително еднакви условия: маса на топковия товар, постъпваща за смилане руда и качество на изходния продукт.

Теоретична постановка

Всички мелници се задвижват със синхронни двигатели и редуктор, като честотата на въртене на изхода на редуктора е 150 min^{-1}. Чрез зъбно колело и зъбен венец, служещи за допълнителна предавка, се задвижва барабана на мелницата с честота:

$$\omega = \omega_{\text{сд}} \frac{Z_1}{Z_2}, \text{ min}^{-1} \quad (1)$$

където:

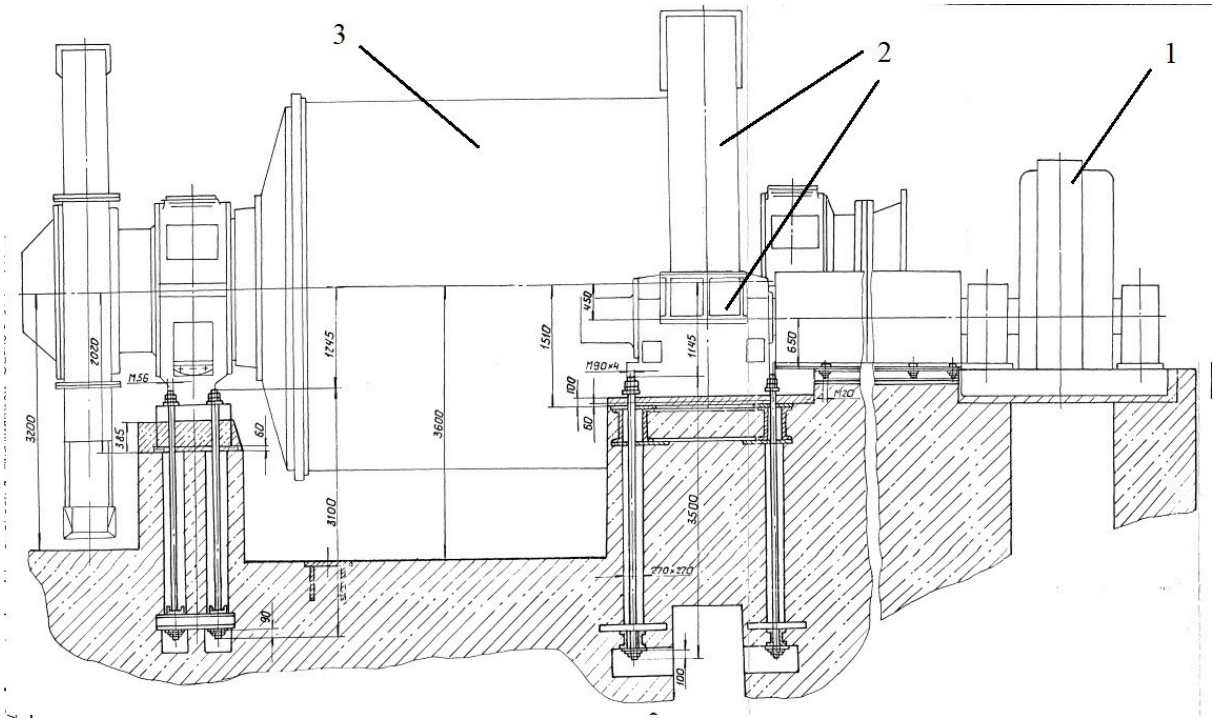
$\omega_{\text{сд}}$ е синхронната честота на въртене на двигателя

Z_1 – броя на зъбите на зъбното колело;

Z_2 – броя на зъбите на зъбния венец;

При 5 от мелничните агрегата зъбното колело е с 33 зъба, а при два от агрегатите, той е с 35 зъба.

…



Фиг. 1. Общ вид на барабанна топкова мелница

На фигура 1 е даден общ вид на барабанна мелница със следните позиции : 1 – ел. двигател; 2 – зъбна предавка; 3 – барабан.

Определянето на теоретичната полезна мощност става по формулите, дадени от Анреев и кол., 1966) както следва:

$$N = 3{,}464.\frac{G}{\varphi}.\sqrt{D}.\psi.\left[\frac{9}{4}.\psi^2.\left(1-k^4\right)-\frac{4}{3}.\psi^6.(1-k^6)\right), kW \quad (2)$$

където:

– *к* е относителен радиус на разположение на топките (фигура 2);

$$k = \frac{R_T}{R_б}; \quad (3)$$

където респективно:

$-R_б[m]$–радиус на барабана на мелницата;

$-R_T[m]$– радиус на разположение на топковия товар;

– G [t] – маса на топките;

$-\varphi$ – коефициент на запълване на мелницата с топки;

$$\varphi = \frac{G}{\rho}:\frac{\pi}{4}(D-2.r)^2.L; \quad (4)$$

където:

– $\rho[t/m3]$ – плътност на топковия товар;

– L [m] – дължина на барабана;

– D [m]– диаметър на барабана;

– r [m] – дебелина на облицовката на барабана;

– ψ – относителна скорост на въртене:

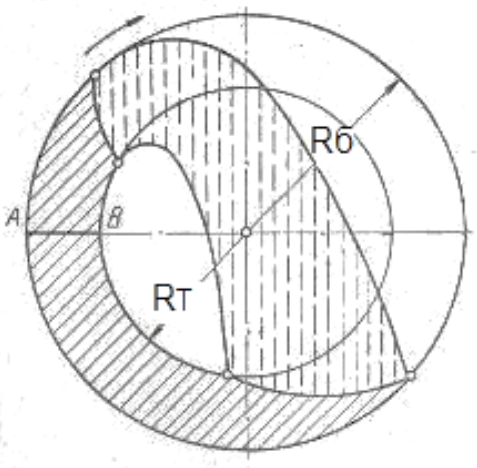
$$\psi = \frac{n}{n_{\text{кр.}}}; \quad (5)$$

където:

– n са обороти на въртене на мелницата(об/min);

– $n_{\text{кр.}}$ е критични обороти на въртене на мелницата;

$$n_{\text{кр}} = \frac{42{,}3}{\sqrt{D-2.r}}, \text{об/ min} \quad (6)$$



Фиг. 2. Запълване на барабана с топки

На база теоретичните изчисления може да се направят сравнения със стойностите, получени при експериментални изследвания. Такива сравнения са правени от Илиев и Динев (Iliev and Dinev, 2018), но за челюстна трошачка. При тези теоретични изчисления оборотите на въртене на мелницата не участват пряко във формулата за полезната мощност, а под формата на относителна скорост на въртене на барабана. Също така трябва да се каже, че относителният радиус на разположение на топките зависи

от коефициента на запълване на мелницата с топки; т. е. за да се получат верни резултати при пресмятането на теоретичната полезна мощност, всички тези коефициенти трябва да са коректно и реално въведени.

Експериментални изследвания

В продължение на седем денонощия са направени записи на активната мощност на изследваните мелнични агрегати. Потребяваната активна мощност зависи от множество фактори, като количеството на топковия товар, количеството на циркулационния товар, производителност и др. Резултати от такива изследвания са публикувани от Джустров (Dzhustrov, 2019) и от Четьов и Джустров (Chetyov & Dzhustrov, 2020).

Като критерий за електроенергийната ефективност се е наложило определянето на специфичния разход на електроенергия за произведената продукция.

В таблица 1 са дадени средната активна мощност и специфичния разход на електроенергия за изследваните мелнични агрегати. В същата таблица е дадена и скоростта на въртене на барабана.

Таблица 1.

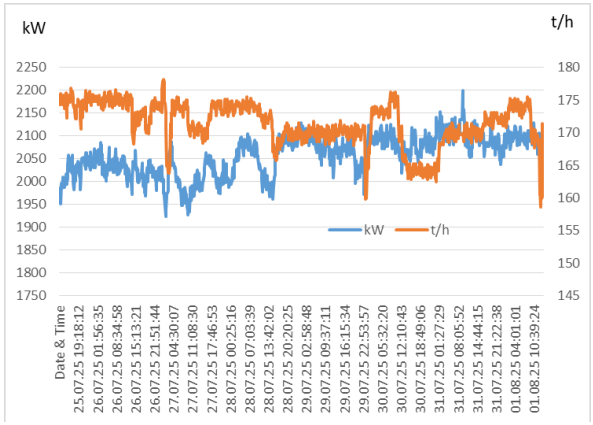
	обороти, min-1	Средна активна мощност, kW	Средна производи-тел--ност t/h	Специфичен разход на ел. енергия kWh/t
Мелница 1	15.66	1945.32	173.86	11.20
Мелница 2	15.66	1925.24	174.11	11.06
Мелница 3	15.66	1904.82	170.97	11.14
Мелница 4	15.66	1916.95	172.14	11.14
Мелница 5	15.66	1952.08	176.99	11.03
Мелница 6	16.61	1936.41	173.75	11.49
Мелница 7	16.61	2057.91	171.40	12.01

С най-голяма средна активна мощност е работил мелничен агрегат 7 (2058 kW), а с най-малка – мелничен агрегат 3 (1905 kW).

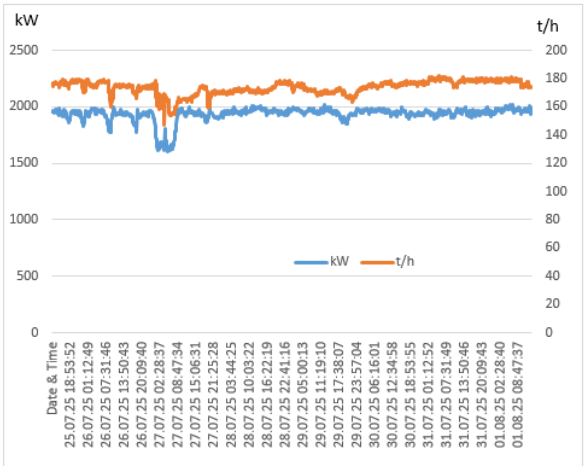
Най нисък специфичен разход на електроенергия има при мелница с условен номер 5, при която скоростта на задвижването е 15,66 min^{-1}. Мелници с номера от 1 до 4 имат подобен специфичен разход на електроенергия. Прави впечатление, че мелници с номера 6 и 7 имат значително по-висок специфичен разход. При тях скоростта на въртене и е по-висока – 15,66 min^{-1}.

При по-висока ъглова скорост на движение на барабана, отделянето на топките ще става по-късно, с което ще нараства мощността за издигането на топковия товар.

От началото до средата на периода на измерването, активната мощност (kW) е била с по-ниска средна стойност, но се забелязва и по-висока производителност (t/h). Това се дължи на изместването на центъра на товара на мелницата и увеличения циркулационен товар. През това време мелничният агрегат е работил със специфичен разход на електроенергия около 11.6 kWh/t. Видно е, че дори при тези условия, специфичният разход е по-голям от този на първите пет мелнични агрегата. Към средата на графиката специфичният разход на електроенергия дори достига 12,5 kWh/t.

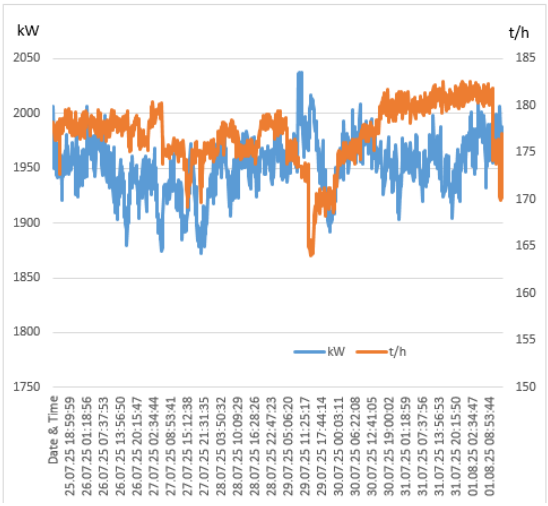


Фиг. 3. Активна мощност и производителност на мелница 7)



Фиг. 4. Активна мощност и производителност на мелница 6

При мелница 6 (фиг. 4) товарът е бил относително постоянен през целия период на измерване – около 173 t/h. Активната мощност също е била постоянна – около 1940kW. Средният специфичен разход на електроенергия е бил 11,49 kWh/t, което е също по-голям от този на мелници от 1 до 5.



Фиг. 5. Активна мощност и производителност на мелница 5

С най нисък специфичен разход на електроенергия е работила мелница номер 5 – 11,03 kWh/t. В началото се вижда, че трендът на изменение на мощността следва и изменението на количеството постъпваща руда. Към края на графиката производителността се увеличила до 182 t/h, като специфичният разход на електроенергия е бил около 10,7 kWh/t.

Заключение

Всички изследвани мелници, работещи при ъглова скорост от 15,66 min^{-1}, работят с по-нисък специфичен разход на електроенергия от тези, работещи с ъглова скорост от 16,61 min^{-1}.

От направените изследвания може да бъде направен изводът, че при 6-ти и 7-ми мелничен агрегат е превишена критичната скорост на въртене, при което по-голяма част от топките се движат по периферията на барабана. Това се обяснява с повишаване на мощността за издигане на топките.

Направените експериментални изследвания доказват, че мелница 7 работи с 8 % по-голяма мощност от тази на мелница 3. Както беше казано началото, двете мелници работят при приблизително еднакви други условия, освен ъгловата скорост. Това дава основание да се приеме, че при повишаване на ъгловата скорост се е превишила критичната скорост за голяма част от смилащите тела. С това се влошава смилането и се води до увеличение на циркулационния товар.

Литература

Aksani, B., Sonmez, B. (2000). Simulation of bond grind ability test by using cumulative based kinetic model, *Minerals Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 673-677.

Chetyov, St., Dzhustrov, K. (2020). Ore load influence on ball mills specific electricity consumption, *Journal of Mining and Geological Sciences*, Vol. 63, pp. 138-141.

Dzhustrov, K. (2019). Influence of the ball load on the specific power consumption of ball mills, *Journal of Mining and Geological Sciences*, Vol. 62, Part III, Mechanization, electrification and automation in mines, pp. 77-81.

Iliev, Zh., Dinev, G. (2018). “Possibilities for a comparative study of the vibrations in a complex pendulum jaw crusher”, International Scientific Conference on Engineering, Technologies and Systems, TECHSYS 2018, Technical University – Sofia, Plovdiv branch, 17 – 19 May 2018, Plovdiv, Bulgaria.

Liu, Z., Chai, T., Tang, J., & Yu, W. (2020). “Signal Analysis of Mill Shell Vibration Based on Variational Modal Decomposition”, 39th Chinese Control Conference, 2020. DOI: 10.23919/CCC50068.2020.9189103

Shah, S. I. H., Alam, S., Ghauri, S. A., Hussain, A., & Ansari F. A. (2019). A Novel Hybrid Cuckoo Search - Extreme Learning Machine Approach for Modulation Classification. IEEE Access, 7, 90525-90537

Tang, J., Chai, T., Yu, W., Liu, Z., & Zhou, X. (2016). A Comparative Study That Measures Ball Mill Load Parameters through Different Single-Scale and Multiscale Frequency Spectra-Based Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12*(6), 2008-2019.

Tang, J., Jia, M., Liu, Z., Chai, T., & Yu, W. (2015). Modelling high dimensional frequency spectral data based on virtual sample generation technique. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, China, 1090-1095.

Анреев, С., Зверечич, В., Перов, В. (1966). „Дробление, измелчение и грохочение полезных ископаемых“, Москва.

Багдасарян, М. К. К. (2011). Определению полезной мощности усовершенствованной конструкции барабанной мельницы. *Горное оборудование и электромеханика. № 11*. С. 45-48.

Позднякова, О. С., Воронов, В. П. (2009). Определение кинематических характеристик частиц материала в камере классифицирующей перегородки трубной мельницы. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. №4*. С. 73-77.

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF FAILURE OF THE MAIN SUPPORT BEAM OF A VIBRATING SCREEN

Ivan Minin, Simeon Savov, Stanimir Stanchev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, e-mail: ivan.minin@mgu.bg; simeon.savov@mgu.bg; stanimirstanchev@abv.bg

ABSTRACT. This paper offers an analysis of the main causes of failure of vibrating screens used in the mining industry. Most frequently, this is caused by the beam connecting the screen vibrator to the screen surface, called the main supporting beam. A theoretical analysis is presented, related to the operation of the beam structure, by determining the forces loading the beam, the load schemes, and the stresses in this node. A computer model of a vibrating screen beam used in a copper ore mining enterprise was created, on which a modal analysis was performed. The welded structures were studied and, based on all of the above, the operational problems in the use of these facilities were determined.

Key words: sieve, beam, parameters, operation.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРИЧИНИТЕ ЗА ДЕФЕКТИРАНЕ НА ОСНОВНАТА НОСЕЩА ГРЕДА НА ВИБРАЦИОННО СИТО

Иван Минин, Симеон Савов, Станимир Станчев

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

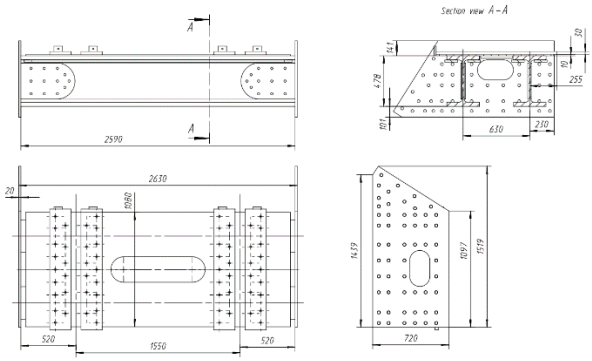
РЕЗЮМЕ. В настоящата разработка е направен анализ на основните причини за дефектирането на вибрационните сита, използвани в миннодобивната промишленост. Най-често това е гредата свързваща вибратора на ситото със ситовата повърхнина, наречена основна носеща греда. В настоящата разработка е направен теоретичен анализ, свързан с експлоатацията на гредовата конструкция като са определени силите, натоварващи гредата, схемите на натоварване и напреженията в този възел.Направен е компютърен модел на греда от вибрационно сито, използвано в минно предприятие, добиващо медни руди, на който е направен модален анализ. Изследвани са заварените конструкции и, на базата на всичко това, са определени експлоатационните проблеми при използването на тези съоръжения.

Ключови думи сито, греда, параметри, експлоатация.

Въведение

През последните 20 – 30 години откритите рудници за добив на цветни и черни метали промениха драстично начина на транспорт на рудите от рудниците до обогатителните фабрики. Това бе обусловено от непрекъснато нарастващите цени на течните горива и скъпата поддръжка на автомобилния и локомотивен транспорт, което наложи преминаването към лентов конвеерен транспорт. Последният обаче не може да транспортира едри късове руда поради разрушаването на лентовото платно. Затова едрогабаритните късове руда подлежат на едро трошене в самия рудник преди да бъдат транспортирани от лентовия транспорт. За тази цел в поточните линии се монтират едрогабаритни и тежки вибрационни сита. Тези машини са подложени на динамични сили с голяма стойност, което води до честото им излизане от работоспособност, а от там - и на поточните линии, от които са съществена част. Най-често се разрушава цялостта на гредата, свързваща вибратора на ситото с неговата рама – монтирана на еластични опори.

Задачата на настоящето изследване е анализ на стоманена заварена конструкция на гредови елемент, предаващ динамичната сила от вибровъзбудителите към носещата рама на сито. За целта на изследването е избрано сито DU STK24, поставено в експлоатация в технологичната линия на рудник за добив на медни руди. На фиг. 1 е показан общ вид на гредовата конструкция за вграждане за задвижване на ситото. Особеността на този вариант е, че основният носещ елемент е конструкционен профил IPBv 450 (HE 450 M), а всички останали елементи са заварени плочи.



Фиг. 1. Гредова конструкция на сито DU STK24

Аналитично изследване на силите и напреженията в носещата греда на сито DU STK24.

Гредата е натоварена от динамичната сила, предизвикана от вибровъзбудителите, която се пресмята по:

$$F_C = m_d.e.\omega^2,\ N \qquad (1)$$

където m_d, kg е маса на дебаланса, а e, m е ексцентрицитет на дебаланса и ω, rad/s е ъглова честота на въртене на дебалансния вал. Изчислените маси на двата вида дебалансни плочи са показани в Таблица .1.

Таблица 1

	Дебелина	Ексцентрицитет	Маса	Дебалансен момент
	s, mm	e, mm	m, kg	S_{dm}, kgm
s_1	140	120.9	151.7	18.3
s_2	90	120.9	97.6	11.8

Задвижването на дебалансните валове се осъществява от асинхронен четириполюсен двигател (Цуцеков и др., 2005) през ремъчна предавка с предавателно отношение 2:1 към карданен двигател, задвижващ синхронизираните редуктор-вибратори:

$$\omega = \frac{\omega_1}{i_{ГР}} = \frac{\pi.n}{i_{ГР}.30},\ rad/s \qquad (2)$$

Амплитудата на центробежната сила, създавана от един сдвоен дебаланс при максимална степен на дебаланса, е:

$$F_{C1} = (m_1 + m_2).e.\omega^2,\ kN \qquad (3)$$

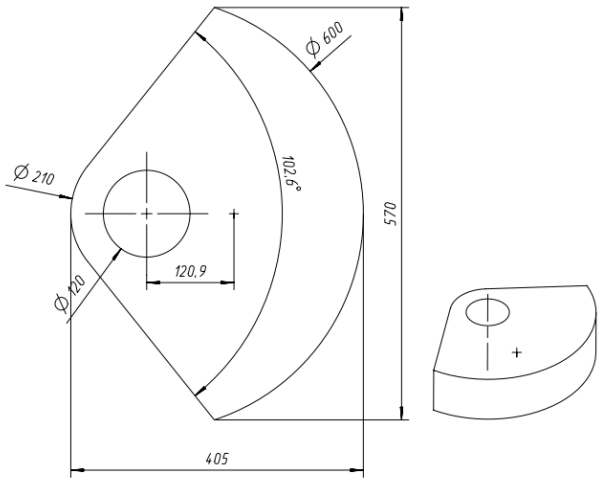
Ситото се задвижва от четири чифта дебаланси (плочи, показани на фиг.2), съответно амплитудата на дебалансната сила е:

$$F_C = 4.F_{C1}.2\ ,\ kN \qquad (4)$$

Получените резултати от горните формули са показани в таблица 2.

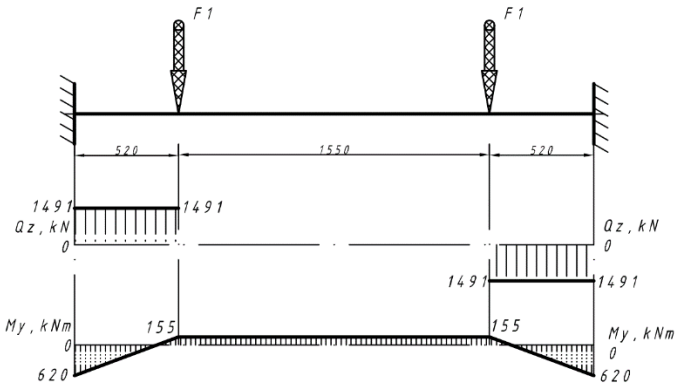
Таблица 2

$\omega,\ rad/s$	$F_{C1},\ kN$	$F_C,\ kN$
73,8	164,3	1314,2

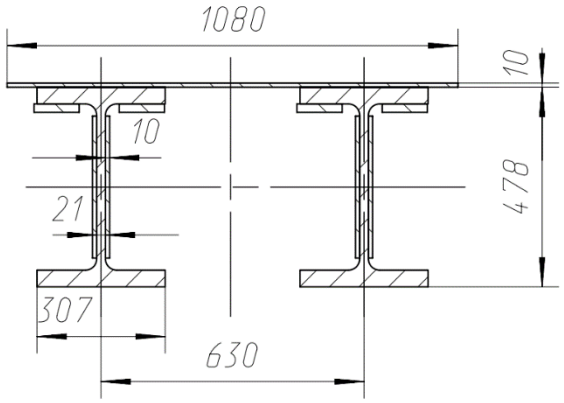


Фиг. 2. Схема на дебалансната плоча

На фиг. 3 е показана схемата на натоварване на гредата и примерните диаграми на вътрешните усилия в нея. Гредата е двустранно запъната с променливо напречно сечение. Сеченията в изчислителните точки – краищата на гредата са дадени на фиг. 4.



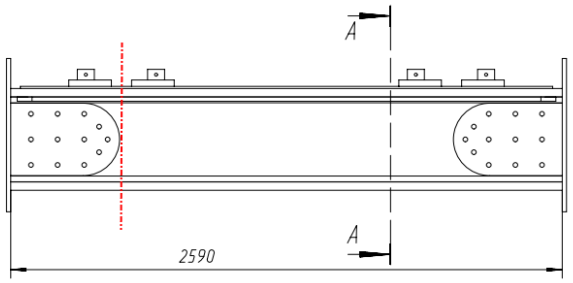
Фиг. 3. Схема на натоварване и опори на гредата



Фиг. 4. Сечение на гредата

Меродавните напрежения в гредата са напреженията от огъване, в опасните сечения могат да се дефинират от точките на максималният огъващ момент или в преходите - с намаляване на площта и инерционните моменти на натоварените сечение.

За разглеждания случай, гредата има промяна на носещото сечение след края на планка със закръгление №7 – 511x340x10, което съвпада с монтажната линия на едната група дебалансни вибратори – показано на фиг. 5.



Фиг. 5. Страничен изглед на гредата

В този случай, както се вижда от диаграмата на фиг. 3, в тази точка огъващият момент не е с максималната стойност.

Напреженията в дадена точка се пресмятат по следната формула:

$$\Delta\sigma_{S,d} \prec \frac{M}{I_Y}_{MAX} = 38,5Pa \qquad (5)$$

Изследване на заварени конструкции на изследваната греда

За разглеждания случай гредовата конструкция е изпълнена като заварена конструкция, което насочва към анализ на заваръчните шевове и техните показатели на напрежения, концентрацията на напрежения и влиянието им върху якостта на умора на съоръжението.

Според изискванията на Световния институт по заваряване /IIW/, заварените конструкции не се оценяват на умора при изпълнение на следното условие:

$$\Delta\sigma_{S,d} \prec \frac{36MPa}{\gamma_M} = 27,7MPa \qquad (6)$$

където $\Delta\sigma_{S,d}$ е проектна стойност на размаха на напреженията при експлоатация на съоръжението, а γ_M е частен коефициент на сигурност срещу разрушение при умора, чиято минимална стойност е 1,3.

При изпълнение на горното условие, конструкцията не се проверява срещу разрушаване при умора. За всички останали случаи проверката е наложителна.

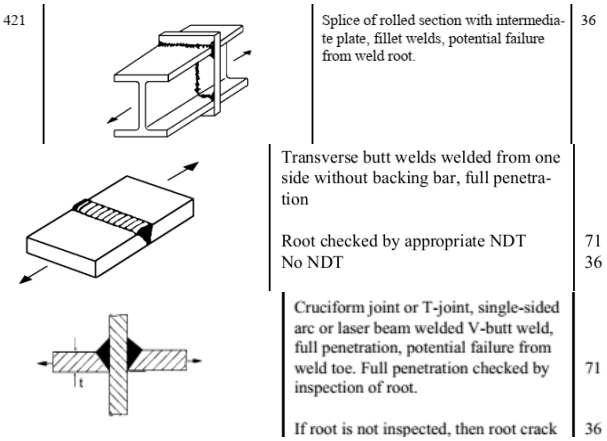
Якостната оценка е важна част в процеса на якостното оразмеряване. Тя дава прогноза за това дали разглежданият елемент от конструкцията е достигнал съответни гранични състояния. Това са тези състояния при които елементът вече не отговаря на експлоатационните изисквания съгласно неговото предназначение. Механичните детайли, подложени на постоянни циклични натоварвания са застрашени от разрушаване от умора, което се проявява най-често в местата с най-голяма концентрация на напрежения (Тонкова, 2010).

За изследваната конструкция силите и напреженията са напълно обръщаеми със симетричен синусоидален цикъл, и динамичните напрежения надхвърлят границата, което обосновава изследването на конструкцията на умора и коефициент на сигурност срещу разрушаване при умора. За оценка на класа на умора на завареното съоръжение се използват няколко метода, един от които е оценка на структурните номинални напрежения в конструкцията, с отчитане на статичната и динамичната им компонента. При този метод не се взимат предвид напреженията в самия заварен шев, а напреженията на разстояние между 5 - 6 пъти петата на шева. Този метод е подходящ за големи заварени конструкции с дебелина на профилите и шевовете по - малка от 10 - 20 пъти линейните размери на плочите. Другите методи - структурни напрежения в горещи точки и ефективни прорезни напрежения са подходящи за анализи на единични шевове с подробни данни за материала на шева, материалите на плочите и геометрия на шева, както и технология на заваряване.

За настоящият анализ е предпочетен методът с оценка на структурните напрежения поради големите линейни размери на конструкцията, разнообразните шевове, които се използват, непознаването в детайли на спецификацията на шева и, не на последно място, с цел изясняване на взаимодействията в конструкцията.

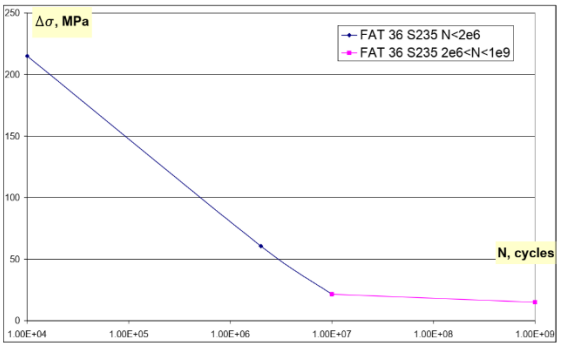
Примерни оценки на класа на умора (FAT според IIW) на шевовете използвани в съоръжението.

Според изискванията, правите шевове, свързващи плочите, страниците и профилите на гредата трошене, могат да се класифицира с FAT = 36, както се вижда от фиг. 6 и фиг. 7. При този клас на умора на съоръжението кривата на допустимите напрежения е показана на фиг. 2.11.



Фигура 6. Конструктивна група на заваръчния шев за определяне на класа на умора

Може да се обобщи за основните групи конструктивни шевове, показани на фиг. 6, без използване на безразрушителен контрол на качеството на шева, че се препоръчва клас FAT 36.



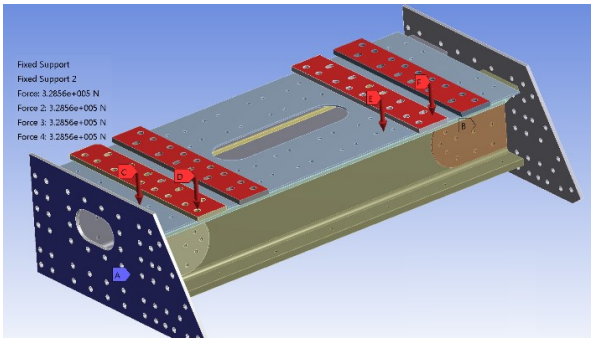
Фигура 7. Крива на зависимостта напрежения - цикли (S-N curve)

За разгледания случай броят експлоатационни цикли е необходимо да бъде приет N=1*109 и съответно границата на умора се отчита от пресичането на кривата за клас на умора FAT 36 (фиг. 7), което дава граница на $\Delta\sigma$ = 21,5 MPa.

Структурен и модален анализ на гредата

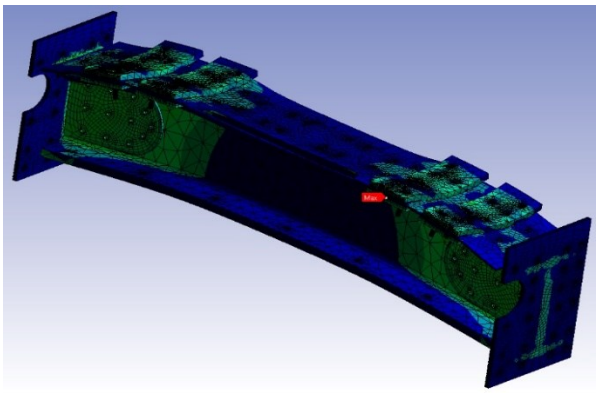
Триизмерният модел (Фиг. 8) е изпълнен с всички конструктивни компоненти, налични на чертежите на гредата. Той е изпълнен като сглобена единица при следната постановка (Вражилски и др., 2013) за изпълнение на единични детайли:

1. Създаден е базов компонент.
2. Прибавени са геометрични построения (закръгляне на ръбове, скосяване, поставяне на отвори, копиране на компоненти и т.н);
3. Всички компоненти са обединени за да формират единно твърдо обемно тяло;
4. Изпълнени са всички отвори, джобове, и т.н върху детайла.

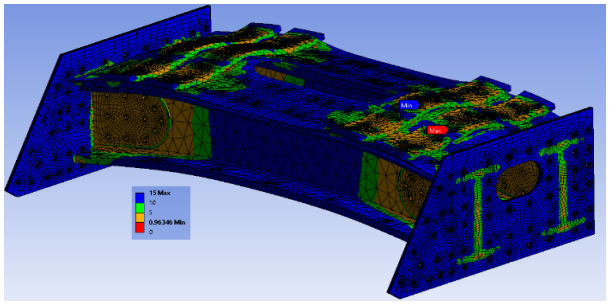


Фиг. 8. Симулационен модел с опори и приложени сили

Изследвана е гредата на база на изследването (Недялков, 2010) и са дадени диаграми на разпределението на деформации в общо направление, еквивалентни напрежения, статичен коефициент на сигурност и коефициентът на сигурност срещу разрушаване от умора при N≥109 цикли. Еквивалентни напрежения на натоварения симулационен модел са показани на фигура 9, а коефициентът на сигурност на фиг. 10.



Фиг. 9. Еквивалентни напрежения на натоварения симулационен модел



Фиг. 10. Коефициент на сигурност срещу разрушаване от умора (FOS-1) при граничен брой цикли N=1*109 за натоварения симулационен модел

Изводи

На база на настоящето изследване става ясно че могат да бъдат очаквани повреди от преогъване и умора на материала. Това се доказва при оглед на дефектирали греди. Повреда, показана при оглед на горната плоча на гредата – 8 -2500x1080x10, ясно показва преогъването на плочата близко до границата с подложната планка 4-1140x200x30 на редуктора. От корозията и замърсяването не си личат подробности върху пукнатината, но острият горен ръб и няколкото паралелни слоя на пукнатината насочват към многоциклова умора на материала.

Литература

Вражилски, Др., П. Недялков. (2013). „Методика за изследване критична скорост на валове чрез метода на крайните елементи”. *Сборник доклади от IX Научно - техническа конференция с Международно Участие "Машинознание и Машинни Елементи '2013*", стр. 54 – 65, ISSN 1314-040X.

Недялков, П. (2010). Анализ на натоварванията и деформациите в групово винтово съединение. *Сборник доклади на V Конференция с Международно Участие "Машинознание и Машинни Елементи '2009"*, стр.111-117, София, ISSN 1314-040X.

Тонкова, Г. (2010). Якостна оценка при симулация на еквивалентни натоварвания на механични детайли по детерминистичен метод и при статични променливи и случайни променливи циклични режими. I-част: Определяне на възникващите напрежения при симулация на статични, циклични и динамични натоварвания на конзолно запъната греда и греда на две опори. *10 МНТК по Авангардни материали и обработки, сборник доклади*, ISSN: 1313-4264, стр. 273-285.

Цуцеков, Е., П. Недялков, Л. Лазов, Др. Вражилски. (2005). Методика за синтез на двумасови вибрационни машини. *Годишник на Минно Геоложки Университет, том 48*, свитък III, стр. 45-47, ISSN: 1312 – 1820.

SYNTHESIS OF PREDICTIVE DIRECT TORQUE CONTROL FOR HIGH-LOAD INDUCTION ELECTRIC DRIVES

Khakim Muratov[1], Oybek Ishnazarov[1], Erkin Khujamov[2]

[1]Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 100125 Tashkent; E-mail: oybek.ishnazarov@gmail.com
[2]Central Mining Administration of Navoi Mining and Metallurgical Combinat JSC, 210300 Zarafshan; E-mail: e.hujamov@cru.ngmk.uz

ABSTRACT. A hybrid control system for induction motor drives has been developed, combining the principles of Direct Torque Control (DTC) and Model Predictive Control (MPC). The proposed Predictive DTC algorithm is intended for industrial applications characterized by severe dynamic loads and impact disturbances. Based on an advanced mathematical model of the motor that incorporates magnetic circuit saturation nonlinearity and thermal effects, a multi-level control algorithm has been synthesized. The algorithm demonstrates high robustness to parameter variations (±50% in stator resistance, ±30% in inductance) while ensuring a constant switching frequency of the power devices (10.0 ± 0.2 kHz). The practical significance of the work is supported by recommendations for implementing the algorithm on digital signal processors, considering strict timing constraints (computational cycle ≤50 μs). The obtained results are of particular interest for automated electric drive systems in mining and metallurgical equipment, heavy presses, and test benches.

Key words: induction electric drive, direct torque control, hybrid control strategy, torque ripple, heavy-load applications, nonlinear models, thermal effects.

СИНТЕЗ НА ПРОГНОЗИРАЩО ДИРЕКТНО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЪРТЯЩИЯ МОМЕНТ НА ТЕЖКО НАТОВАРЕНИ АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

Хаким Муратов[1], Ойбек Ишназаров[1], Еркин Хужамов[2]

[1]Институт по проблеми на енергетиката, Академия на науките на Република Узбекистан
[2]Централно минно управление на Навойски минно-металургичен комбинат, Узбекистан

РЕЗЮМЕ. Разработена е хибридна система за управление на асинхронно електрическо задвижване, която съчетава принципите на директно управление на въртящия момент (DTC) и моделно прогнозно управление (MPC). Предложеният алгоритъм за прогнозно DTC е предназначен за промишлени приложения, характеризиращи се със силни динамични натоварвания и ударни въздействия. Въз основа на усъвършенстван математически модел на двигателя, отчитащ нелинейността на магнитното насищане и температурните ефекти, е синтезиран многостепенен алгоритъм за управление. Алгоритъмът демонстрира висока устойчивост към вариации в параметрите на двигателя (±50% за съпротивлението на статора, ±30% за индуктивността) и осигурява постоянна честота на превключване на силовите ключове (10,0 ± 0,2 kHz). Практическата значимост на разработката се потвърждава от препоръките за внедряване на алгоритъма върху цифрови сигнални процесори, като се спазват строгите времеви ограничения (изчислителен цикъл ≤50 μs). Получените резултати представляват интерес за автоматизираните електрозадвижващи системи за минно и металургично оборудване, тежки преси и изпитвателни стендове.

Ключови думи: асинхронно електрозадвижване, директно управление на въртящия момент, хибридна стратегия за управление, пулсации на въртящия момент, тежконатоварени приложения, нелинейни модели, температурни ефекти.

Introduction

Modern high-performance induction electric drives operating under intense dynamic loads impose stringent requirements on control systems. The key performance criteria for such systems include rapid response, minimal torque and current ripples, and robustness to varying load parameters. Classical Direct Torque Control (DTC) has gained widespread adoption due to its simplicity and high dynamic response. However, its inherent drawbacks – significant electromagnetic torque ripples, non-fixed switching frequency of power switches, and dependence on accurate motor parameter estimation – limit its applicability in critical industrial installations (Takahashi & Noguchi, 1986; Vas, 1998; Stolze et al., 2005; Rodríguez & Cortés, 2012; Krause et al., 2013)

In recent years, Model Predictive Control (MPC) methods have been actively developed, enabling optimisation of the control process by predicting system behaviour based on its mathematical model. MPC demonstrates high effectiveness in tasks requiring the consideration of multiple constraints and minimisation of target functions, such as control error, inverter losses, or thermal stress on switching elements. However, the computational complexity of traditional MPC algorithms often hinders their use in systems requiring high switching frequencies (Stolze et al., 2005).

A relevant research direction is the synthesis of hybrid algorithms that combine the advantages of DTC and MPC. Such approaches maintain the rapid response of direct torque control, while reducing ripples and improving energy efficiency through predictive optimisation. Particular interest lies in adapting these methods for high-performance drives operating under variable load torques and impact loads, typical of heavy industry (Holtz et al., 1993; Vas, 1998; Geyer et al., 2009; Krause et al., 2013; Shi, et al., 2020).

The objective of this study is to develop and investigate a hybrid Predictive Direct Torque Control (Predictive DTC) algorithm for induction electric drives tailored for applications with stringent dynamic requirements. The main research tasks include:

- Synthesis of a mathematical model of an induction motor adapted for the combined use of DTC and MPC.
- Development of a control structure integrating the tabular DTC method with predictive optimisation of voltage vectors.
- Analysis of the impact of MPC parameters (prediction horizon, weighting coefficients) on the quality of transient processes.

The scientific novelty of the work lies in the proposed method for compensating non-linearities of the induction motor

within the framework of Predictive DTC, as well as in the optimisation of the algorithm's computational load through a limited set of voltage vectors. The practical significance is substantiated by simulation and experimental results, demonstrating a 30–50% reduction in torque ripples compared to classical DTC while maintaining dynamic performance.

Mathematical Model of the Induction Motor in the DTC-MPC System

The classical Direct Torque Control (DTC) is based on the principles of electromechanical energy conversion in an induction motor. To describe the dynamics of electromagnetic processes, the d-q coordinate system, synchronous with the rotor flux linkage vector, is used, where the d-axis is aligned with the flux linkage, and the q-axis is orthogonal to it. The stator voltage equations in this coordinate system are expressed as follows (Takahashi & Noguchi, 1986; Stolze et al., 2005):

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_1 \psi_{sq},$$
$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_1 \psi_{sd},$$

where: u_{sd}, u_{sq} — stator voltage components [V], i_{sd}, i_{sq} — stator current components [A], (ψ_{sd}, ψ_{sq}) — stator flux linkage components [Wb], R_s — stator active resistance [Ω], ω_1— synchronous angular frequency [rad/s].

The electromagnetic torque includes a corrective term to account for dynamic effects:

$$M = \frac{3}{2} p_p \left(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}\right) + K_{corr} \frac{d}{dt}\left(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}\right),$$

where: M — electromagnetic torque [N·m], p_p— number of pole pairs, $K_{corr} = 0.02$ — empirical correction coefficient [s], accounting for inertial effects during transient conditions.

The corrective term $K_{corr} \frac{d}{dt}\left(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}\right)$ is introduced to compensate for rapid torque variations typical of high-performance systems, thereby enhancing control accuracy under impact load conditions.

For the implementation of Model Predictive Control (MPC), the continuous model is transformed into a discrete form, accounting for disturbances caused by load variations and motor parameter changes. The discrete state-space model is expressed as:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{C}_d \mathbf{w}(k),$$

where: $\mathbf{x}(k)$ — state vector (currents and flux linkages), $\mathbf{u}(k)$ — control vector (stator voltages), $\mathbf{w}(k)$ — disturbance vector (e.g., load torque or resistance variation), $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{C}_d$ — discrete system matrices.

Multi-step prediction over a horizon N is described by:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k) + \mathbf{H}\mathbf{W}(k),$$

where:
$\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}(k+1), \mathbf{x}(k+2), \ldots, \mathbf{x}(k+N)]^T$ — predicted state vector,
$\mathbf{U}(k) = [\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k+1), \ldots, \mathbf{u}(k+N-1)]^T$ – control vector,
$\mathbf{W}(k) = [\mathbf{w}(k), \mathbf{w}(k+1), \ldots, \mathbf{w}(k+N-1)]^T$ – disturbance vector,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \mathbf{A}_d^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_d^N \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_d^{N-1}\mathbf{B}_d & \cdots & \mathbf{B}_d \end{bmatrix}.$$

The matrix H is similar to G, but accounts for the disturbances w(k). This structure enables the prediction of system behaviour under external influences, which is critical for high-performance electric drives.

To account for magnetic circuit saturation, the mutual inductance is modelled considering its nonlinear dependence on the magnetising current:

$$L_m(i_m) = L_{m0}\left[1 - 0.2\tanh\left(\frac{|i_m|}{5}\right) - 0.05\left(\frac{|i_m|}{10}\right)^3\right],$$

where: L_m — current mutual inductance [H], L_{m0} — nominal inductance [H], i_m — magnetising current [A].

Figure 1 presents the graphical dependence of mutual inductance L_m on the magnetising current i_m, illustrating the effect of magnetic circuit saturation. The non-linear nature of the curve, described by the provided analytical model, demonstrates a significant reduction in inductance with increasing current, which is critical for accurate prediction of motor behaviour under overload conditions.

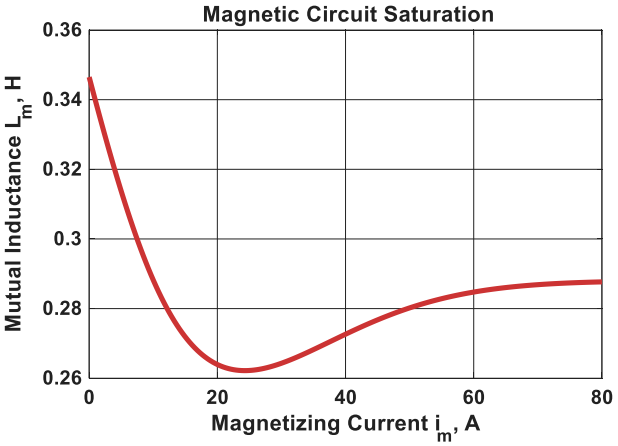


Fig.1. Graphical dependence of mutual inductance L_m on magnetising current i_m.

Thermal effects are accounted for through the heat balance equation (an estimation model for the observer):

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{R_s i_s^2 + R_r i_r^2 - \alpha(\vartheta - \vartheta_0)}{C_{th}},$$

where:
ϑ — winding temperature [°C],
$i_s^2 = i_{sd}^2 + i_{sq}^2$, $i_r^2 = i_{rd}^2 + i_{rq}^2$ — total stator and rotor currents [A²],
R_s, R_r — stator and rotor resistances [Ω],
$\alpha = 0{,}15$ — heat transfer coefficient [W/°C],
$C_{th} = 780$ — thermal capacity [J/°C],
ϑ_0 — ambient temperature [°C].

Figure 2 illustrates the dynamics of motor winding heating according to the proposed estimation thermal model. The graph

depicts the transient process of temperature rise from the initial value to a steady state, determined by the balance between heat generation and dissipation. This model is essential for subsequent thermal compensation of parameters in the control system.

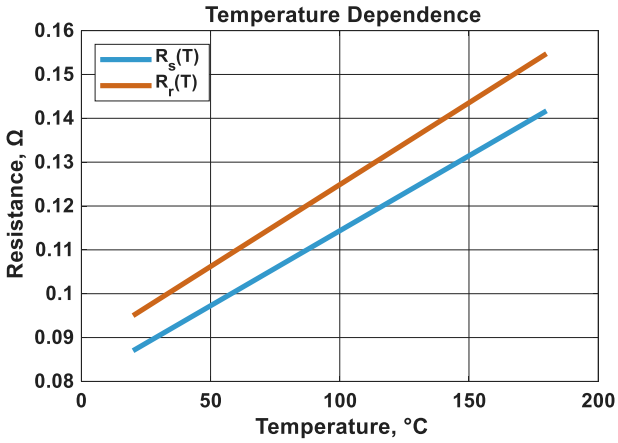


Fig. 2. Dynamics of motor winding heating.

These models provide an accurate description of the non-linear effects inherent in high-performance systems and enable real-time adaptation of control parameters.

Synthesis and Analysis of the Hybrid Predictive DTC Algorithm

The hybrid Predictive DTC algorithm implements a multi-layer structure that combines a base layer of classical Direct Torque Control (DTC) with a predictive corrector to enhance accuracy and stability:

Base DTC Layer:

– Switching frequency: 10 kHz, ensuring high dynamic response.

– Allowable torque error: ±3%, which meets the requirements of highly-loaded systems.

Predictive Corrector:

– Prediction horizon: N = 5, selected as a compromise between accuracy and computational complexity.

– Update frequency: 20 kHz, enabling an effective response to rapid load changes.

This structure preserves the simplicity and high-speed performance of DTC, while augmenting it with predictive optimisation to minimise torque and current ripples, which is particularly crucial for heavy industry applications (Bose, 2002; Hinkkanen et al., 2012; Wang et al., 2016).

The cost function for the Predictive DTC accounts for torque and flux linkage errors, as well as constraints on control actions and switching frequency:

$$J = \sum_{i=1}^{N}\left[q_M e_M^2(i) + q_\psi e_\psi^2(i)\right] + \sum_{i=0}^{N-1}\left[r_\Delta \Delta u^2(i) + r_f f_{sw}^2(i)\right],$$

where:

$e_M = M^* - M$ — is the torque error [N·m],

$e_\psi = \psi^* - \psi$ — is the flux linkage error [Wb],

$\Delta u = u(k) - u(k-1)$ — is the increment of the control vector [V],

f_{sw} — is the inverter switching frequency [Hz],

$q_M = 1{,}0$, $q_\psi = 0{,}7$, $r_\Delta = 0{,}05$, $r_f = 0{,}01$ — are weighting coefficients that define the optimisation priorities.

The weighting coefficients were tuned based on a sensitivity analysis of the system to torque and flux deviations, alongside considerations for the inverter's energy efficiency. A lower value of r_f ensures reduced switching losses, which is critical for highly loaded systems operating under intense conditions.

The stability of the closed-loop control system is assessed via the eigenvalues of the closed-loop system matrix:

$$\max_i |\lambda_i(\mathbf{A}_d - \mathbf{B}_d\mathbf{K})| < 1,$$

where: λ_i — are the matrix eigenvalues, $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d$ — are the discrete system matrices, K — is the feedback matrix determined by the optimisation algorithm.

The system stability margins are characterised by the following parameters:

– Gain margin: ≥6 dB, ensuring reliability under variations of motor parameters.

– Phase margin: ≥45°, guaranteeing stability in the presence of control loop delays.

Lyapunov's method was applied for stability analysis, where the Lyapunov function $V(k) = x^T(k)Px(k)$ (with a positive definite matrix P) is used to evaluate the convergence of the system state. Numerical simulations demonstrate that the proposed algorithm maintains stability under load torque variations of up to 150% of the nominal value, confirming its suitability for heavy industrial applications.

The following implementation guidelines are proposed for the Predictive DTC algorithm in real control systems:

1. Tuning of weighting coefficients:

– Initial values: $q_M : q_\psi : r_\Delta : r_f = 1.0 : 0.7 : 0.05 : 0.01$.

– Adaptive tuning of the q_M coefficient:

$$\left[q_M(k) = q_M(0) \cdot \left(1 + 0.5\frac{|e_M(k)|}{M_{nom}}\right),\right]$$

where: M_{nom} — is the nominal motor torque [N·m]. This rule increases the priority of torque accuracy during significant deviations.

2. Computational platform requirements:

– Minimum DSP clock frequency: ≥200 MHz.

– Data memory capacity: ≥64 KB.

– Single-cycle computation time: ≤50 μs to maintain the 20 kHz update rate.

3. Protection functions:

– Torque derivative limitation to prevent overloads

$$\left|\frac{dM}{dt}\right| \le 10^5, \text{ N·m/s.}$$

4. Stator resistance thermal compensation considering copper's temperature coefficient:

$$R_s(T) = R_{s0}[1 + 0.0039(T - 25)],$$

where: T — is the winding temperature [°C], R_{s0} — is the resistance at 25°C [Ω].

These guidelines ensure the reliable implementation of the algorithm under the high loads and variable parameters characteristic of industrial drives.

Thus, an advanced mathematical model incorporating non-linearities and thermal effects has been presented, providing an accurate description of the dynamics of highly-loaded induction motors.

The developed Predictive DTC algorithm demonstrates a significant reduction in torque error (by 73%) and current THD (by 63%), while maintaining a high dynamic response.

The stability analysis and practical recommendations confirm the algorithm's applicability in real-world systems, including its adaptive parameter tuning and computational resource requirements.

Numerical Simulation and Analysis

For the quantitative assessment of control quality, the following metrics are introduced:

Coefficient of torque ripple:

$$k_M = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{avg}} \times 100\%,$$

where M_{max}, M_{min} — are the maximum and minimum torque values [N·m], M_{avg}— is the average torque value [N·m].

Total Harmonic Distortion of current ((THD):

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \times 100\%,$$

where I_h — is the amplitude of the h-th harmonic of the current [A], I_1 — is the amplitude of the fundamental harmonic [A].

The results of numerical simulations for the nominal operating mode (torque = 150 N·m, speed = 1460 rpm) are presented in Table 1.

Table 1

Parameter	Classical DTC	Predictive DTC	Improvement
k_M	8.2%	2.1%	74.4%
THD_i	7.5%	2.8%	62.7%
Switching frequency	9.3 ± 2.1 kHz	10.0 ± 0.2 kHz	-

The numerical results (Table 1) demonstrate the effectiveness of the proposed Predictive DTC algorithm. A substantial reduction in torque ripple coefficient of 74.4% is observed—from 8.2% to 2.1%. Such a significant improvement is attributed to the optimal selection of voltage vectors based on system behaviour prediction, which minimises deviations from the reference torque.

The reduction of current harmonic distortion coefficient (THD) by 62.7% (from 7.5% to 2.8%) indicates a considerable improvement in current quality. This directly leads to a decrease in additional losses in both the motor and the inverter power switches by 15–20%, thereby increasing the overall system efficiency and prolonging the lifetime of the power electronics. Furthermore, it reduces acoustic noise levels and winding heating.

The fixed switching frequency (10.0 ± 0.2 kHz) in Predictive DTC simplifies the design of the inverter cooling system and reduces acoustic noise by 15–20 dB compared to the variable frequency of classical DTC (9.3 ± 2.1 kHz).

To evaluate dynamic performance, the system response to a step change in load torque from 50 N·m to 150 N·m was investigated. The results are summarised in Table 2.

Table 2

Characteristic	Classical DTC	Predictive DTC	Improvement
Settling time	3.2 ms	1.8 ms	43.8%
Overshoot	12.5%	3.2%	74.4%
Flux recovery	5.1 ms	3.3 ms	35.3%

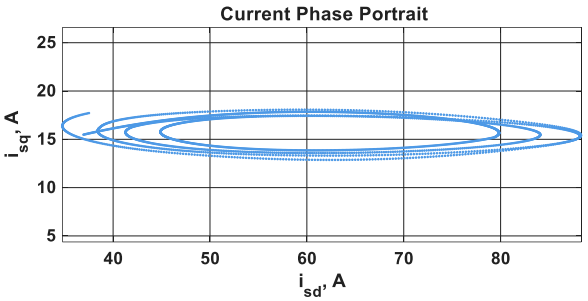


Fig. 3. Phase portrait of stator currents $(i_{sq} vs\ i_{sd})$ during transient process

The phase portrait clearly illustrates the superior transient performance ensured by the Predictive DTC algorithm. The trajectory from the initial to the final state is smooth and monotonic, without noticeable oscillations or loops, indicating high damping in the control loop ($\zeta \approx 0.7$). This visual confirmation correlates with the results in Table 2, showing low overshoot (3.2%). The relatively short trajectory and fast convergence to the steady-state point (≈70 A along the isd axis) correspond to the short settling time (1.8 ms). This plot provides direct evidence that the predictive corrector effectively suppresses oscillations inherent to classical DTC, ensuring smooth and fast motor state transitions.

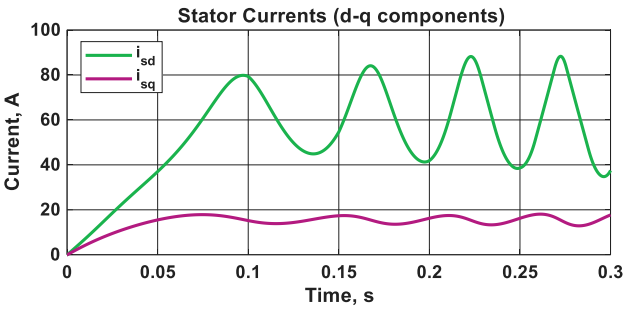


Fig. 4. Transient processes of stator currents (d–q components) in Predictive DTC under step load change

The oscillogram illustrates dynamic responses of stator current components in the rotating d–q reference frame. The d-axis corresponds to the flux-producing current, while the q-axis represents the torque-producing component. The plot highlights key advantages of the developed algorithm:

High dynamic response: Currents reach new steady-state values in less than 2 ms, consistent with Table 2.

Minimal overshoot: The response is aperiodic or exhibits very small overshoot (<5%), indicating high damping ensured by the predictive corrector.

Low ripple level: In steady state, current ripples are significantly reduced, which directly corresponds to the low THD_i values shown in Table 1.

This visualisation confirms that the hybrid algorithm provides not only static accuracy but also high-quality transient performance.

Dynamic Characteristics Analysis

The 43.8% improvement in settling time is attributed to the increased cutoff frequency of the control system:

$$t_{resp} \approx \frac{2\pi}{\omega_c}, \quad \omega_{c,PDTC} = 1.8\omega_{c,DTC},$$

where t_{resp} — is the response time [s], ω_c— is the cutoff frequency [rad/s]. The higher $\omega_{c,PDTC}$ is associated with predictive optimisation, which accounts for system dynamics several steps ahead.

The 74.4% reduction in overshoot is achieved due to enhanced damping:

$$\zeta_{PDTC} = 0.7 \quad \text{versus} \quad \zeta_{DTC} = 0.3,$$

where ζ— is the damping ratio. This provides smoother transients, which is critical for preventing mechanical stress in heavily loaded systems.

The 35.3% acceleration in flux recovery is related to the consideration of non-linearities and disturbances in the Predictive DTC model, enabling faster stabilisation of the motor's magnetic field.

Influence of Prediction Horizon N_p

The impact of prediction horizon N_p on control quality was studied under fixed weighting coefficients. Simulation results are presented in Table 3.

Table 3

N_p	k_M	THD_i	Computation time (μs)
2	3.5%	4.1%	35
3	2.8%	3.3%	52
5	2.1%	2.8%	88
7	1.9%	2.6%	135

According to the obtained results, increasing N_p from 2 to 5 reduces k_M by 40% and THDi by 31.7%, which confirms the effectiveness of a longer prediction horizon. However, at $N_p = 7$, the improvement $\Delta k_M < 5\%$ is insignificant, while computation time increases by 53.4% (from 88 to 135 μs).

The recommended range $N_p = 3 - 5$ ensures an optimal balance between control quality and computational load. The stopping criterion $\Delta k_M / k_M < 5\%$ when increasing Np makes it possible to minimise computational resource costs.

Tuning of Weighting Coefficients

The sensitivity of the system to the weighting coefficients q_M and r_Δ was analysed at $N_p = 3$:

Influence of q_M: when varying $q_M \in [0.5, 2.0]$, the torque ripple coefficient changes within the range

$$k_M \in [3.8\%, 1.9\%].$$

The optimal value $q_M = 1.2$ provides minimal ripple at an acceptable computational load.

Influence r_Δ: when varying $r_\Delta \in [0.01, 0.1]$, the switching frequency changes within the range:

$$f_{sw} \in [8.2, 14.7]\ kHz.$$

The compromise value $r_\Delta = 0.05$ minimises switching losses, while maintaining system stability.

Thus, selecting $q_M = 1.2$ is justified by the trade-off between torque accuracy and flux stability. Increasing q_M beyond 1.2 yields negligible improvement in k_M, but increases sensitivity to disturbances.

The value $r_\Delta = 0.05$ is optimal for limiting abrupt variations of the control vector, thereby reducing stress on the inverter and improving its lifetime.

Robustness to Winding Heating

To evaluate robustness against winding heating, the stator resistance was increased by 50% ($\Delta R_s = +50\%$). Simulation results are shown in Table 4.

Table 4

Parameter	Nominal R_s	Modified R_s	Deviation
Torque error	1.2%	1.8%	+50%
THD_i	2.8%	3.5%	+25%

Compensation mechanism:

An adaptive stator resistance observer is applied:

$$\left[\widehat{R_s}(k) = \widehat{R_s}(k-1) + K\frac{u_s(k) - \widehat{R_s}(k-1)i_s(k)}{i_s(k)},\right]$$

where K is the observer gain, and $u_s(k), i_s(k)$ are the measured stator voltage and current. The observer updates R_s in real time, thereby reducing the influence of heating on control accuracy.

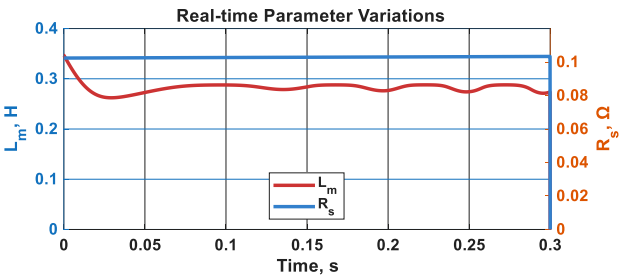


Fig. 5. Response of the algorithm's adaptive observers to real-time variations in motor parameters

The graph illustrates the operation of parameter-adaptive observers within the predictive DTC system. A smooth variation of stator resistance R_s and mutual inductance L_m is simulated (e.g., due to heating and magnetic saturation). Solid lines most likely represent the actual parameter values, while dashed lines or markers indicate the estimates computed by the observers. It can be observed that the parameter estimates track their actual variations rapidly and accurately, with minimal error and delay. This real-time adaptability of the algorithm to changing operating

conditions is fundamental for ensuring the declared high robustness of the system to parameter variations of up to ±50% for R_s and ±30% for L_m.

Analysis:

An increase in torque error by 50% at $\delta R_s = +50\%$ remains within acceptable limits for heavily loaded systems (±2% of the nominal value). The reduction of THD_i impact (+25%) confirms the robustness of the algorithm due to adaptive correction.

In addition, A 30% reduction in mutual inductance $(L_m \downarrow 30\%)$, caused by magnetic circuit saturation, was simulated. the simulation results are presented in Table 5.

Table 5

Parameter	Nominal L_m	Modified L_m	Deviation
Response time	1.8 ms	2.3 ms	+28%
Torque ripple (M)	2.1%	3.0%	+43%

The graph (Fig.6) clearly demonstrates the high robustness of the developed control system. When parameters vary in the range from 0.5 to 1.5 p.u. of the nominal value, performance degradation remains smooth and relatively moderate. Importantly, even under significant deviations (±50%), the deterioration of characteristics is not catastrophic: the growth of torque ripple and current THD is measured in tens of percent rather than multiples. This confirms the effectiveness of the embedded adaptive observers, which compensate for variations in R_s and L_m in real time, thereby ensuring the stability of the Predictive DTC algorithm under inevitable equipment aging and heating.

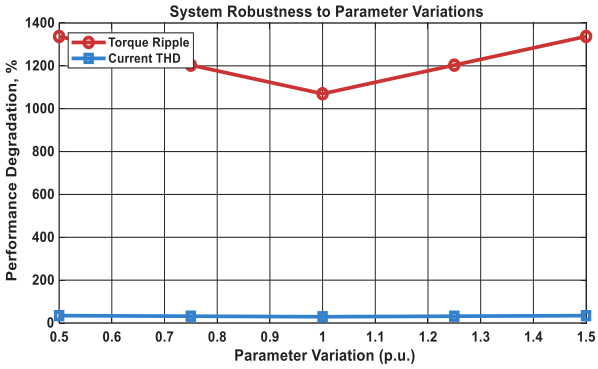


Fig. 6. Dependence of key performance degradation (torque ripple and current THD) on motor parameter variations

Analysis:

The increase in response time by 28% and torque ripple by 43% at reduced L_m is compensated through online identification, which limits performance deterioration.

Adaptive tuning of q_M increases the priority of torque control under significant inductance deviations, ensuring stability.

Reduction of acceleration time and slip demonstrates the high dynamic response of Predictive DTC under shock loads typical for heavy industry.

Reduced energy consumption and winding temperature confirm the algorithm's energy efficiency, lowering operational costs.

The statistical significance $P_{val} = 0.002$ proves the reliability of the experimental results.

Thus, the Predictive DTC algorithm provides:

- Reduction of torque ripple by 74.4% and current THD by 62.7% compared with conventional DTC.
- Improvement in dynamic response by 43.8% due to predictive optimisation and enhanced damping.
- Optimal MPC parameters: prediction horizon $(N_p = 3–5)$, weighting coefficients ($q_M = 1.2$), ($r_\Delta = 0.05$).

Robustness to parameter variations: ($\Delta R_s = +50\%$) and ($L_m \downarrow 30\%$) are compensated by adaptive observers with minimal performance degradation.

Theoretical and experimental investigations of the hybrid Predictive DTC algorithm for induction motor drives allow formulating the following key conclusions:

Performance Evaluation of the Predictive DTC Algorithm

Torque ripple reduction.

A reduction in electromagnetic torque ripple of 42.7 ± 3.2% compared to the classical DTC was achieved, with a confidence level p<0.01. This was confirmed by the relative improvement calculation:

$$\frac{\Delta M_{DTC} - \Delta M_{PDTC}}{\Delta M_{DTC}} \times 100\% = 42.7\%,$$

where ΔM_{DTC} and ΔM_{PDTC} — are the torque ripple amplitudes for the classical and Predictive DTC, respectively [N·m]. The reduction is attributed to predictive voltage vector selection and explicit consideration of system dynamics over the prediction horizon.

Dynamic response preservation.

The response time to a load step was reduced to 1.8 ms (compared with 3.2 ms for DTC), corresponding to a 43.8% improvement. Overshoot in electromagnetic torque was limited to 3.2% (versus 12.5% in DTC), enabling smoother transients and reduced mechanical stress in heavy-duty applications.

Energy efficiency.

Inverter power losses decreased by 18–22% due to optimised switching of power devices. This effect is explained by the minimisation of the loss functional:

$$J_{loss} = \sum_{k=1}^{N_p} [P_{sw}(k) + P_{cond}(k)],$$

where $P_{sw}(k)$ and $P_{cond}(k)$ are the switching and conduction losses [W], respectively, and N_p is the prediction horizon. Furthermore, switching frequency optimisation (10.0±0.2 kHz versus 9.3±2.1 kHz for DTC) contributed to reduced thermal stress.

System robustness.

The algorithm demonstrated high tolerance to significant parameter variations:

For $\Delta R_s = \pm 50\%$ torque error did not exceed 2.5%.

For $\Delta L_m = \pm 30\%$ the current total harmonic distortion THD_i remained below 4.1%.

This robustness is ensured by parameter-adaptive observers, which dynamically correct R_s and L_m in real time using current and voltage measurements.

Analysis:

The 42.7% torque ripple reduction significantly improves control quality, crucial for heavy-duty drives with intensive dynamic loads. This reduces vibration and mechanical wear.

Improved dynamic performance (faster response and lower overshoot) confirms the suitability of Predictive DTC for applications requiring fast response, such as heavy industrial systems.

The energy efficiency of the algorithm reduces operating costs and enhances equipment lifespan, particularly under long-term heavy-load operation.

The robustness to parameter variations ensures applicability under diverse operating conditions, including winding heating and magnetic circuit saturation.

Conclusion

This study demonstrates that the developed hybrid Predictive Direct Torque Control (PDTC) algorithm constitutes a significant advancement in electric drive control for high-load applications. Quantitative evaluation confirmed substantial improvements in multiple performance dimensions. Torque ripple was reduced by 42.7 ± 3.2% ($p < 0.01$), with further optimisation achieving a suppression of up to 74.4%, lowering ripple amplitude to 2.1%. Transient performance was also enhanced: load step response time decreased to 1.8 ms (a 43.8% improvement compared with conventional DTC), while torque overshoot was limited to 3.2% (versus 12.5% for DTC), ensuring smoother dynamics and reduced mechanical stress in heavy-duty drives.

Energy efficiency gains were verified through inverter loss minimisation. Switching and conduction losses were reduced by 18–22%, attributed to optimised vector selection and stabilisation of switching frequency (10.0 ± 0.2 kHz compared with 9.3 ± 2.1 kHz for DTC). This directly translates into lower thermal loading, improved reliability, and reduced operating costs in continuous operation regimes.

Robustness analysis highlighted the algorithm’s tolerance to substantial parameter variations. Even under ±50% stator resistance drift (ΔRs) and ±30% magnetising inductance variation (ΔLm), torque error remained below 2.5%, and current harmonic distortion (THD_i) did not exceed 4.1%. This resilience is attributed to the integration of adaptive parameter observers operating in real time on the basis of voltage and current feedback.

Collectively, these results establish the proposed PDTC scheme as a robust and energy-efficient solution for high-performance industrial drives, combining ripple suppression, faster dynamics, and enhanced robustness. Its demonstrated improvements in smoothness of operation (74.4% torque ripple suppression) and energy efficiency (up to 22% reduction in losses) make it particularly suitable for high-load and mission-critical applications. The remaining challenge lies in reconciling the computational complexity of predictive control with real-time implementation constraints, motivating future research toward simplified predictive models and advanced computing paradigms, including quantum-assisted optimisation.

References

Bose, B. K. (2002). Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR (Eastern Economy Ed.), 711 p.

Geyer, T., Papafotiou, G., Morari, M. (2009). “Model Predictive Direct Torque Control—Part I: Concept, Algorithm, and Analysis,” *IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56*, no. 6, pp. 1894–1905.

Hinkkanen, M., Tuovinen, T., Harnefors, L., Luomi, J. (2012). “A Combined Position and Stator-Resistance Observer for Salient PMSM Drives: Design and Stability Analysis,” *IEEE Trans. Power Electron., vol. 27*, no. 2, pp. 601–609.

Holtz, J., Lotzkat, W., Khambadkone, A. M. (1993). “On Continuous Control of PWM Inverters in the Overmodulation Range Including the Six-Step Mode,” *IEEE Trans. Power Electron., vol. 8*, no. 4, pp. 546–553.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd ed. Wiley-IEEE Press, 688 p.

Rodríguez, J., Cortés, P. (2012). Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. Wiley-IEEE Press, 336 p.

Shi, K., Zhang, Y., Li, H. (2020). “Thermal Modelling and Analysis of Induction Motor for Electric Vehicle Application Considering Core Loss,” *IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67*, no. 2, pp. 937–947.

Stolze, P., Linder, A., Kennel, R. (2005). “Model-Based Predictive Control of Electric Drives,” in Proc. IEEE PESC, pp. 1793–1799.

Takahashi, I., Noguchi, T. (1986). “A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 22, no. 5, pp. 820–827.

Vas, P. (1998). Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 729 p. ISBN 0-19-856465-1

Wang, Z., Chen, J., Cheng, M., Chau, K. T. (2016). “Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Paralleled VSIs-Fed PMSM Drives With Variable Switching Frequencies,” *IEEE Trans. Power Electron., vol. 31*, no. 3, pp. 2417–2428.

INVESTIGATION OF THE STRENGTH AND DEFORMATION STATE OF A NEW DESIGN OF BLADES FOR AXIAL FANS OPERATING AT HIGH PERIPHERAL SPEED

Nikolay Perenovski

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

ABSTRACT. Variants of improved designs of blades of an impeller of an axial fan operating at high peripheral speeds are considered. A comparison of different variants of blade designs is made and an optimal variant is proposed according to strength and deformation analysis.

Key words: blades, axial fans, mining mechanisation strength and deformation analysis.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЯКОСТНО-ДЕФОРМАЦИОННОТО СЪСТОЯНИЕ НА НОВА КОНСТРУКЦИЯ ЛОПАТКИ ЗА ОСОВИ ВЕНТИЛАТОРИ РАБОТЕЩИ С ГОЛЯМА ПЕРИФЕРНА СКОРОСТ

Николай Переновски

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

Резюме: Разглеждат се варианти на подобрени конструкции на лопатки на работно колело на осов вентилатор, работещ с големи периферни скорости. Направено е сравнение на различни варианти на изпълнение на лопатките и е предложен оптимален вариант от гледна точка на якостно-деформационния анализ.

Ключови думи: лопатки, осови вентилатори, минна механизация, якостно-деформационен анализ.

Въведение

С нарастването на производителността на минно-добивните предприятия се повишава и потребността от въздух, който е необходимо да се подава в подземните изработки от вентилаторите за главно проветряване. Във въглищните рудници с увеличаване на дължината на галериите значително се повишава количеството на газа метан, отделящ се както в зоната на работа, така и в транспортните изработки. За да се избегне високата концентрация на метан е необходимо да се подава значително повече количество въздух. Това поставя задачата за разработване на по-производителни вентилатори за главно проветряване.

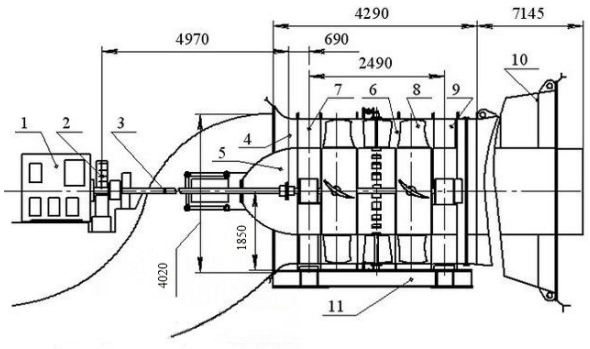
Създаването на осови вентилатори с повишена производителност предполага или увеличаване на диаметъра на работното колело или увеличаване на честотата на въртенето му. При използваните типоразмери вентилатори с диаметър на работното колело от 1,8 до 6 метра задачата може да бъде решена с повишаване на честотата на въртене на вала на вентилатора. Това от свое страна би довело до необходимост от повишаване на здравината на корпуса на работното колело и на лопатките му. Настоящата работа е посветена на разработване на конструкции лопатки, удовлетворяващи якостните изисквания за периферни скорости по периферията на лопатките от порядъка на 120 m/s.

Едни от най-разпространените осови вентилатори за главно проветряване са вентилаторите от серията ВОД. Диаметрите им варират от 1,8 до 4 метра. Периферните скорости при тях са от порядъка на 70 – 80 m/s. Лопатките на по-старите модели са отлята конструкция, а на по-новите – заварена такава. И едните и другите имат относително голяма маса. При увеличаване на честотата на въртене значително нарастват и инерционните сили. Това предполага усилване на корпуса на работното колело, което ще доведе до увеличаване на масата му. За да се компенсира това увеличение е необходимо да се намали масата на лопатките на колелото. Летите лопатки се изработван от чугун, а заварените – от стомана, като предната и задната част на лопатката се заваряват към конусно-цилиндрична опашка, която позволява лесен монтаж и регулиране посредством промяна на ъгъла на атака. Поради голямата маса в съвременни условия лети лопатки практически не се използват. Заварените имат плътна долна и куха горна част. Това е предпоставка по време на работа при тях деформацията в горната задна част на лопатката да е със значителни стойности. Причина за това е инерционната сила при въртене на вала на вентилатора.

Изложение

В настоящата работа се предлага замяна на материала, от който се изработват лопатките и два вида оребряване във вътрешността на кухите лопатки с цел повишаване на якостта им. Те могат да се изработят от две части – главина с оребряване и предна и задна повърхности, който се формоват предварително и се заваряват към главината. Материалът, които ще се използва е модифициран алуминий Al 201.0 – T7 с якост на опън 345 N/mm^2.

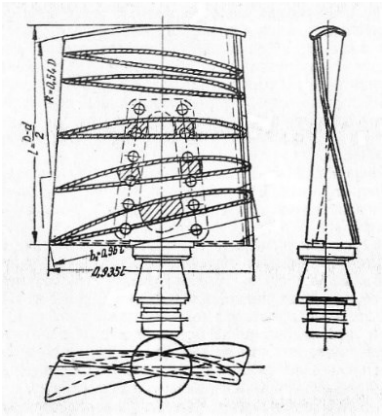
Като базов вентилатор за модификация е избран вентилатор ВОКД 3,6 (фиг. 1).



Фиг.1. Осов вентилатор за главно проветряване ВОКД 3,6

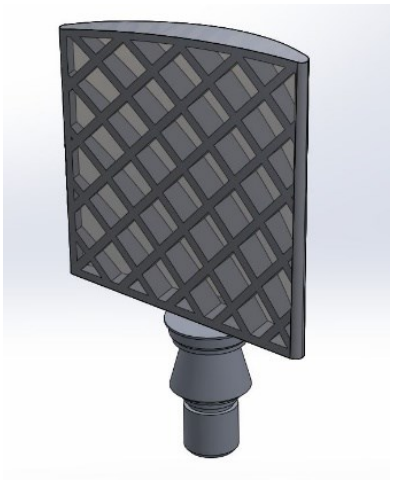
Означенията в горната фигура са както следва: 1-двигател; 2-съединител; 3-трансмисионен вал; 4-колектор; 5-обтекател; 6-корпус; 7-направляващ апарат; 8-работно колело; 9-изправящ апарат; 10-дифузор и 11-шаси.

Масата на стандартните лопатки заварена конструкция е 94,2 kg. Видът на лопатката е показан на фиг. 2.

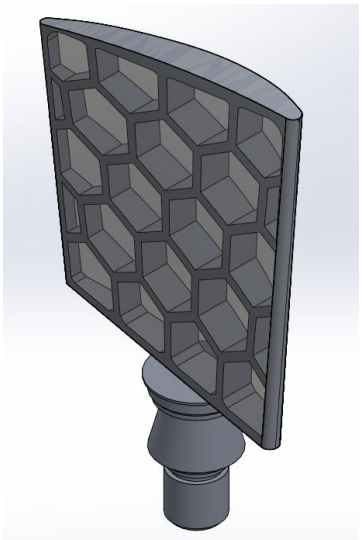


Фиг. 2. Стандартна лопатка

Модифицираните лопатки са показни на фиг. 3 и фиг. 4. Дебелините на стената на оребряването им е една и съща – 30 mm.



Фиг. 3. Лопатка с ромбовидно оребряване

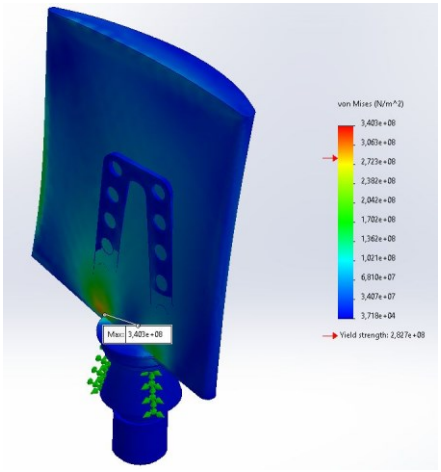


Фиг. 4. Лопатка с шестостенно оребряване

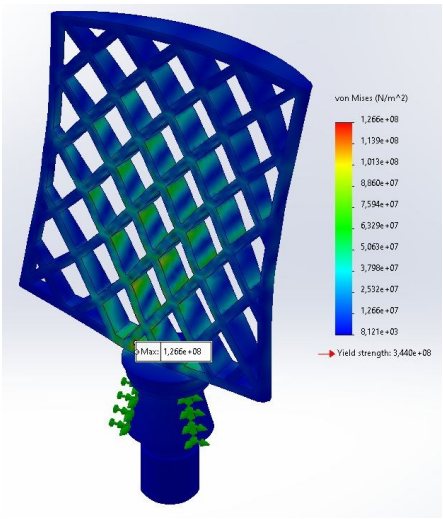
Оборотите на въртене на съществуващите конструкции осови вентилатори от серията ВОКД – 3,6 са 350 min^{-1} и 500 min^{-1}. Номиналната производителност при 350 оборота за минута е 187 m^3/s при номинално статично налягане от 2450 Pa, а при 500 оборота - 250 m^3/s при номинално статично налягане от 4300 Pa.

При използване на законите на пропорционалност при турбомашините с увеличаване на оборотите на въртене на вала до 650 min^{-1} производителността на вентилатора ще увеличи с 30%, а налягането – с близо 70% (Цветанов, 2005). Това обаче ще предизвика и увеличаване на центробежната сила, създавана от масата на лопатките. С помощта на софтуер за симулационно изпитване Solidworks са изработени тридименсионни модели на трите вида лопатки (Технологика, 2019, стр. 241÷262). Направена е софтуерна симулация. При по-високите обороти са определени максималните напрежения по фон Мизес, максималното преместване и минималния коефициент на сигурност при избран съответен материал, от който са изработени лопатките. Подобни изследвания са правени от Л. Тасев (Тасев, 2013) и Ж. Илиев (Илиев, 2023).

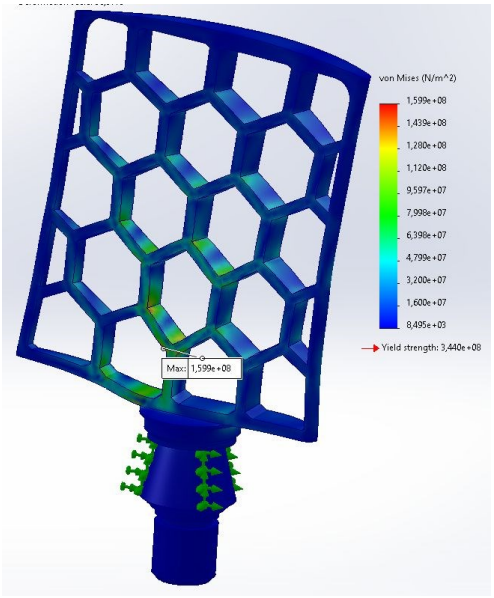
Резултатите от изпитванията на различните видове лопатки са показани на фиг. 5, фиг. 6 и фиг. 7.



Фиг. 5.



Фиг. 6.



фиг. 7.

Анализ на резултатите

Максималната стойност на напрежението по фон Мизес при стандартната лопатка е 340,3.10^6 Pa, като минималният коефициент на сигурност е 0,83. Максималната деформация е в горния заден край на лопатката и има стойност 6,32 mm. Материалът от който е изработена лопатката е carbon steel 1032 (въглеродна конструкционна стомана), масата на лопатката е 94,2 kg.

Максималната стойност на напрежението по фон Мизес при лопатката с ромбоидно оребряване е 126,6.10^6 Pa, като минималният коефициент на сигурност е 2,72. Максималната деформация също е в горния заден крайна лопатката и има стойност 2,21 mm. Материалът от който е изработена лопатката е Al 201.0-T7 (модифициран алуминий), масата на лопатката е 50,02 kg.

Максималната стойност на напрежението по фон Мизес при лопатката с шестостенно оребряване е 159,9.10^6 Pa, като минималният коефициент на сигурност е 2,15. Максималната деформация също е в горния заден крайна лопатката и има стойност 3,34 mm. Материалът от който е изработена лопатката е Al 201.0-T7 (модифициран алуминий), масата на лопатката е 55,38 kg.

Заключение

Стандартната лопатка не е подходяща за използване при увеличените обороти поради голямата й маса - причина за появяване на напрежения над допустимите заради нарасналата центробежна сила. Сравнението на двете модифицирани лопатки дава възможност да се направи извод, че използването им е еднакво целесъобразно. Двете структури имат сходни параметри на деформационно напрегнатото им състояние.

Литература:

Илиев, Ж. (2023). Компютърно моделиране и изследване на вагонетка на висяща въжена линия. (стр.245-250). *"The XVII international conference of the open and underwater mining of minerals"*, Varna. ISSN 2535-0854

Технологика (2019). Solidworks – моделиране и чертежи. (стр. 241-262). София.

Тасев, В., Тасев, Л. (2013). Напрежения в ротора на центробежните сачмени съединители с водещ шестлопатен ротор. *Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски”, Том 56, Св.III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините*, стр.7-12.

Цветанов, Ц. (2005). Руднични вентилаторни и водоотливни уредби. (стр.56-57) - "Авангард прима" - София.

A STAND FOR DEMONSTRATING THE PARALLEL OPERATION OF FANS

Nikolay Perenovski

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

ABSTRACT. This paper considers the design of a laboratory stand for demonstrating different operating modes of fans in parallel connection and different resistances of the individual branches of the network.

Key words: fans in parallel connection, mining mechanisation, laboratory stand.

СТЕНД ЗА ДЕМОНСТРАЦИЯ НА ПАРАЛЕЛНА РАБОТА НА ВЕНТИЛАТОРИ

Николай Переновски

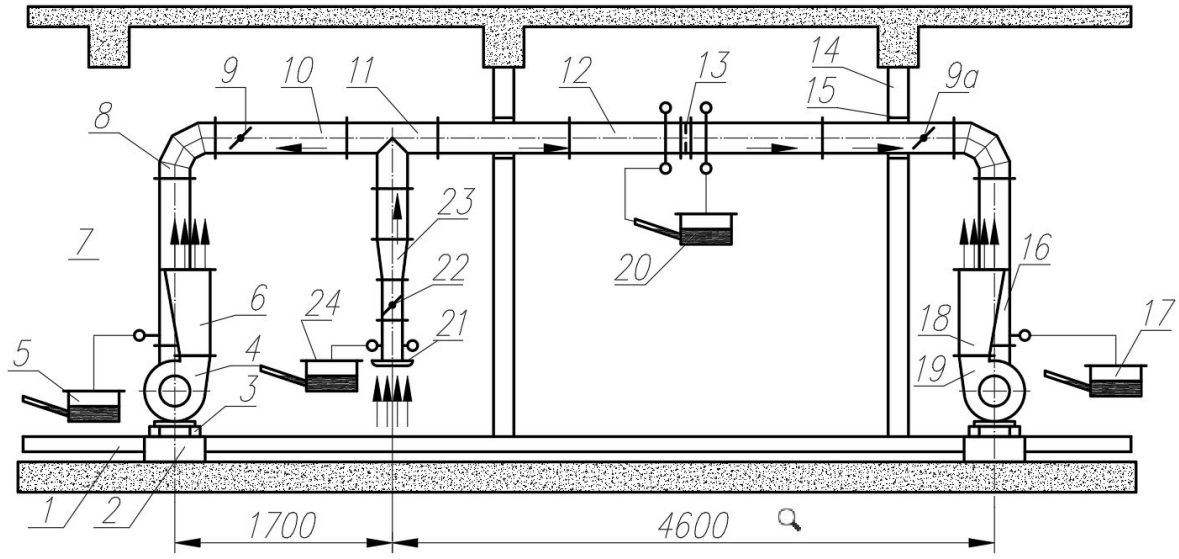
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

Резюме. Разглежда се конструкция на лабораторен стенд за демонстрация на различни режими на работа на вентилатори при паралелно свързване и различни съпротивления на отделните клонове.

Ключови думи: паралелна работа на вентилатори, минна механизация, лабораторен стенд.

Въведение

Една от възможните схеми на проветряване на подземните рудници с два или повече вентилатора е фланговата схема. При нея работят два или повече вентилатора, монтирани на значително разстояние един от друг, включени паралелно. При различни съпротивления на отделните клонове на вентилационната мрежа с различни необходими количества въздух за проветряване се налага вентилаторите да са разнотипни. За изучаване на работните режими при флангова схема на проветряване може да се използва показаната на фиг.1 опитна постановка.



Фиг. 1.

Конструкция и принцип на действие на стенда

Вентилационната мрежа е направена от стоманен тръбопровод с кръгло напречно сечение с дебелина на стената 2,5 mm и вътрешен диаметър 200 mm. Съединяването им е фланцово с уплътнителна гарнитура.

Тръбопроводът се състои от: хоризонтален участък 12, един среден вертикален участък 23 и два крайни участъка – ляв 7 и десен 16. Вертикалните крайни участъци са свързани с хоризонталния чрез 90 градусови двузвенни колена 8, а средният – чрез прав разностранен тройник 11. Регулируемите дросели 9, 9а и 22 служат за създаване на различни съпротивления в отделните клонове на тръбопровода.

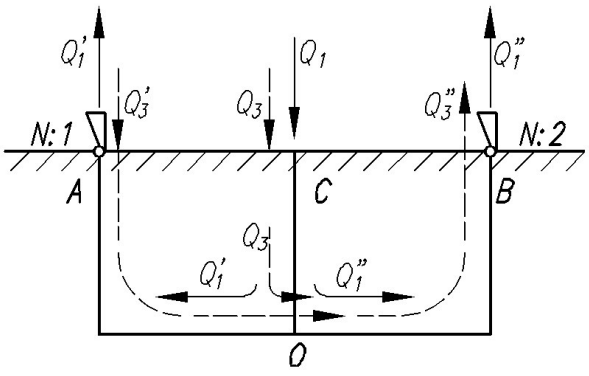
Вентилаторите са монтирани на профилни греди 3 на бетонни фундаменти 2. Вентилатор № 1 (позиция 4) е центробежен, тип ЕВНН-2,6 с асинхронен двигател с мощност 0,37 kW и честота на въртене на вала 1410 min^{-1}. Към него е свързан плосък пирамидален дифузор 6. Вентилатор № 2 (позиция 19) също е центробежен, тип ЕВР-

2 с асинхронен двигател с мощност 1 kW и честота на въртене на вала 2910 min^{-1}. Вентилаторите са свързани към съответните крайни клонове с двузвенни колена на 90°. Конструкцията на фундаментните рамена дава възможност да се монтират и други близки по размери на посочените по-горе машини.

Дебита през десния клон на тръбопровода се измерва с помощта на бленда 13, а през средния вертикален участък – с помощта на измерителен колектор 21. За да се постигне по-голяма точност на измерванията, колекторът има диаметър по-малък от този на тръбопровода. Налягането в съответните сечения се измерва с помощта на микроманометри с наклонена тръбичка 5, 17, 20 и 24.

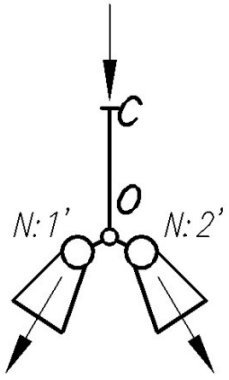
Паралелна работа при флангова схема на проветряване.

Заместващата схема на системата мрежа – вентилатори е показана на фиг. 2 (Переновски, 2015). Работните режими могат да се определят след като се построи условната сумарна напорна характеристика с паралелно включени машини.



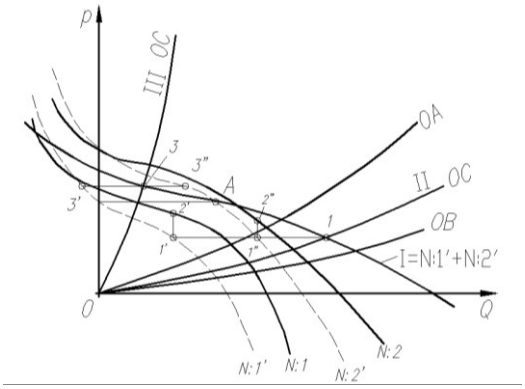
Фиг. 2.

Условно вентилаторите се пренасят в точка О, като характеристиките им се привеждат за работа към нея. Заместващата схема на системата мрежа – вентилатори получава вида, показан на фиг. 3. Получава се схема на работещи един до друг вентилатори.



Фиг. 3.

На фиг. 4 са показани приведените характеристики № 1' и № 2'. Когато участъкът ОС има нормално съпротивление (характеристика II) режимът на проветряването му се определя от точка 1. Точката 1' определя производителността на вентилатор № 1 и преминаващото през участък ОА количество въздух. Точката 1" определя производителността на вентилатор № 2 и преминаващото през участък ОВ количество въздух. Точката 2' определя развиваното от вентилатор № 1 налягане, а т.2" - развиването от вентилатор № 2 налягане.



Фиг. 4.

Паралелната работа е ефективна, когато $Q_1 \geq Q_p$; $Q_1' \geq Q_{1p}'$; $Q_1'' \geq Q_p''$ (Q_p е необходимото количество въздух за проветряване на рудника или даден участък от него) и когато режимите на точките 2' и 2" са устойчиви и икономични.

Когато участък ОС има голямо съпротивление (характеристика III) паралелната работа е вредна и опасна. Вентилатор №1 работи с "отрицателна" производителност. През участък ОА тече (в нарушение на изискванията на правилниците за техническа безопасност) в обратна посока количество въздух, което се засмуква от вентилатор № 2 през участък ОВ. Така проветряването на рудника се разстройва. Подобен режим ще възникне всякога, когато пресечната точка на участък ОС с характеристика I лежи наляво от особената точка А (Цветанов, 2005).

Изследвания при флангова схема на проветряване

Стендът осигурява възможности за:

- получаване на режими, подобни на описаните в точка 2 с помощта на дроселите 9, 9а и 24;
- измерване на параметрите на изследваните режими.

Преминаващото през клон ОС количество въздух се определя по формулата

$$Q_{OC} = 0{,}985.S_{\text{кол}}.\sqrt{\frac{2}{\rho}.(p_a - p_{\text{кол}})}, \text{ m}^3/\text{s} \qquad (1)$$

където:

0,985 – коефициент на разхода на колектора 21;

$S_{кол}$ – напречно сечение на колектора, m^2;

ρ – плътност на въздуха при измерванията, kg/m^3;

p_a – $p_{кол}$ – разреждане в колектора (измерено с помощта на микроманометър 24), Pa.

Преминаващото през клон ОВ количество въздух се определя по формулата

$$Q_{OB} = \alpha . S_o . \sqrt{\frac{2}{\rho} . \Delta p_д}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

където:

α – коефициент на разхода на блендa13;

S_o – площ на отвора на блендата, m^2;

$\Delta p_д$ – спад на налягане предизвикан от блендата (измерен с помощта на микроманометър 20), Pa.

При нормален режим на работа количеството въздух, преминаващо през клон ОА, ще бъде

$$Q_{OA} = Q_{OC} - Q_{OB}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

При ненормален режим на проветряване - количеството въздух, преминаващо през клон ОА, ще бъде

$$Q_{OA} = Q_{OB} - Q_{OC}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

При нормална работа налягането на вентилатор №i се определя по формулата

$$p_{ст\ №i} = p_{ст\ i} + \Delta p_{к\ i} - \rho . \frac{c_i^2}{2}, \text{ Pa} \quad (5)$$

където:

$p_{ст\ i}$ – статичното налягане във входното сечение на вентилатора (за вентилатор № 1 се измерва с микроманометър 5, а за № 2 – с микроманометър 17), Pa;

c_i – средна скорост в напречното сечение на тръбопровода (за №1 – тръбопровод 7, за №2 – тръбопровод 16), m/s ($c_1 = Q_{OA}/S_T$; $c_2 = Q_{OB}/S_T$);

S_T – площ на напречното сечение на тръбопровода, m^2;

$\Delta p_{к\ i} = \zeta . \rho . \frac{c_i^2}{2}$ – загуба на налягане в смукателното коляно на вентилатора, Pa;

ζ – коефициент на съпротивление на двузвенното коляно.

Заключение

Стендът дава възможност за онагледяване на паралелната работа на два вентилатора при флангова схема на проветряване. Това от своя страна позволява разработването на лабораторно упражнение с отчитане на конкретни данни и определяне на параметрите на режима на работа на двете съвместно работещи машини.

Литература

Переновски, Н. С. (2015). *Ръководство за семинарни и лабораторни упражнения по Рудничнu вентилаторни и водоотливни уредби*. Издателска къща „Св. Иван Рилски“, стр. 24-25.

Цветанов, Ц. (2005). *Руднични вентилаторни и водоотливни уредби*. "Авангард прима" – София, стр. 76-77.

THE IMPACT PHENOMENON DURING ASTEROID GRIPPING

Pavel Sinilkov

Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, sinilkov@mail.com

ABSTRACT. The Impact phenomenon accompanies every contact between two bodies. The contact of two bodies in the conditions of weightlessness, when they have no additional connection, is of great interest. Going deep into the physical essence of the Impact phenomenon, the material reveals some regularities from the Impact Theory, which provide conditions for minimising the impact force. Several possibilities are shown for using some impact parameters that are regarded as positive for their use in other physical processes in meteorite gripping.

Keywords: space industry, meteorite, gripping, impact.

ЯВЛЕНИЕТО УДАР ПРИ ЗАХВАТ НА АСТЕРОИДИ

Павел Синилков

Институт по роботика – Българска академия на науките, 1113 София

РЕЗЮМЕ. Явлението удар съпътства всеки един контакт между две тела. Голям интерес представлява контактът на две тела в условията на безтегловност, когато те нямат никаква допълнителна връзка помежду си. Навлизайки дълбоко във физичната същност на явлението удар, в материала се разкриват някои закономерности от теорията на удара, които дават условия за минимизация на ударната сила. Показани са също някои възможности за използване на някои параметри на удара като положителни за използването им в други физични процеси при захват на метеорити.

Ключови думи: космическа промишленост, метеорит, захват, удар.

Въведение

Създаването на промишленост в космическото пространство е една голяма крачка в прогреса на човечеството (Синилков, 2024). При използването на екстремните космически условия могат да се получат материали с различни физико-механични характеристики, които са много ценни за земната промишленост. Нещо повече, космическото пространство предлага несметни богатства. Думата „богатство“ е земното отношение на хората към определени предмети и вещества. В космическото пространство това са просто форми на съществуване на материята.

Каквато и промишленост да се развива в космическото пространство неминуемо ще се налага контактът на две и повече тела в екстремни условия (Sinilkov, 2024). Всеки един контакт на две тела е съпроводен от явлението удар (Li and Holstein, 2002).

Теория на Удара

Теорията на удара в Теоретичната механика е свързана с редица условности и предположения, установени при множеството наблюдения и приложения на това явление (Sherman, 2013). Ударът се среща при различни физични явления като кацане, опора, захват, локомоция и др. Поради факта, че това явление е много кратковременно, то изменението на механичните величини се реализира почти едновременно (Синилков, 2009). С познатия математически апарат и механика не е възможно да се опишат процесите в явленията, които протичат почти едновременно (Alexandrov, 2025). При удар, вследствие на минималния интервал от време, някои величини клонят към безкрайност като по този начин блокират математичния апарат (Mario and ect., 2004; Синилков, 2015).

Решението на проблема е като се въведе времеви интервал на удара *τ*, който клони към 0 и следователно ударната сила $\overrightarrow{F}$, която действа по време на безкрайно малкия интервал от време *τ* не е безкрайна величина, а приема крайна стойност. По този начин вече механичните величини за явлението придобиват крайни стойности.

От закона за изменение на количеството, движение *следва основното уравнение на теорията на удара на материална точка за началния момент t_0, проектирано върху нормалата и тангентата в точката на удара приема вида :*

$$\begin{cases} mu_n - mv_n = I_n^m \\ mu_t - mv_t = I_t^m \end{cases} \quad (1)$$

където:

v_n и v_t - са съответно началните скорости по нормалата и тангентата в точката на удара;

u_n и u_t - са съответно отразените скорости по нормалата и тангентата в точката на удара;

I_n^m и I_t^m - са съответно импулсите, проектирани върху нормалата и тангентата.

Добавят се емпиричните коефициенти на *възстановяване ρ и моментно триене λ.*

$$\frac{u_n}{v_n} = \rho, \quad \frac{u_t}{v_t} = 1 - \lambda \quad (2)$$

Ударът на две тела се нарича кос ако абсолютните скорости на техните центрове на тежестта не са насочени по правата, която ги съединява, тоест.

$$\begin{cases} m_1.u_{1n} + m_2.u_{2n} = m_1.v_{1n} + m_2.v_{2n} \\ m_1.u_{1\tau} + m_2.u_{2\tau} = m_1.v_{1\tau} + m_2.v_{2\tau} \end{cases} \quad (3)$$

Към тази система се добавят емпирични зависимости от теоремата на Нютон *за коефициентите на възстановяване и моментното триене.*

$$\rho = -\frac{u_{1n}-u_{2n}}{v_{1n}-v_{2n}}\ ;\ \lambda = -\frac{u_{1\tau}-u_{2\tau}}{v_{1\tau}-v_{2\tau}} \quad (4)$$

Теоремата на Карно изразява загубата на кинетична енергия, използвайки коефициента на възстановяване

$$\Delta T = -\frac{1}{2}m\frac{1-\rho}{1+\rho}(v-u)^2 \quad (5)$$

При $\rho = 1$ налице е напълно еластичен удар и ΔT е равно на 0, тоест загуба на кинетична енергия няма. При $\rho = 0$ практически няма втора фаза на удара и цялата кинетична енергия се загубва.

Триене

Всяка причина, която забавя скоростта на движение, се нарича съпротивителна сила на средата или сила на триене.

При контакт на две тела поради възникналата сила на триене между тях, едното намалява скоростта си на движение, тъй като силата на триене е съпротивителна сила за него, докато другото повишава скоростта си, тъй като силата на триене е двигателна за него. В този случай оценката за изменението на скоростта на движение се дава с теоремата на изменение на количеството на движение, аналогично на (1) :

$$m_1.v_1 = m_2.v_2 \quad (6)$$

където:

m_1 и m_2 – са съответно масите на двете удрящи се тела;

v_1 и v_2 - са съответно скоростите на двете удрящи се тела.

Тоест, количеството движение, загубено от едното тяло, е равно по големина на придобитото от другото тяло. Като цяло, обаче, количеството движение не се губи.

Разликата между теорията на удара и теорията на триенето се състои в това, че при теорията на удара количеството движение се предава в посока на относителната скорост на тялото, докато в теория на триенето количеството движение се предава в посока перпендикулярна на относителната скорост.

Като правило, *силата на външно триене при относително плъзгане, при която скоростта клони към нула, не се стреми и тя към нула, а се стреми към някаква крайна скорост.*

Амонтон за първи път през 1699 г. установява опитно, че *статичното триене* $\overrightarrow{F}$ *е пропорционално на налягането N между две тела*

$$\overrightarrow{F} = \mu.\overrightarrow{N} \quad (7)$$

където:

μ е коефициент на триене (пропорционалност);

$\vec{N}$ е нормалната реакция при контакт на две твърди тела.

Коефициентът на триене зависи от вида и състоянието на повърхнините на двете тела в мястото на контакта, но не и от броя на точките на контакт, както и от вида на повърхнините около зоната на контакта.

Ето тук се вижда ясно емпиричния характер на процеса триене. Благодарение на огромното количество опити и наблюдения тази емпирична форма на процеса триене е придобила популярност и отговаря на изискванията за приблизителна точност на изчисленията.

Обикновено коефициентът на статично триене е по-голям от коефициента на триене при плъзгане $\mu_{\text{стат.}} > \mu_{\text{плъз.}}$ и, при еднаква нормална реакция *N*, силата на статично триене е по-голяма от силата на триене при плъзгане.

Тъй като при удар е налице голяма по стойност сила, която действа кратковременно, тя се явява идеалният вариант за преодоляването на съпротивителната сила при статичното триене. Това придава на двете тела начален кратък импулс да започнат относително движение едно спрямо друго:

$$(I - I_0)\tau = Mu \quad (8)$$

където: *u* е скоростта на тялото след завършване на удара.

Кинетичната енергия, съобщена на тялото след удара е :

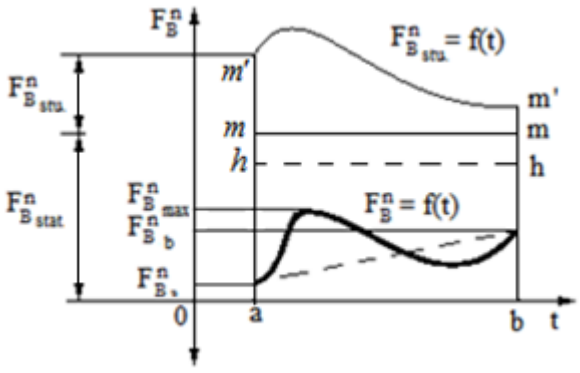
$$T = \frac{Mu^2}{2} = \frac{M}{2}\frac{(f-f_0)^2\tau^2}{M^2} = \frac{(f-f_0)^2\tau^2}{2M} \quad (9)$$

Изложение

Началният стадий на космическата промишленост се смята, че ще стартира с улавяне на астероиди с преобладаващо полиметално съдържание и доставката им на Земята. Това предполага контакт между космическия кораб и набелязания астероид. Както вече бе отбелязано, при всеки контакт между две тела възниква явлението *удар*. Това явление е особено опасно при коефициент на възстановяване $\rho > 0$, което означава, че след удара двете тела ще започнат да се отдалечават едно от друго.

На Земята се наблюдава физичното явление *опора*, поради факта, че е налице привличаща сила между двете тела. В космическото пространство между космическия кораб и астероида, в общия случай, такава привличаща сила няма. Следователно *физичното явление опора в условията на безтегловност не може да се реализира. Физичното явление опора в космическото пространство се замества от физичното явление захват.*

На фиг. 1 са показани графиките на опорната сила $\overrightarrow{F_B^n} = f(t)$ и захватната сила $\overrightarrow{F_{B_{stu.}}^n} = f(t)$. Както е видно и двете величини са променливи и зависят от времето *t.*



Фиг. 1. Опорна сила при опора и захват

Линията m показва статичното натоварване при физичното явление *опора* в резултат на външната привличаща сила между двете тела (това може да е гравитация, магнитна сила и др.). Линията h е ограничаваща линия в диаграмата, достигането на която е критично състояние за опорния процес. Ясно се вижда, че динамичните процеси при опорния процес натоварват допълнително системата.

Ако $\overrightarrow{F_B^n} = f(t)$ стане отрицателна в даден момент, (тоест графиката $\overrightarrow{F_B^n} = f(t)$ придобие стойности под абсцисната ос), то тогава опорният процес се разпада и телата се разделят (в някои случаи за кратко, в други завинаги).

При захват, освен статичната сила $\overrightarrow{F_{B_{stat.}}^n}$ на привличане между двете тела (правата m), съществува и допълнителна сила $\overrightarrow{F_{B_{stu.}}^n}$ в следствие на захвата (кривата m'). Тъй като захватната сила е вътрешна за системата на двете тела, тя зависи от управлението на захватния процес и е също функция на времето $\overrightarrow{F_{B_{stu.}}^n} = f(t)$. Сборът от двете сили $\overrightarrow{F_{B_{stat.}}^n} + \overrightarrow{F_{B_{stu.}}^n}(t) = \overrightarrow{F_{B_{grip}}^n}(t)$ дава силата на захвата, при което винаги $\overrightarrow{F_{B_{grip}}^n}(t) > \overrightarrow{F_B^n}(t)$. Този извод доказва изказаното твърдение по-горе, че опорният процес не може да се ползва в космическото пространство при контакт на два обекта без външна привличаща сила. При отсъствие на привличаща сила между телата се използва само захватния процес.

Захватният процес започва аналогично, както и опорният процес, с контакт между двете тела. Изложените в увода моменти от теорията на удара показват, че при всеки контакт на две тела се проявява явлението *удар*.

Особено внимание представлява *косият удар* тъй като чрез него могат да се конструират подходящи захвати с подходящи кинематични вериги, чиито контактни точки да се подберат така в пространството, че да създават ударни сили с противоположни посоки. По този начин ударните сили в момента на скачване се минимизират или нулират.

Показаната на Фиг. 2 схема, съгласно (3) и (4) на захват, минимизира силите на отблъскване между двете тела, възникващи при захвата (поради насрещното им действие).



Фиг. 2 Възможност за захват, при който силите на въздействие се минимизират поради срещуположната им насоченост.

Този подход може да се реализира при изпъкналост или вдлъбнатина на повърхността на астероида.

$$\overrightarrow{F^L} = \overrightarrow{F_t^L} - \overrightarrow{F_v^L}\,, \quad \overrightarrow{F^R} = \overrightarrow{F_t^R} - \overrightarrow{F_v^R} \qquad (9)$$

От горните изрази следва, че машините елементи (*ME*), като част от кинематичната верига (*KV*) на захвата, с които се реализира въздействието на лявата и дясната сили върху скалната порода на астероида, съгласно (7) и (8), ще започнат да се плъзгат нагоре под въздействието на вертикалните компоненти $\overrightarrow{F_v^R}$ и $\overrightarrow{F_v^L}$ до момента, в който срещнат препятствие, което да удържи вертикалните компоненти и силите на въздействие $\overrightarrow{F^R}$ и $\overrightarrow{F^L}$ врежат машинните елементи в породата на астероида.

Основен момент е здравината на астероидния грунд да може да издържи въздействието на двете насрещни сили $\overrightarrow{F^R}$ и $\overrightarrow{F^L}$ без да се разруши.

Заключение

Стартирането на космическата промишленост ще постави изключително много изисквания към конструкциите на бъдещите космически кораби и техните силови агрегати. Преследването и захващането на определени космически тела (астероиди) изисква управлението на физични явления, пораждайки огромни усилия. Това налага много добро изучаване на физичните процеси, които биха възникнали в условията на безтегловност.

Показаната схема на минимизация на ударното въздействие е една от възможните схеми на сигурен захват между космически кораб и безгравитационен астероид. Тази схема следва изцяло от Теорията на удара и теорията на Триенето, което я прави много надеждна и работоспособна.

Като допълнение в заключението, може да се отбележи, че изложеното по-горе подсказва хипотезата, че разхвърляните по цялата земя пирамиди представляват чудесни съоръжения (стабилни пиедестали върху меки и нестабилни породи) за кацането и надеждното закрепване на многотонажни летателни апарати.

Литература

Синилков, П. (2009). Зависими и независими движения на крачещи мобилни установки, *Научни известия на научно-техническите съюзи по машиностроене – година XVII, бр. 4114, Деветнадесета международна конференция Роботика и Мехатроника*. ISSN1310-3946, стр. 18-22, октомври 2009 г;.

Синилков, П. (2015). *Синтез крачещи мобилни механизми*. Дисертационен труд в професионално направление 5.1 „Машинно инженерство”, по научната специалност “Роботи и манипулатори”, София.

Синилков, П. (2024). Необходимостта от връзка на космонавтиката и роботиката при добива на полезни изкопаеми от космически тела, *Международна научна конференция “Роботика и мехатроника’2024”*, София, 29-30 Октомври 2024.

Alexandrov, A. (2025). Mathematical Model and Kinematic Analysis of Rocker-Bogie Suspension Design for UGV Applications, *Complex Control Systems*, ISSN 2603-4697 (Online), Sofia.

Li B., Holstein H. (2002). Recognition of human periodic motion a frequency domain approach, Pattern Recognition.

Proceedings, 16th international Conference on, Volume: 1, Pages: 311-314.

Mario W. Gomes and ect. (2004). A five-link 2D brachioting ape model with life-like motions and no energy cost. *Theoretical and Applied Mechanics*, Cornell University, Ithaca, USA.

Sherman, M. (2013). *Theory Manual*, Stanford University, March 2013.

Sinilkov, P. (2024). Opportunities for creating industry outside Earth. *S.E.S., 22 – 25 October*, p-ISSN 2603 – 3313, Sofia, Bulgaria, pages 146 – 151.

GRIPS AND MANIPULATION IN WEIGHTLESSNESS

Pavel Sinilkov

Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, sinilkov@mail.com

ABSTRACT: The development of the space industry imposes new challenges to the construction of spacecraft and their functionality in outer space. Maneuvering, gripping, and manipulating small space bodies without gravity (meteorites) is one of the current requirements faced by space technology. The connection between robotics and astronautics offers solutions to a number of design issues in the kinematic synthesis of future spacecraft. In this material, special attention is paid to the grip of small space bodies, its physical nature, and the possibilities for their manipulation in the conditions of weightlessness.

Keywords: space industry, meteorite, grip, impact.

ЗАХВАТИ И МАНИПУЛАЦИЯ В УСЛОВИЯТА НА БЕЗТЕГЛОВНОСТ

Павел Синилков

Институт по роботика – Българска академия на науките, 1113 София

РЕЗЮМЕ: Развитието на космическата промишленост налага нови предизвикателства пред конструкциите на космическите кораби и тяхната функционалност в космическото пространство. Маневрирането, захвата и манипулирането на малки космически тела без гравитация (астероиди) е едно от изискванията на настоящето към космическата техника. Връзката на роботиката и космонавтиката дава решения на редица конструктивни въпроси в кинематичния синтез на бъдещите космически кораби. В настоящия материал е обърнато специално внимание на захвата на малки космически тела, неговата физична същност и на възможностите за манипулацията им в условията на безтегловност.

Ключови думи: космическа промишленост, метеорит, захват, удар.

Въведение

Свободно движение на твърдо тяло

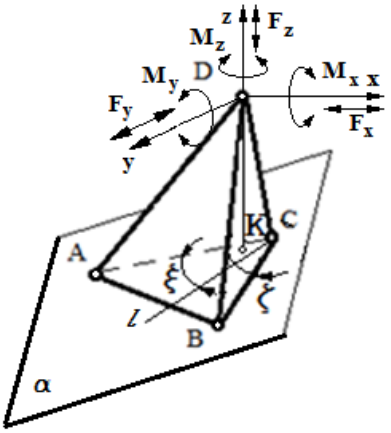
В космическото пространство, може с известно приближение да се приеме, че космическите тела извършват свободно движение в безтегловността. Приближението се налага от факта, че на всяко космическо тяло му въздействат определен брой външни сили с определен интензитет, зависещи от времето. Това въздействие на външните сили до голяма степен определя поведението на самото тяло. Във Вселената покоят не е познат като физично явление, методологично се приема, че вместо покой, телата извършват равномерно праволинейно движение. Нещо повече, равномерното праволинейно движение, като физично явление не може да възникне самостоятелно. Необходимо е действието на друго физично явление – сблъсък с друго тяло, преминаване през гравитационно поле и др., които да дадат началния импулс за равномерното праволинейно движение.

В аналитичната механика свободното движение на твърдо тяло се дефинира като се представя твърдото тяло от три точки, нележащи на една права в пространството (т.е. един триъгълник). Този триъгълник извършва последователно моментни транслации или ротации в пространството. Този подход на описанието на свободното движение е изключително удобен, тъй като подпомага описанието на методите на захват на отделните тела. Теоремата на Шал представя движението като моментно търкаляне с хлъзгане на подвижна аксоида по неподвижна аксоида по моментна винтова линия. Тоест налице е моментно винтово движение на тялото.

Въпреки математичната сложност на метода за описание на свободното движение, той дава методологичния подход и математичния апарат за изучаване и оразмеряване на свободното движение на твърдо тяло.

Триточкова опора и захват

Както вече бе отбелязано едно тяло в пространството се характеризира с три характерни точки (A, B, C, от равнината α на фиг. 1), нележащи на една права, тоест образуващи един характерен триъгълник. По движението на този триъгълник в пространството може да се съди за движението на цялото тяло. В общия случай външното натоварване е шест-мерно (три транслации и три ротации, тоест три взаимноперпендикулярни сили, действащи на тялото, но непресичащи се в една точка и три взаимноперпендикулярни момента, действащи също на тялото, но също непресичащи се в една точка, както е видно от фиг. 1). И за да може външното натоварване да бъде преведено в една точка от тялото, в общия случай, се избира произволна точка D от тялото, която може да не лежи в триъгълника ABC, а да образува с характерния триъгълник една триъгълна пирамида.



Фиг.1 Геометрично представяне на триточкова опора върху равнината α (на практика това е една триъгълна пирамида, чиято една страна може да се отъждестви с равнина в пространството, върху която се осъществява опорната дейност).

По този начин външното натоварване, съсредоточено в точка *D*, както и редуциращите сили и моменти от точката *D* до точките *A*, *B* и *C* покриват цялата картина от външно въздействие на тялото, което в общия случай е функция на времето *t* . От тук следва, че не е задължително трите точки (*A*, *B* и *C*) да представляват един единен неизменен триъгълник във времето

Важна особеност е, че трите точки *A*, *B* и *C* са точки от едното тяло (тялото към което принадлежи равнината α), но в същия момент, те са точки и от второто тяло (тялото към което принадлежи пирамидата *ABCD*). И тези три точки на практика са точките на контакт на двете тела.

Триточковата опора, практически е най-стабилната от всички опори и отговаря на минималните изисквания на геометричните закони за определяне на равнина в пространството. При триточковата опора се допуска, че съществува сила, която притиска опорния триъгълник ABC към равнината α. Най-често това е силата на тежестта, но ако силата на тежестта отсъства или действа отблъскващо между опорния триъгълник и равнината α, то тогава опората като физично явление престава да съществува, тоест двете тела се разделят.

При физичното явление захват съществува допълнителна сила, която е вътрешна за второто тяло (тялото на пирамидата *ABCD*) и се явява външна за първото тяло (тялото на равнината α). И след като е вътрешна, за едно от телата, тя може лесно да бъде регулируема, тоест тя е функция на времето *t* .

$$\overrightarrow{F^1_{ins.}} = \overrightarrow{F^2_{out.}} = f(t) \quad (1)$$

По този начин общата притискаща сила между двете тела е сума от външната притискаща сила и вътрешната притискаща сила, произлизаща от второто тяло.

$$\overrightarrow{F^2_{push}}(t) = \overrightarrow{F^2_{out.}(t)} + \overrightarrow{F^2_{gravit.}} \quad (2)$$

Това показва, че дори външната притискаща сила да се нулира, то вътрешната притискаща сила от второто тяло подържа връзката между двете тела.

При $\overrightarrow{F^2_{gravit.}} = 0$, следва:

$$\overrightarrow{F^2_{push}}(t) = \overrightarrow{F^2_{out.}(t)} \neq 0 \quad (3)$$

Изложение

Маневриране

Създаването на космическа промишленост вероятно ще стартира със събирането на полезни изкопаеми от малки космически тела (астероиди) от космическото пространство. Движението на тези тела зависи от множество фактори, но за нуждите на настоящия материал може да се приеме, според механиката, че тяхното движение е *свободно движение на твърдо тяло в условията на безтегловност.*

Това допускане подсказва, че е налице равномерно праволинейно движение по шестте възможни движения в тримерното пространство (тоест това е вид покой според Нютоновата механика тук, на Земята) и времето, като седми параметър, тоест:

$$S = f(l_x, l_y, l_z, M_x, M_y, M_z, t) \quad (4)$$

Съществуват на практика редица фактори, които превръщат равномерното праволинейно движение в движение по окръжност, елипса, винтова линия или в общия случай в случайна периодична крива с периодично изменение на параметрите й. Тъй като това са огромни траектории, в случая интерес представлява малък отрязък от тази траектория и поведението на астероида в този отрязък с цел да може да бъде захванат.

В научната литература съществуват множество теории за решаване на така поставената задача и определяне на траекторията на твърдото тяло, а така също и кинематичните характеристики, като скорости и ускорения в отделните направления.

Тук ще се отбележи единствено факта, че целта на маневрирането е да се симулира движение на космическия кораб такова, че да прилича *на обтъркалване на двете тела без преплъзване*. На практика такова движение на космическия кораб се получава, като се вземе движението на астероида в отделните направления със знак минус (без времето).

По този начин за даден интервал от време Δt захватния механизъм на космическия кораб, ще се доближи максимално до повърхността на астероида без допълнително движение и ще може да се захване за него.

Този принцип е в основата на маневрирането, но на практика съществуват и допълнителни фактори, които усложняват поставената задача. Това са избор на подходяща точка за контакт, подход към мястото на контакта, момент на контакта и др.

Едноточков захват.

Едноточков захват се нарича физичното явление, което произлиза от една точка на едно тяло и въздейства единствено и само на една точка от друго тяло, осъществявайки силова връзка между двете точки на двете тела. Обикновено едноточковия контакт осигурява една еднопосочна опънна сила, която фактически се явява притискаща за двете тела.

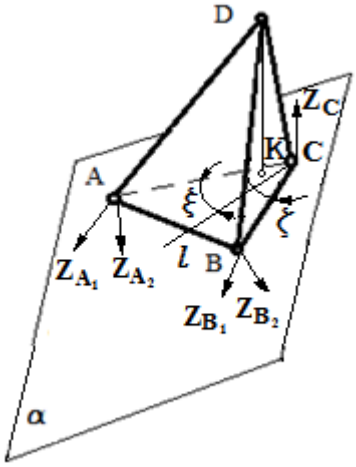
Лесно се забелязва, че в случая е налице хибриден механизъм между триточкова опора и някакъв друг механизъм, който създава притискаща сила, за да може да се реализира друго физично явление от вида кацане, опора, захват или локомоция. Такива допълнителни механизми могат да бъдат базирани на различни физични явления като магнетизъм, еластичност, електростатика и др.

Триточков захват

Трите опорни точки *A*, *B* и *C* от тялото, олицетворено чрез пирамидата *ABCD*, представлява тялото 2, което се захваща за тялото 1, олицетворено чрез равнината α на фиг. 1. На практика тялото 2 представлява космическия кораб, който в условията на безтегловност маневрира и се стреми да захване астероида, тоест тялото 1. Пирамидата *ABCD* представлява част от захващащия механизъм, принадлежащ на тялото 2. Особеността на тази пирамидална структура е, че това не е монолитно тяло (с изключение на някои частни случаи), а *един сложен механизъм с променлива, дълга кинематична структура.*

За да се осъществи функцията на триточковия захват е необходимо във всяка една от трите опорни точки, да се реализира едноточков захват. *Разликата от едноточковия захват е, че при триточковия захват са налице един или повече едноточкови захвата във всяка опорна точка.* По този начин, опорният триъгълник ABC се превръща от елемент на тялото 2 (космическия кораб) в елемент на тялото 1 (астероида). Връзката между двете тела преминава по ръбовете на пирамидата *AD*, *BD* и *CD*, през точката *D*, към тялото 2.

Конструктивно точката *D* представлява един сложен кинематичен механизъм, където в повечето случаи тази точка е виртуална.



Фиг. 2. Примерни опорни направления на едноточкови захвати в опорните точки

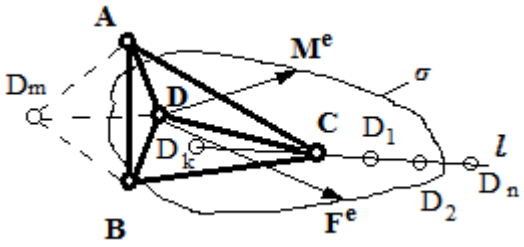
Както е видно от Фиг. 2 в точките *A* и *B* са налице по две усилия вследствие на техните захвати, съответно, за точката *A* по направления Z_{A_1} и Z_{A_2}, за точката *B* по направления Z_{B_1} и Z_{B_2}, а за точката *C* само по едно направление Z_C**.** Това множество от захвати осъществява една стабилна връзка между опорния триъгълник *ABC* и равнината α**.** Тоест, ако равнината α е част от една зона от астероида или от друго единно цяло, то следва, че след триточковия захват опорният триъгълник *ABC* става част от тялото, към което принадлежи равнината α**.**

Положението на точката *D* е неподвижно тогава и само тогава, когато пирамидата *ABCD* е една монолитна обемна фигура. В повечето случаи, обаче, тази пирамида е един сложен механизъм, който позволява на точка *D* да се движи в пространството над опорния триъгълник. Движението на точката *D* е от голямо значение при синтеза на по-нататъшната кинематична верига (след точка *D*), който би изпълнявал различни функционални задачи (локомоция, сондиране, товаро-разтоварна дейност и др.).

Движението на точка *D* е функция на опорните реакции в опорните точки *A*, *B* и *C* и времето *t,* като по този начин се преразпределят големините на опорните реакции между трите точки в опорния триъгълник. Това дава възможност за по-добра гъвкавост и минимизиране на определени компоненти от опорните реакции при експлоатация.

Многоточков захват. Манипулация.

Движението на точка *D* над опорния триъгълник преразпределя стойностите на опорните реакции, но това преразпределение става в определени граници. Движението по време на експлоатация на главния вектор на опорните реакции F^e и главния момент на опорните реакции M^e може да се ограничи в едно силово обемно тяло с контур σ.



Фиг. 3 Изглед отгоре на опорната пирамида, която в условията на четириточков контакт се изражда в пирамида с основа четириъгълник.

Примерното представяне на това тяло на Фиг. 3 е силно издължено по посоката на точка *C*. В този случай точката *D* е необходимо да заема положенията D_1, D_2,..., D_n или D_K по повърхнината *l* (в частност е показана като права на Фиг. 3). В тези случаи се поставят допълнителни опорни точки (примерно показаната четвърта опорна точка D_m), които поемат до голяма степен опорните усилия по посока на натоварването, в зависимост от вида на силовото обемно тяло σ.

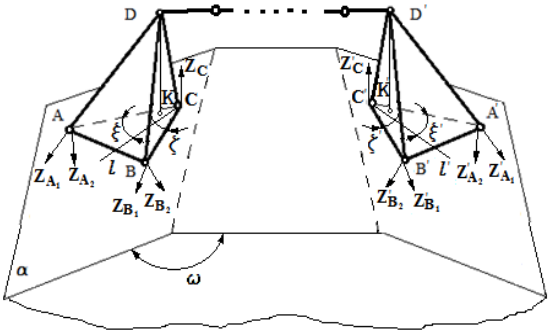
В условията на безтегловност отчитането на манипулацията е затруднено, от гледна точка на отправната точка за отчитане. Следователно при две неподвижно захванати тела едно спрямо друго с една неподвижна точка (примерно точка *D*), отчитането на манипулацията може да стане единствено по изменението на Ойлеровите ъгли. Ако съществува манипулационна система между точка *D* и тялото 2, то тя би отчела и линейни релативни движения.

Двоен триточков и многоточков захват. Хибридна опора.

В предната точка бе показано как направленията на опорните реакции на триточковия захват са представени на пирамидалния механизъм (част от който е от равнината α)**.** На практика обемът от материя на тялото 1 от равнината α, под опорния триъгълник *ABC*, към който е захванато второто тяло (тялото към което принадлежи пирамидата *ABCD*), генерира опорните реакции, които се противопоставят на усилията съсредоточени в точка *D*.

От голямо значение е видът на материята, от която е изградено първото тяло, тъй като от това зависи какви опорни реакции то може да понесе, без да се разруши. Ясно е, че колкото по-голям е обемът под опорния триъгълник, толкова по-големи по абсолютна стойност опорни реакции ще понесе.

Решението е в двойния триточков или многоточков захват. Това са две пирамидални структури (триточкови захвати) на разстояние едно от друго, които на практика заграждат значително по-голям обем материя от единичния триточков захват. Нещо повече, направленията на общите нормали на опорните многоъгълници (според фиг. 4 това са опорни триъгълници) могат да не са успоредни, в частен случай, а да сключват ъгъл помежду си $\measuredangle 2\omega$ или да са кръстосани.



Фиг. 4 Схема на примерен двоен триточков захват

Захватен процес се използва и на Земята, когато земното притегляне g действа в посока, разделяща двата обекта. Примери за захватни механизми в биомеханиката има изключително много. Обикновено това са нокти в краищата на пръстите на крайниците, които се забиват в грунда през време на опората. По този начин се оформя нов опорен процес, който е съчетание между опора и захват и се нарича *хибридна опора.*

Заключение

Тук, на Земята, в биомеханиката на животните (при насекоми, птици и др.), които кацат на цветя и дървета, катерят се по тях, се наблюдават крайници, завършващи на хибридни опори. Това показва точността на метода за конструктивен синтез на опори и захвати.

Това налага конструкциите на космическите кораби да претърпи значителни изменения, придобивайки нов облик, който е пригоден за производствена дейност в условията на безтегловност.

Литература

Синилков, П. (2009). Зависими и независими движения на крачещи мобилни установки, *Научни известия на научно-техническите съюзи по машиностроене – година XVII, бр. 4114, XIX международна конференция Роботика и Мехатроника*. ISSN1310-3946.

Синилков, П. (2011). Аналитичен синтез на механизми за крайници на крачещи мобилни роботи, *Научни известия на научно-техническия съвет по машиностроене XXI Международна Конференция Роботика и Мехатроника*, ISSN 1310-3946.

Синилков, П. (2011). Аналитичен синтез на механизми за крайници на крачещи мобилни роботи, *Научни известия на научно-техническия съвет по машиностроене XXI Международна Конференция Роботика и Мехатроника*, ISSN 1310-3946.

Синилков, П. (2015). Синтез крачещи мобилни механизми. *Дисертационен труд, в професионално направление 5.1 „Машинно инженерство”, по научната специалност “Роботи и манипулатори”*.

Li B., Holstein H. (2002). Recognition of human periodic motion a frequency domain approach, Pattern Recognition – *Proceedings, 16th international Conference on, Vol. 1,* pp. 311-314.

Mario W. Gomes and ect. (2004). A five-link 2D brachiating ape model with life-like motions and no energy cost, *Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University,* Ithaca, USA.

Sherman, M. (2013). *Theory Manual*, Stanford University.

Sinilkov, P. (2024). Opportunities for creating industry outside Earth, *S.E.S.,* 22 – 25 October, p-ISSN 2603 – 3313, Sofia, Bulgaria, pp. 146 – 151.

Sinilkov, P. (2024). Opportunities for creating industry outside Earth, *S.E.S.,* 22 – 25 October, 2024, p-ISSN 2603 – 3313, Sofia, Bulgaria, pages 146 – 151.

BENEFITS OF IMPLEMENTING SMART GRIDS IN THE ELECTRICITY TRANSMISSION NETWORK IN BULGARIA

Roberto Trendafilov

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

ABSTRACT. A smart grid is a modern electric power network that integrates electrical networks with communication devices used for the production and distribution of electricity. The primary focus of smart grids is on four key areas: production, transmission, distribution, and consumption. The smart grid, as a system, controls, operates, and uses energy sources that are integrated into the network through intelligent communication technology and computerised procedures. The key functions of a smart grid are efficiency (by improving output power and reducing voltage), reliability (related to self-recovery and reducing the need for technical intervention), load balancing during peak consumption, and sustainability, which allows the inclusion of renewable energy sources in the network. Certain activities have been undertaken for the development of smart grids in this country. The main objective of the project is to achieve comprehensive modernising of the activities related to planning, management, and maintenance of the electricity transmission network in the country, by introducing modern digital tools and methods. The expected benefits of implementing smart grids are numerous, the main ones being related to increased reliability, improved efficiency, safety, and security, reduced critical situations, as well as resource savings and cost reduction. Smart grids enable operational coordination in terms of balancing and sharing resources, storing and utilising energy reserves, and coordinated planning of energy production and transmission. The operational flexibility of smart energy grids is implemented in various directions, such as flexibility of the electricity system; load coordination; effective integration of energy from renewable sources into the grid; energy storage and its transmission to consumers, according to their demand.

Key words: smart grids, benefits, efficiency, costs.

ПОЛЗИ ОТ ВНЕДРЯВАНЕ НА ИНТЕЛИГЕНТНИ МРЕЖИ В ЕЛЕКТРОПРЕНОСНАТА МРЕЖА В БЪЛГАРИЯ

Роберто Трендафилов

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

РЕЗЮМЕ. Интелигентната мрежа е модерна електрическа енергийна мрежа, която интегрира електрически мрежи с комуникационни устройства, използвани за производство и разпределение на електроенергия. Основният фокус на интелигентите мрежи е върху четири ключови области – производство, пренос, разпределение и потребление. Интелигентната мрежа като система контролира, работи и използва източници на енергия, които са интегрирани в мрежата чрез интелигентна комуникационна технология и компютъризирани процедури. Ключовите функции на интелигентната мрежа са ефективност (чрез подобряване на изходната мощност и намаляване на напрежението), надеждност (свързана със самовъзстановяването и намаляване на необходимостта от техническа намеса), балансиране на натоварването, по време на пиково потребление и устойчивост, чрез която се позволява включването на възобновяеми енергийни източници в мрежата. За развитие на интелигентни мрежи в страната са предприети определени дейности. Основната цел за изпълнение на проекта е да се постигне цялостно модернизиране на дейностите, свързани с планиране, управление и поддържане на електропреносната мрежа в страната, чрез въвеждане на съвременни дигитални средства и методи. Очакваните ползи от внедряване на интелигентни мрежи са множество, като основните са свързани с повишаване на надеждността, подобряване на ефективността, безопасността и сигурността, намаляване на критичните ситуации, както и икономия на ресурси и намаляване на разходите. Интелигентните мрежи позволяват оперативна координация по отношение на балансиране и споделяне на ресурси, съхранение и използване на резерви от енергия и координирано планиране на производството и преноса на енергия. Оперативната гъвкавост на интелигентните енергийни мрежи се осъществява по различни направления, като: гъвкавост на електроенергийната система; координиране на натоварването; ефективно интегриране на енергия от възобновяеми източници в мрежата; съхранение на енергия и преноса ѝ към потребители, според тяхното търсене.

Ключови думи: интелигентни мрежи, ползи, ефективност, разходи.

Въведение

Увеличеното потребление на енергия в съвременния живот довежда до необходимост от повишаване надеждността и качеството на производството и използването на електрическа енергия за осигуряване на енергийните и информационните нужди на потребителите. Заедно с използването на различни източници, имащи висока светлинна ефективност, повечето от подходите акцентират върху интелигентните системи за управление на осветлението, които се базират на модерни информационни и комуникационни технологии (Маринов и др., 2014).

Съществено значение за рационално използване на електроенергия имат интелигентните мрежи. Интелигентната електрическа мрежа (по-известна като умна електрическа мрежа или smart grid) е резултат от технологична реформа в електроенергетиката. По своята същност интелигентната мрежа е модерна електрическа енергийна мрежа, която интегрира електрически мрежи с комуникационни устройства, използвани за производство и разпределение на електроенергия (Mahmoud et al., 2020). Интелигентната мрежа интегрира електрически мрежи с комуникационни устройства, които поддържат производството и разпределението на електроенергия по мрежите (Dibangoye et al., 2015).

Специфика на интелигентните мрежи

В най-всеобхватния си смисъл терминът „интелигентна мрежа“ се отнася до актуализирана електрическа мрежа, която използва комуникация, сензори, компютри и автоматизация, за да подобри ефективността, надеждността и безопасността на електроенергийната система. Интелигентната мрежа предоставя възможност на потребителите да контролират как използват електричество и в резултат на това ефективно намалява цената на електричеството чрез разумно използване на енергията (Ohanu et al., 2024). Основният фокус на интелигентите мрежи е върху четири ключови области – производство, пренос, разпределение и потребление. Интелигентната мрежа като система контролира, работи и използва

източници на енергия, които са интегрирани в мрежата чрез интелигентна комуникационна технология и компютъризирани процедури (Acakpovi et al., 2019). Използването на интелигентна мрежа намалява броя на прекъсванията на електрозахранването, като същевременно повишава общата ефективност и предоставя на потребителите по-голяма степен на влияние върху разпределението и използването на енергия (Abdullah & Hassan, 2022). Като електрическа мрежа с двупосочен поток на енергия и данни, интелигентната мрежа интегрира информационни/комуникационни, сензорни, измервателни и контролни технологии (Zhang et al., 2022). Посочените функции на интелигентните мрежи улесняват постигането на гъвкава, надеждна, издръжлива, стабилна и устойчива работа на мрежата. Концепцията за интелигентна мрежа е мотивирана от необходимостта да се (Babayomi et al., 2022):

- Подобри ефективността на производството и разпределението на електроенергия.
- Подобри надеждността.
- Предостави възможност на потребителите да контролират своето потребление на електроенергия, което да рефлектира и върху заплащаните от тях разходи.
- Намали негативното влияние на електроенергийната индустрия върху климатичните промени.

Влияние върху развитието на интелигентните мрежи имат и бързото увеличаване на броя на мобилните устройства на потребителите, както и развитието на информационните и комуникационните технологии. Въпреки, че технологичният прогрес оказва положително влияние върху множество отрасли, съществено влияние се наблюдава и по отношение на увеличаване на въглеродните емисии и увеличеното потребление на енергия. Интелигентната мрежа предлага различни решения, чрез които да се постигне мониторинг на потребяваната енергия в реално време, да се оптимизират процесите и системите, за да се повиши тяхната ефективност и да се промени начина на комуникация между всички системи и устройства (Чобанова и Маринова, 2016).

Интелигентната мрежа се определя и като модерна електрическа инфраструктура, която разчита на информационни и комуникационни технологии и цифрови мрежи, за да събира данни за мрежата, тоест произведената и консумирана електроенергия и да използва тази информация за генериране на модели на потребление в реално време, за да оптимизира състоянието на мрежата и използването на енергия от потребителите. Ключовите функции на интелигентната мрежа са ефективност (чрез подобряване на изходната мощност и намаляване на напрежението), надеждност (свързана със самовъзстановяването и намаляване на необходимостта от техническа намеса), балансиране на натоварването по време на пиково потребление и устойчивост, чрез която се позволява включването на възобновяеми енергийни източници в мрежата (Guelzim et al., 2016).

В опростен вид основните четири слоя на интелигентната електрическа мрежа са:

- Твърда инфраструктура – включва необходимите материални активи за производство, пренос и разпределение на електрическа енергия до крайните потребители.
- Телекомуникации – използваните комуникационни услуги, позволяващи да се извършва наблюдение, контрол и защита на електрическата мрежа.
- Технология за управление на данните – с цел улесняване функционирането на интелигентната мрежа.
- Приложения – различни софтуерни технологии и инструменти, които се използват за обработване на информация, събирана от мрежата, необходима за наблюдаване, контролиране и защита на твърдата инфраструктура и подсилване на мрежата, чрез което да се позволи използването на енергия от възобновяеми източници.

Функционирането на четирите слоя на интелигентната мрежа цели постигане на по-ефективно използване на енергия от потребителите на мрежовата инфраструктура (Hossain et al., 2014). Повишаването на мониторинга е предпоставка за подобряване на контрола и защитата на мрежата, което позволява по-устойчиво, надеждно и ефективно предоставяне на електроенергийни услуги на потребителите в сравнение с традиционната мрежа (Wang & Lo, 2013). Интелигентната електрическа подстанция е ключова в работата на интелигентните мрежи. За разлика от традиционната електрическа подстанция, при интелигентната се записват данни, които след това могат да бъдат следени и отчитани дистанционно с използване на аналогова или цифрова връзка, което позволява максимално бързо установяване и отстраняване на повредени части от електрическата мрежа и то с по-малко разходи и намаляване тежестта на повредите (Gungor et al., 2012).

Използвани технологии и инфраструктура за изграждане на интелигентни мрежи

Интелигентната мрежа използва различни цифрови устройства, като колектори и запис на данни, автоматизирани сензори, интелигентни измервателни уреди, дисплей за данни в реално време, приложения за управление на двупосочна комуникация, които са добавени в електрическата мрежа от генератора до потребителя. Електрическата мрежова система на интелигентната мрежа е значително по-сложна от традиционната, поради необходимостта от интегриране на информационни технологии и данни във всички области на мрежата (Babayomi et al., 2023). Интелигентната мрежа интегрира дейностите на всички потребители/клиенти, за да произведе и осигури електроенергия ефективно, устойчиво, икономично и сигурно. Интелигентната мрежа използва иновативни технологии, които заедно служат за наблюдение, контрол, комуникация и самостоятелно откриване, предвиждане и реагиране на смущения с цел:

- улесняване на извършваните дейности и оптимизиране работата на мрежата;
- осигуряване гъвкавост на потребителите;
- предоставяне на информация в реално време на потребителите и различни опции за използване на енергия;
- значително намаляване вредното въздействие върху околната среда.

Интеграцията на различни технологии в интелигентните мрежи позволява осъществяване на комуникация и обмен на информация между производството, разпределението и консумацията на енергия, за да се вземат по-интелигентни

решения, свързани с потреблението. Основните компоненти на интелигентната мрежа са електроенергийна технология, информация и телекомуникации, като трите компонента са интегрирани помежду си, което позволява двупосочна комуникация между енергийните компании и потребителите. Прехвърлянето на електрическа енергия в интелигентните мрежи се различава значително от традиционните, защото ако потребителите използват собствени източници на електрическа енергия (например от слънчева светлина), те могат да изпращат генерираната енергия към мрежата. От това прехвърляне на енергия, потребителите не само заплащат по-ниски такси за консумираната енергия, но дори могат да продават самостоятелно генерираната енергия на електроразпределителната компания.

Интелигентната мрежа се състои от комуникационни мрежи, усъвършенствани сензори и контролни инструменти, използвани за наблюдение работата на системата. Произвежданият ток и неговата мощност се контролират в реално време, за да се получи оптималност и ефективност на мрежата. Използваните технологии в интелигентната мрежа позволяват наблюдаване и контролиране на двупосочния поток на комуникация и предаване на информация между електроцентрала, контролна база и потребител. Контролът в интелигентната мрежа се осъществява чрез използване на данни, събирани от контролната база, която от своя страна ги получава от сензори, наблюдаващи консумацията на енергия в реално време, метеорологичните условия, работното състояние на мрежата и наличността на енергия от електроцентралната и енергия от възобновяеми източници на потребители. Посочените данни се използват и за прогнозиране на енергийните нужди на потребителите.

Интелигентната мрежа използва възобновяеми енергийни източници, известни също като зелена енергия, които произтичат от естествени източници като слънчева, вятърна, геотермална, ядрена или био енергия (Ohanu et al., 2024). В работата на интелигентните мрежи се включва използването на софтуер, хардуер и технологии, които помагат на електроенергийните компании да идентифицират и незабавно коригират дисбалансите между генериране и търсене, за да подобрят качеството на услугата, да увеличат енергийната надеждност и да намалят разходите за производство и пренос на енергия до крайните потребители (Wollman et al., 2010). Ключова роля в развитието на интелигентната мрежа имат комуникационните технологии, защото се използват за управлението на огромно количество информация, която може да идва от различни приложения, които също трябва да се наблюдават и анализират, за да се получи информация в реално време (Mahmud, 2017). Голямото предизвикателство за енергийните компании е да дефинират комуникационните изисквания и да определят най-добрата комуникационна технология за управление на данните и контрол за осигуряване на безопасна, евтина и надеждна услуга за цялата система (Saha et al., 2016).

Отделните компоненти на интелигентната електрическа мрежа обхващат технологиите, които се използват с цел постигане подобрение на надеждността в производството на енергия, както и интелигентите технологии, позволяващи включването в мрежата на енергия от възобновяеми енергийни източници. Отделните компоненти на интелигентната мрежа включват интелигентна разпределителна мрежа, интерфейс на интелигентните устройства, трансмисионна система, устройства за съхранение на енергия, устройства за управление на търсенето и устройства за мониторинг и контрол. Интелигентната мрежа е инфраструктура за разпределение на електроенергия, която осигурява двупосочна комуникация между доставчика на комунални услуги и клиентите. Цифровите технологии, които допринасят за осъществяване функциите на технологията на интелигентната мрежа, включват сензори за мощност/ток, контроли, центрове за данни и интелигентни измервателни уреди (Vijayapriya & Kothari, 2021). Интелигентните мрежи използват усъвършенствани сензори, измервателни уреди и комуникационни устройства в цялата мрежова инфраструктура, за да събират данни в реално време за потреблението на електроенергия, условията на мрежата и производителността на оборудването (Kojonsaari & Palm, 2023). Тези компоненти позволяват на комуналните услуги дистанционно да наблюдават и контролират мрежата, да оптимизират енергийния поток и бързо да реагират на смущения в мрежата. Като усъвършенствана електрическа мрежа, която използва цифрова комуникация и технология за подобряване на ефективността, надеждността и устойчивостта, интелигентната мрежа за разлика от традиционните мрежи, има възможности за наблюдение в реално време, което позволява проактивно управление на разпределението на електроенергия чрез вземане на решения и автоматизация, базирани на данни (Kojonsaari & Palm, 2023).

Архитектурата на интелигентната мрежа включва (Escobar et al., 2021):

- Интелигентни измервателни уреди – позволяващи на потребителите да използват електричество по разумен начин и да спестяват енергия.
- Възобновяеми енергийни източници.
- Системи за съхранение на енергия.
- Информационни и комуникационни технологии, които позволяват комуникация между електрическа компания и потребител.

Използването на интелигента мрежа изисква и специфична технология за потребителите. През последните години все повече се увеличава използването на различни технологии за превръщане на домовете в „умни“ (Николов и Павлов, 2023).

Възможности за внедряване на интелигентни мрежи в България и очаквани ползи

Електропреносната мрежа в България включва електропроводни линии, които са с обща дължина от 15 964.93 km, в това число 400 kV – 3 031.73 km, 220 kV – 2 710.9 km, 110 kV – 10 177.17 km и 60 kV – 11.84 km. Кабелни електропроводи: 400 kV – 0.3 km; 220 kV – 3.24 km; 110 kV – 29.75 km. Мрежата включва още и 299 електрически подстанции. Електропреносната мрежа в България включва мрежа 400kV, мрежа 220kV и мрежа 110kV, свързани помежду си чрез системни автотрансформатори и трансформатори. Развитието на електропреносната мрежа в страната е свързано с изпълнение на изискванията на основните европейски политики, по отношение на:

- постигане на сигурност при снабдяването с електрическа енергия на потребителите и електроразпределителните мрежи;

- повишаване на капацитета за обмен на електроенергия със страните от Югоизточна Европа;
- присъединяване на нови паркови и синхронни генериращи модули;
- повишаване ефективността при преноса на електроенергия;
- присъединяване на нови мощности, необходими за съхранение на енергия;
- постигане на експлоатация и поддръжка на електропреносната мрежа при значителен дял на децентрализирано производство.

Българската електропреносна мрежа е част от общата преносна мрежа на страните от Европа, поради което развитието ѝ е свързано с развитието на тези от съседните страни. Мрежа 400kV е основата на електропреносната мрежа на страната, като географското разположение на България предполага да се повиши интереса към транзит на електроенергия през електропреносната мрежа. През 2023 г. е въведен в експлоатация нов междусистемен електропровод „Марица Изток“ (България) – „Неа Санта“ (Гърция). Необходимо е значително развитие на електропреносната мрежа в югоизточната и североизточната част на страната, поради инвестиционния интерес за присъединяване на нови мощности на ВЕИ паркови модули. В тази връзка се предвижда изграждане на нов пръстен 400kV: Марица Изток – Узунджово (чрез реконструиране на съществуващата подстанция 400/110kV) – Любимец (нова) – Тенево (нова). За мрежа 220kV е приета концепция да се не развива, а да се редуцира за сметка на мрежи 400kV и 110kV. В по-дългосрочен план се обмисля да се извърши реконструкция на някои от вътрешните електропроводи 220kV, както и прилежащите им подстанции към ниво 400kV, по приоритетни направления за електропреносната мрежа на страната.

Мрежа 110kV е с преобладаващо локално значение, поради което развитието ѝ се определя чрез:

- Подобряване сигурността на захранването на потребителите.
- Подобряване обмена на електроенергия с разпределителните мрежи.
- Присъединяване на генериращи модули (директни) в разпределителните мрежи.
- Присъединяване на директни потребители, но при осигуряване на необходимата категория за сигурност.

За развитието на електропреносната мрежа съществено значение има динамиката във ВЕИ сектора. Все повече ВЕИ производители искат да се присъединят към мрежата високо напрежение, както и към мрежите на електроразпределителните дружества, което изисква реконструкция и разширение на подстанциите 110kV/Ср.Н. Към настоящия момент при опасност от недостиг на трансформаторна мощност в подстанция 110kV/Ср.Н, поради присъединяване на нова ВЕИ, се осъществява подмяна на съществуващите трансформатори с нови, имащи по-висока номинална мощност и добавяне на съоръжения с първична и вторична комутация, при отчитане на номиналната мощност на новите силови трансформатори. Съществуват подстанции, в които целите на инвеститорите за присъединяване на нови ВЕИ надхвърлят трансформаторната мощност, включително и по отношение на предвидените за подмяна трансформатори. При тези обекти е предвидено използването на специфични технически решения, свързани с реконструкция, разширение или изграждане на нови подстанции в дадения район. За разлика от конвенционалните електрически централи, генериращите модули за ВЕИ в повечето случаи се изграждат в райони, в които електропреносната мрежа липсва или е оразмерена за захранвана на малки електрически товари. Инвеститорският интерес често не съвпада географски със свободния капацитет на електропреносната мрежа за дадения район, но същевременно не е възможно да се изградят нови електропроводи и подстанции, с такива темпове, с каквито се изграждат ВЕИ. Важно е да се уточни и че не винаги е възможно да се извърши реконструкция и развиване на съществуващата преносна електрическа мрежа, преди да бъдат построени нови електропроводи, поради намаляване сигурността на електрозахранването на потребителите и увеличаване риска от възникване на каскадни аварии в големи райони на страната.

По данни на Електроенергийния системен оператор към настоящия момент заявените инвестиционни намерения за изграждане на нови ВЕИ паркове трикратно надхвърлят съществуващите конвенционални генериращи мощности. В тази връзка, както и поради факта, че интересът на инвеститорите на ВЕИ не съвпада географски със свободния капацитет на електропреносната мрежа в дадените райони, то се предвиждат технически решения, свързани с развитие на електропреносната мрежа 400 kV и 110 kV, както и реконструкция на съществуващите компоненти от нея (План за развитие на преносната електрическа мрежа на България за периода 2024-2033 г.).

За развитие на интелигентни мрежи в страната за предприети определени дейности. В България се изпълнява проект „Цифрова трансформация на електропреносната мрежа“, който е финансиран по Механизма за възстановяване и устойчивост на ЕС. Инвестицията е част и от Плана за възстановяване и устойчивост на България, стълб „Зелена България“, мярка „Нисковъглеродна икономика“, като цели да се допринесе за постигане на зелен и цифров преход. Основната цел за изпълнение на проекта е да се постигне цялостно модернизиране на дейностите, свързани с планиране, управление и поддържане на електропреносната мрежа в страната, чрез въвеждане на съвременни дигитални средства и методи.

Очакваните ползи от внедряване на интелигентни мрежи са множество, като основните са свързани с:

- Повишаване на надеждността – надеждността на интелигентните мрежи се определя и от възможността на електрическата мрежа да открива, предвижда и реагира на смущения, които възникват в системата, бързо въз основа на данни или информация, предадени от инсталирани сензори. Например, при прекъсване на трансформатора, защитната система автоматично изолира смущенията, без да се чака идване на техник, за да не се преди на дейността на останалите мрежи и да не се прекъсва тока в тях (Khalilpour & Vassallo, 2016).
- Подобряване на ефективността – всеки домейн в интелигентната мрежа, включващ генератори, пренос, разпределение и използвани устройства от потребителя, е оборудван с усъвършенствани сензори, които служат за предоставяне на специфични данни за параметрите в интелигентната мрежа в реално време. С тези данни, операторът може да сведе до минимум появата на смущения като претоварване, което може да причини пълно

спиране работата на мрежата. Интелигентните мрежи са по-гъвкави към интегрирането на производството на електроенергия от възобновяеми източници, особено от слънчева и вятърна енергия (Siitonen et al., 2024). Ефективното електроснабдяване в следствие използването на интелигентни мрежи се определя от повишената сигурност в потреблението на енергия и от ефективността на електрическата мрежова инфраструктура. Самата ефективност се повишава от цялостния мониторинг на електропреносната мрежа чрез използване на интелигентни измервателни устройства, които обменят данни и информация помежду си и са разположени както при крайните потребители на електроенергия, така и в електрическите подстанции и центровете за данни.

• Подобряване на безопасността и сигурността – интелигентните мрежи работят чрез комбиниране на електрически инфраструктури с цифрови технологии, за да наблюдават и управляват потока на електроенергия от различни източници към потребителите. Ключовите компоненти на тази технология могат да включват интелигентни измервателни уреди, които предоставят данни в реално време за потреблението на електроенергия и автоматизирани системи за контрол, които работят за регулиране и разпределение на електроенергията към потребителите по възможно най-ефективния начин (Aloul et al., 2012). Освен че повишава надеждността на разпределението на електроенергия, използването на тези цифрови компоненти подобрява безопасността чрез идентифициране и реагиране на потенциални електрически повреди, преди да могат да причинят някаква вреда (Sharma et al., 2018). Интелигентните мрежи използват различни технологии чрез които се постига повишаване на безопасността и сигурността. Интелигентните сензори обикновено се инсталират в цялата електрическа система и могат бързо да открият необичайни условия като претоварване, прегряване и късо съединение. След като тези сензори открият проблем, персоналът по безопасността може да действа бързо, за да разреши проблема, преди да се е влошил (Amin et al., 2012). Използваните прекъсвачи с IoT технология могат автоматично да изключат захранването, след като има открита електрическа повреда. Тези автоматизирани изключвания гарантират, че потенциалните инциденти са предотвратени чрез пълно прекъсване на енергията (Wasumwa, 2023).

• Намаляване на критичните ситуации – традиционната електрическа мрежа се фокусира върху производството, преноса, разпределението и контрола на електроенергията. В допълнение, съществуващите електрически мрежи имат електромеханична структура, еднопосочна комуникация, централизирано генериране, по-малко сензори, ръчно възстановяване, ръчни проверки/тестове, известна степен на контрол и по-малко възможности за избор на клиента. От своя страна интелигентната електрическа мрежа е мрежа, използвана за подобряване на ефективността, устойчивостта, гъвкавостта, надеждността и сигурността на електрическата система, като позволява мрежата да бъде наблюдавана, контролируема, автоматизирана и напълно интегрирана. За разлика от съществуващите електрически мрежи, интелигентните електрически мрежи имат цифрова структура, двупосочна комуникация, разпределено генериране, множество сензори, самонаблюдение, възможности за самовъзстановяване, дистанционни проверки/тестове и всеобхватен контрол.

• Икономия на ресурси и намаляване на разходите – основна функция на интелигентната мрежа е автоматично да събира информация за вариациите в работните условия и параметри като напрежение и консумация за различни възли, свързани към мрежата. Това е възможно чрез цифрова технология, която не само позволява на мрежата да събира информация, но и да я обработва и да реагира по съответния начин чрез разпределение на енергия между различните свързани възли. Друга ключова функция на интелигентната мрежа е способността за автоматично преразпределение на електроенергията между различните възли според нуждите. Предимствата на този тип решение са ясни: управлението на ресурсите е незабавно по-ефективно и оптимизирано, тъй като мрежата е в състояние да предотврати пренапрежения, колебания на напрежението и прекъсвания на захранването, като намалява натоварването, когато е необходимо.

Заключение

Основните характеристики на интелигентните мрежи са:

• Цифрова комуникация – интелигентните мрежи използват цифрови комуникационни технологии, като Интернет на нещата (IoT) и безжични мрежи, за да позволят безпроблемен обмен на данни между компонентите на мрежата и системите за управление. Това улеснява бързото вземане на решения и подобрява реакцията на мрежата към променящите се условия.

• Разширена измервателна инфраструктура – интелигентните мрежи използват интелигентни измервателни уреди, оборудвани с възможности за двупосочна комуникация, което позволява отдалечено наблюдаване на потреблението на енергия, откриване на прекъсвания и промяна в производството на енергия в отговор на търсенето. Разширената измервателна инфраструктура позволява по-точно калкулиране на разходите за използваната енергия, повишаване ангажираността на потребителите към по-разумно използване на енергия и подобрено управление на енергията.

• Разпределени енергийни ресурси – интелигентните мрежи позволяват интегрирането на разпределени енергийни ресурси, включително слънчеви панели, вятърни турбини, системи за съхранение на енергия и електрически превозни средства. Използването на разпределени енергийни ресурси е предпоставка за оптимизиране използването на възобновяема енергия и поддържане устойчивостта на мрежата.

• Автоматизация и контрол на мрежата – технологиите за автоматизация, вградени в интелигентната мрежа, позволяват използване на автоматизирани процеси за откриване, изолиране и възстановяване на грешки, което намалява времето за престой по време на прекъсвания, повишава надеждността на мрежата и подобрява цялостната ефективност на системата.

Използването на интелигентни мрежи позволява интелигентно измерване, което по своята същност комбинира информационни и комуникационни технологии, интелигентни средства за измерване и интелигентни концентратори. Интелигентното измерване има множество

ползи за потребителите, защото създава предпоставки за намаляване на разходите за използване на електроенергия. Интелигентните мрежи позволяват оперативна координация по отношение на балансиране и споделяне на ресурси, съхранение и използване на резерви от енергия и координирано планиране на производството и преноса на енергия. Оперативната гъвкавост на интелигентните енергийни мрежи се осъществява по различни направления, като: гъвкавост на електроенергийната система; координиране на натоварването; ефективно интегриране на енергия от възобновяеми източници в мрежата; съхранение на енергия и преноса ѝ към потребители, според тяхното търсене.

Литература

Маринов, М., Ганев, Б., Николов, Г. (2014). Безжична сензорна система за интелигентно управление и осветление в индустриалните сгради. *Сб. доклади „XV Национална конференция с международно участие BulLight България Светлина“*, Созопол, с. 67

План за развитие на преносната електрическа мрежа на България за периода 2024-2033 г. [онлайн] https://www.eso.bg/fileObj.php?oid=5010

Чобанова, З., Маринова, Г. (2016). Телекомуникационни системи за зелена икономика – обзор. ТУ София, XXIV TELECOM, с. 1-3

Abdullah, A., Hassan, T. (2022). Smart grid (SG) properties and challenges: an overview. *Discov Energy 2*, 8. https://doi.org/10.1007/s43937-022-00013-x

Acakpovi, A., Abubakar, R., Asabere, N. (2019). Barriers and prospects of smart grid adoption in Ghana. *Procedia Manuf., 35*, pp. 1240-1249, 10.1016/j.promfg.2019.06.082

Aloul, F., Al-Ali, A., Al-Dalky, R. (2012). Smart Grid Security: Threats, Vulnerabilities and Solutions. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy,* Vol. 1, No 1, pp. 1-5. https://www.ijsgce.com/uploadfile/2012/1011/20121011121836539.pdf

Amin, M., Giacomoni, A. (2012). Smart Grid—Safe, Secure, Self-Healing. IEEE power & energy. [online] https://magazine.ieee-pes.org/january-february-2012/smart-grid-safe-secure-self-healing/

Babayomi, O., Zhang, Z., Dragicevic, T., Hu, J., Rodriguez, J. (2023). Smart grid evolution: Predictive control of distributed energy resources - A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* Vol. 147. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108812

Dibangoye, J., Doniec, A., Fakham, H., Guillaud, C. (2015). Distributed economic dispatch of embedded generation in smart grids. *Eng. Appl. Artif. Intell., 44*, pp. 64-78

Escobar, M., Matamoros, M., Padilla, R., Reyes, I., Quintana, H. (2021). A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities. Sensors (Basel). 21(21):6978. doi: 10.3390/s21216978.

Guelzim, T., Obaidat, M., Sadoun, B., (2016). Chapter 1 - Introduction and overview of key enabling technologies for smart cities and homes. Smart Cities and Homes, Key Enabling Technologies, pp. 1-16. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803454-5.00001-8

Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C. (2012). A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Trans. Ind. Inf., 9* (1), pp. 28-42. doi: 10.1109/TII.2012.2218253.

Hossain, M., Madlool, N., Rahim, A., Selvaraj, J., Pandey, A., Khan, A. (2016). Role of smart grid in renewable energy: an overview *Renew. Sustain. Energy Rev., 60* (C), pp. 1168-1184. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.098

Khalilpour, K., Vassallo, A. (2016). Introduction: Features of a Smart Energy Network. In: Community Energy Networks With Storage. Green Energy and Technology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-287-652-2_1

Kojonsaari, A., Palm, J. (2023). The development of social science research on smart grids: a semi-structured literature review. *Energ Sustain Soc 13*, .https://doi.org/10.1186/s13705-023-00381-9

Mahmoud, M., Tang, A., Maseleno, A., Lim, F., Kasim, H., Yong, C., Mostafa, S. (2020). A Review on Smart Energy Grid Technology: Features and Specifications. *Journal of Engineering and Applied Sciences, 15* (2), pp. 535-547

Mahmud, A., Sant P. (2017). Real-time price savings through price suggestions for the smart grid demand response model; Proceedings of the 2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG); Istanbul, Turkey, pp. 65-69. doi: 10.1109/SGCF.2017.7947603.

Ohanu, C., Rufai, S., Oluchi, U. (2024). A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon,* Vol. 10, issue 3. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705

Saha, S., Janko, S., Johnson, N., Podmore, R., Riaud, A., Larsen, R. (2016). A universal charge controller for integrating distributed energy resources; Proceedings of the 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC); Seattle, WA, USA. pp. 459-465. doi: 10.1109/GHTC.2016.7857320

Sharma, J., Johansen, C., Noll, J., Roverso, D. (2020). A Methodology for Security Classification applied to Smart Grid Infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructure Protection,* Vol. 28. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2020.100342

Siitonen, P., Honkapuro, S., Annala, S., Wolff, A. (2024). Effects of trust and perceived benefits on consumer adoption of smart grid technologies: a mediation analysis. *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 42, Issue 1. https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298

Vijayapriya, T., Kothari, D. (2021). Smart Grid: An Overview. *Smart Grid and Renewable Energy,* Issue 2, pp. 305-311. doi:10.4236/sgre.2011.24035

Wang, W., Lu, Z. (2013). Cyber security in the smart grid: survey and challenges *Comput. Network., 57* (5) (2013), pp. 1344-1371. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.017

Wasumwa, S. (2023). Safeguarding the future: A comprehensive analysis of security measures for smart grids. *World* journal *of advanced research and reviews, 19* (01), pp. 847-871. https://wjarr.com/sites/default/files/WJARR-2023-1387.pdf

Wollman, D., FitzPatrick, G., Boynton, P., Nelson, T. (2010). NIST coordination of smart grid interoperability standards. *CPEM*, pp. 531-532. doi: 10.1109/CPEM.2010.5544388.

Zhang, Z., Babayomi, O., Dragicevic, T., Heydari, R., Garcia, C., Rodriguez, J., Kennel, R. (2022). Advances and opportunities in the model predictive control of microgrids: Part I-primary layer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* Vol. 134. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107411

ON THE USE OF VERTICAL SCREW MILLS FOR THE FINE GRINDING OF ORE

Lyubomir Haynov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, e-mail: glh2001@abv.bg

ABSTRACT. This paper offers an analysis of the main design features of vertical screw mills and the grinding method that takes place in their operational space. A literature review of sources related to the operation of these machines is made. Due to the lack of a coherent methodology for determining the power of their engines, an attempt is made to create a simplified one. The same methododlogy is applied to a vertical screw mill used for the fine grinding of gold ores. A computer model of the mill screw is made and the operational problems in the use of these facilities are determined.

Key words: mill, vertical, screw, operation, power.

ОТНОСНО ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ВЕРТИКАЛНИ ВИНТОВИ МЕЛНИЦИ ЗА ФИНО СМИЛАНЕ НА РУДИ

Любомир Хайнов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящата разработка е направен анализ на основните конструктивни особености на вертикалните винтови мелници и начина на смилане, който се осъществява в работното им пространство. Направен е литературен обзор на източници, свързани с експлоатацията на тези машини. Поради това че липсва стройна методика за определяне на мощността на двигателите им, е направен опит за създаване на опростена такава. Същата е приложена върху вертикална винтова мелница, използвана за фино смилане на златни руди. Направен е компютърен модел на винта на мелницата и са определени експлоатационните проблеми при използването на тези съоръжения.

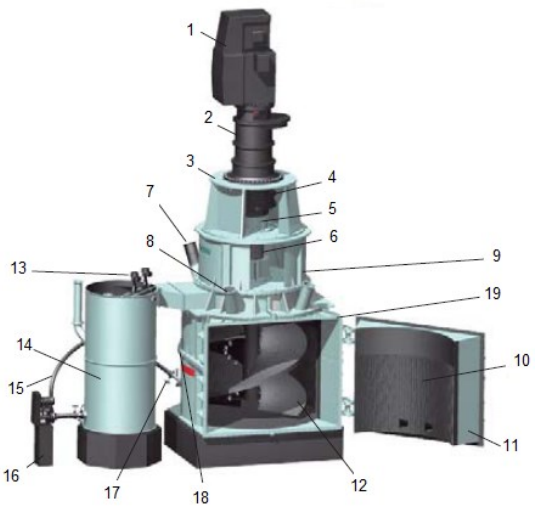
Ключови думи мелница, вертикална, винт, експлоатация, мощност**.**

Въведение

Най-често срещаните смилащи съоръжения традиционно са хоризонталните барабанни мелници. Основна част от тяхната трансмисия е задвижващият вал, който е неотменна съставна част от всички механизми за предаване на ротационно движение (Пулев и Тонкова, 2017). Много често е необходимо да се знаят: точната геометрия на вала, видът и характерът на натоварването, факторите на кинематичното въздействие, работните температури, видът на използвания материал, приложената химико-термична обработка, качеството на повърхнините (Тонкова, 2018; Tonkova and Pulev, 2021). Напоследък, обаче, това оборудване, по своите технически характеристики, вече не може напълно да отговаря на световните тенденции на пазара особено когато трябва да се постигне свръх фино смилане. Поради бързото нарастване на цените на енергията и ниският к.п.д. на барабанните мелници, в минната индустрия все повече се работи за въвеждане и използване на нови технологии и машини, каквито са вертикалните винтови мелници (Фиг. 1.). Днес за най-модерното оборудване в тази област се разполага с вертикални мелници, които вече са придобили световно признание като енергоефективни смилащи съоръжения. Тези машини могат да са с инсталирана мощност до 6 MW, да смилат до класа от 20 микрона и по-ниска. Такава мелница с мощност 3,3 MW и е в състояние да изпълнява задачите на топкова мелница с мощност на двигателя повече от 5 MW. Основните възли на вертикалните винтови мелници са показани на фигура 1.

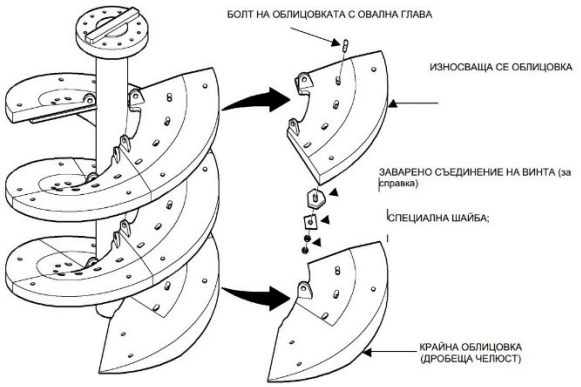
Основни конструктивни особености на вертикалните винтови мелници.

Вертикалните винтови мелници (Фиг. 1) се състоят от двигател 1, задвижващ редуктора 2, монтиран върху основата 3. Редукторът е свързан със задвижващия вал 6 посредством съединителя 4. Задвижващият вал, на който е монтиран шнекът 12, е лагеруван на лагер 5 и е поставен съответно в горната 9 и долната 19 част на корпуса на мелницата. Долната част на корпуса определя работното пространство на машината и е оборудван с вратата 11 и дюза за ниво на пълнежа 18 . За да бъдат предпазвани от износване корпусът и вратата са облицовани с магнитни облицовки 10. Материалът за смилане постъпва в работната камера през тръбата 7, а металните топки с размери от 20 – 25 mm, с които е пълна работната камера, се подават през тръбата 8. Към корпуса на мелницата се свързва сепарационната бака 14 чрез циркулационната тръба 17. Циркулацията се осъществява от помпа 16 през шланг 15 и изпълнителен механизъм 13.



Фиг. 1. Основни възли на вертикална винтова мелница

Смилането в работната камера се осъществява чрез стриване на материала между стоманените топки, чието движение се обуславя (издигане и разбъркване) от въртящия се вал с монтиран шнек (Фиг. 2).



Фиг. 2. Задвижващият вал с шнек

Смилането се предшества от процеса раздробяване. До каква степен да се провежда раздробяването се определя от изискванията за размера на крайния продукт от раздробяването (Иванова, 2018). Двата процеса осигуряват необходимата подготовка на материалите за различни производствени и промишлени приложения.

Повечето вертикални винтови мелници се използват за фино смилане и повторно смилане на концентрата. Стандартната финост на готовия продукт след смилане е приблизително 20-30 микрона. За по-фино смилане могат да се използват вертикални пръстови мелници с разбъркване на работна среда от типа SMD.

На практика, производителността на една такава мелница може да надвиши 500 t/h. Дизайнът на тези машини е доста прост и се състои само от няколко основни елемента, които могат значително да намалят средствата за поддръжка.

Тъй като процесът на смилане не включва взаимен контакт на удар между материал и облицовката, работната среда вътре във вертикални винтови мелници претърпява по-малко износване и запазва формата и характеристиките си.

Допълнителен фактор за повишаване на ефективността на инсталацията е използването на топчета с по-малък диаметър в мелницата. Процесът на смилане в такава мелница не изисква големи среди за смилане, което позволява по-фино смилане. Дори и най-малката промяна в диаметъра на смилащата среда може значително да повлияе на общата площ на смилане (Таблица 1).

Таблица 1

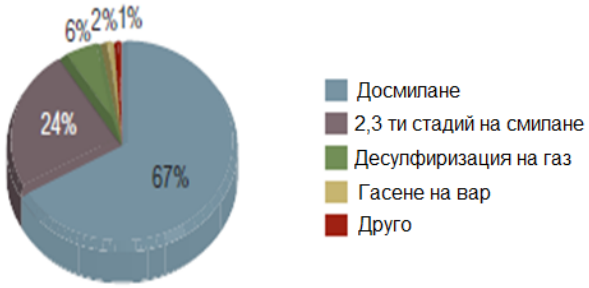
Размери на мелещите тела, [mm]	Контактна площ, [m^2/t]	Количество на мелещи тела на тон
50	33,3	4244
40	41,7	8289
30	55,6	19649
20	83,3	66315
15	111,1	157190
10	166,7	530516
5	333,3	4144132
3	555,6	19648758
2	833,3	66314560

При обработката на различни видове руди, икономията на енергия от използването на вертикални винтови мелници нараства с 35–40% в сравнение с традиционните топкови мелници.

Вертикалните винтови мелници имат и много допълнителни предимства. Те не само намаляват експлоатационните разходи, но и намаляват въглеродните емисии. Следователно използването на съвременни мелници от този тип значително намалява въздействието върху околната среда на преработвателното предприятие.

В допълнение, тези мелниците са по-издръжливи и имат високо ниво на безопасност при експлоатация.

Графика, показваща използването на технология с вертикални винтови мелници, е показана на фигура 3. Към 2020 г. са монтирани приблизително 500 мелници от този тип. Това оборудване е най-широко представено в Австралия, Северна и Южна Америка в предприятията за преработка на злато, черни и цветни метали в цикъла на рудата, регенериране и спомагателни процеси. В България първите две такива машини са доставени в обогатителната фабрика на „Дънди Прешъс Металс Крумовград“ – АД и се използват в процеса на обогатяване на златна руда.



Фиг. 3. Схема показваща използването на вертикални винтови мелници към 2020 г.

Обзор на известните литературни източници, свързани с работата на вертикалните винтови мелници

В (Broek, 1988) се прави качествен анализ на прогнозирането на износването на винтовата облицовка на вертикални винтови мелници с метода на дискретните елементи.

В (Mazzinghy и др., 2015) е направен експеримент за смилане на желязна руда посредством вертикална винтова мелница. Получените резултати от ситовия анализ са обработени с компютърни програми чрез които са получени съответните гранулометрични характеристики.

Дъглас Мезингли в (Mazzinghy и др., 1981) провежда симулационно изследване на вертикална винтова мелница с цел да получи и сравни енергоразхода на мелницата с този на барабанна топкова мелница. Полученият резултат показва, че съотношението е 1,35 пъти в полза на вертикалната винтова мелница.

В (Mazzinghy и др., 2015) е направен опит да се намери връзка между износването на работното колело (винта) и мощността на вертикалните винтови мелници, а в (Esteves и др., 2021) е направено прогнозиране на разходите за поддръжка като функция от износването на винта.

В (Radziszewski и Moore, 2017) се установява, че ефективността на смилане с вертикални винтови мелници се подобрява при поддържане на постоянно пълнене, докато намалява когато се работи при фиксирана мощност на мелницата. Тези резултати насърчават потенциалното увеличаване на скоростта на мелницата, за да се компенсира загубата на мощност и по този начин производителност, с износване на винта им.

Маруф Хасан в (Hasan и др., 2021) показва и анализира резултата от поредица от тестови експерименти, извършени във вертикална винтова мелница с разбъркване, с цел оценка влиянието на параметрите върху разпределението на размера на частиците на продукта и образуването на фини частици.

В (Thoesen и др., 2018] е направен симулационен модален анализ на винтово задвижване в гранулирана среда, като са показани резултати за необходимата аксиална сила.

В (Hasan и др., 2018) е направена симулация на разпределението на частиците по размери на смилания продукт, свързващ мощността на мелницата с времето на престой на частиците и е разработен и приложен модел за прогнозиране на реакцията на мелницата при различни работни условия.

В (Ntsele и Allen, 2018) подробно са описани методологиите и стратегиите, които могат да бъдат приложени за оценка и намиране на оптимални решения за подобряване на смилането с разбъркване и различните приложения на концентраторите (сепарационни баки).

Анализирайки направеният литературен обзор е видно, че повечето публикации засягат предимно технологичните параметри на вертикалните винтови мелници, а липсва методика за определяне на технически параметри като скорост на винта, въртящ момент и мощност на двигателя на мелницата.

Определяне мощността на двигателя на вертикалните винтови мелници

Поради липса на методика за определяне на инсталираната мощност на тези мелници, се търси известно съоръжение, което да прилича на вертикалната винтова мелница. По конструкция този тип машини приличат най–много на верикален винтов транспортьор, тъй като действието на винта е да издига пълнежа на мелницата подобно на действието на тези транспортьори. В (Аспарухов, 1982) е показн приблизитерен метод за изчисляване на винтов транспортьор, който приложен към вертикалните винтови мелници изглежда по следния начин:

Определяне площа на издигания материал.

$$F = k_P \frac{\pi\left(D^2 - d^2\right)}{4}, m^2 \quad (1)$$

където D, m и d са външният и вътрешен диаметър на винта, а k_P е коефициент на запълване на работната камера на мелницата.

Определяне на скоростта на издигане на пълнежа на мелницата

$$v = S.n,\ m/s \quad (2)$$

където S, m и е стъпката на винта, а n, s^{-1} е честотата на въртене на винта на мелницата.

Определяне количеството издиган пълнеж на мелницата за час.

$$Q = 3600\rho.v.F.k_H,\ t/h \quad (3)$$

където $\rho,\ m^3/t$ е плътност на пълнежа на мелницата, а k_H е коефициент, зависещ от ъгъла на наклона на винта на мелницата (Таблица 2).

Таблица 2

$\alpha,^0$	5	10	20	30	40
k_H	0,9	0,8	0,7	0,65	0,5

Определяне на необходимата мощност на двигателя на мелницата.

$$N_{ДВ} = \frac{Q\left(L_B.k_C + D\right)}{360.\eta_M},\ kW \quad (4)$$

където k_C е коефициент на съпротивление на пълнежа на мелницата (Таблица 3), а L_B е работната височина на винта на мелницата и η_M е к.п.д. на задвижването на мелницата.

Таблица 3

Материал	Дървени трици	Въглища	Руди скали
k_C	1,2 – 1,4	2,1 – 2,3	4 - 5

Тази методика бе приложена върху вертикалните винтови мелници, използвани в ОК „Ада Тепе“ и резултатите, направени посредством електронна таблица на EXEL са показани на таблица 4.

Таблица 4

Диаметър на винта, m	2,705
Диаметър на вала, m	0,4
Работна дължина на винта, m	3,182
Честота на въртене на винта, 1/s	0,466
Плътност на пълнежа, t/m3	4,9
Коефициент на запълнение на работната камера	0,8
Ъгъл на наклона на винта, deg	22
Площ на сечението издиган материал, m3	4,4946117
Скорост на движение на винта, m/s	0,49427066
Коефициент на съпротивление на материала	4
КПД на задвижването	0,9

Стъпка на винта, m	1,06066666
Коефициент, зависещ от ъгъла на наклона на винта	0,71
Брой на витките на винта	3
Количество издиган пълнеж, t/h	6955,90998
Мощност на двигателя, kW	845,529503

Изводи

Получените резултати за мощността на мелницата са близки до действителните (получената мощност на двигателя е 845 kW, а в действителност мелницата е оборудвана с двигател с мощност 925 kW), което показва, че методиката може да бъде използвана за първоначални исчисления при проектирането на този тип машини.

Литература

Аспарухов, К. (1982). *Подемно транспортни машини*, Техника, София.

Иванова, М. (2018). Влияние на зърнометричния състав върху избора на ножове за двувалов шредер, раздробяващ бетон, гума, пластмаса и дърво, *Научна конференция НВУ „В. Левски“, гр. В. Търново, 2018*. ISSN: 2367-7473, p. 651-655.

Пулев, С., Г. Тонкова. (2017). Изследване на напречните трептения на валове, използвани в тежката минна механизация. *Специализирано периодично списание „Геология и минерални ресурси“,* ISSN: 1310-2265, стр. 19-22.

Тонкова, Г. (2018). Изследване на якостно-деформационното състояние на динамично натоварен вал. *Академично списание „Индустриални технологии“*, ISSN: 1314-9911, том V (1), Бургас, стр. 70-77.

Broek D. (1988). The practical use of fracture mechanics. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, The Netherlands.

Dactoly, J.C. (1981). *L’extraction en carrier au cable diamante*, Le Mausolee, 1981.

Esteves, P. M., D. B. Mazzinghy, M. Hilden, M. Yahyae, M. S. Powell, R. Galéry,. (2021). An alternative strategy to compensate for screw wear in gravity induced stirred mills, *Powder Technology*, 379 (2021), p 384-392.

Esteves, P. M., D. B. Mazzinghy, R. Galéry 1 and Luís C. R. Machado. (2021). Industrial Vertical Stirred Mills Screw LinerWear Profile Compared to Discrete Element Method Simulations*, Minerals* 2021, 11, p 397.

Hasan, M., Sam Palaniandy, Marko Hilden, Malcolm Powell. (2017). Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill, *Minerals Engineering 111* (2017), pp. 229–237.

Hasan, M., S. Palaniandy, M. Hilden, M. Powell. (2018). Simulating product size distribution of an industrial scale VertiMill® using a time-based population balance model, *Minerals Engineering 127* (2018),p 312–317.

Mazzinghy, D. B., C. L. Schneider, Vl. Alves, R. Galéry. (2015). Vertical mill simulation applied to iron ores, *Journal of Materials Research and Tehnology,* 4(2), pp. 186-190.

Mazzinghy, D. B., C. L. Schneider, Vl. Alves, R. Galéry. (2015). Vertical Agitated Media Mill scale-up and simulation, *Minerals Engineering 73*, pp. 69–76.

Mazzinghy, D. B., P.M. Esteves, D.T. Faioli, K.H. Andrade, F.S. Ribeiro. (2018). Qualitative analysis of the screw liner wear prediction in vertical stirred mills by the discrete element method, *11th International Comminution Symposium* - April 16-19, 2018, Cape Town, South Africa.

Ntsele, C., J. Allen. (2012). Technology Selection of Stirred Mills for Energy Efficiency in Primary and Regrinding Applications for the Platinum Industry, *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Platinum* 2012.

Radziszewski, P., A. Moore, Understanding the effect of pressure profile on stirred mill impeller wear, *Minerals Engineering* 103-104 (2017), p 54–59.

Thoesen, A., S. Ramirez and H. Marvi. (2018). Screw-Powered Propulsion in Granular Media: An Experimental and Computational Study, 2018 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* May 21-25, 2018, Brisbane, Australia.

Tonkova, G., S. Pulev. (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, pp. 165-167.

СЕКЦИЯ

УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ НА МИНЕРАЛНО-СУРОВИННАТА ИНДУСТРИЯ

SECTION

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE MINERAL AND ROW MATERIAL INDUSTRY

SECURITY AND SAFETY IN THE WORKPLACE

Yosif Antonov

Dundee Precious Metals Krumovgrad, 6900 Krumovgrad; Email: yosif.antonov@dundeeprecious.com

ABSTRACT: This work presents innovative methods that consider the main approaches in the mining industry affecting health, safety, security, and the environment (HSSE). Five stages are described, that provide a theoretical and visual solution for HSSE, for which the management of mining and processing enterprises invest huge financial resources. Compliance with the legislative and regulatory acts of the respective country in which the investment and development of the activity is carried out plays a fundamental role for prosperity. After the introduction of innovative methods consistent with the stages for improving energy reserves, operational safety, competencies, and skills to manage safely and profitably, environmental protection and social services, values, good relations with the local population and communities where the company is located are of key importance.

Keywords: security, health and safety, workplace, regulatory documents, sustainable development.

СИГУРНОСТ И БЕЗОПАСНОСТ НА РАБОТНОТО МЯСТО

Йосиф Антонов

Дънди Прешъс Металс Крумовград, 6900 Крумовград

Резюме: Разработката представя иновативни методи, които разглеждат основните подходи в минната индустрия, засягащи здравето, безопасността, сигурността и околната среда (ЗБСОС). Описани са пет етапа, които дават теоретично-визуално решение за ЗБСОС, за които управлението на минно-добивните и преработвателни предприятия инвестира огромни финансови средства. Спазването на законодателните нормативни актове на съответната държава, в която се инвестира и развива дейността, изпълняват основна роля за просперитета. След въвеждането на иновативни методи, съобразени с етапите за подобрение на енергийните запаси, експлоатационната безопасност, компетенциите и уменията да управляват безопасно и доходоносно, опазването на околната среда и социалните услуги, ценностите, добрите отношения с местното население и общности, където е позиционирана компанията, са от ключово значение.

Ключови думи: сигурност, здраве и безопасност, работно място, нормативни документи, устойчиво развитие.

Въведение

Въвеждането на нови модерни технологии в основните дейности в минната индустрия, както и усъвършенстването им в посока безопасни условия на труд – здраве, безопасност, сигурност и околна среда (ЗБОС) – ще подобрят технологичните процесите.

Описани са решения в следните пет области, в които се наблюдават проблеми по отношение на ЗБСОС, а именно:

1. управление на енергията;
2. дейности от разстояние;
3. експлоатационна безопасност;
4. запазване на умения, компетенции и познания в екологията;
5. социално съответствие.

Много проблеми в минната индустрия могат да бъдат решени чрез ефективно прилагане на съвременни технологии.

Представяне на решенията чрез иновативни методи

Петте разгледани дейности са примери, при които иновативните технологии могат да подобрят производителността и да минимизират риска. Необходимо е минната компания да ангажира технологични партньори с подходящ опит, за да представи и усъвършенства правилните решения за здравето, безопасността, сигурността и околната среда от проектирането до пълното внедряване в процесите. Този партньор трябва да бъде добре запознат с най–подходящите за нуждите приложения и инструменти, както в управлението на проекти, така и относно необходимите подобрения в процеса на работа. Това гарантира, че ЗБСОС отговарят на решенията за дейностите и води до желани резултати. Все още има дейности, които минните компании трябва да усъвършенстват, за да подобрят способността за защита на персонала и опазване на околната среда.

Управление на енергията

Световната икономика се нуждае от постоянно нарастващи количества енергия, за да поддържа икономическия растеж, да повиши жизнения стандарт и да намали бедността. Днешните тенденции в използването на енергия не са устойчиви, тъй като глобалното население расте и икономиките стават все по–индустриализирани, а невъзобновяемите енергийни източници ще стават все по-скъпи и по–оскъдни. Необходимо е:

- индустрията да проектира и изгражда възобновяеми източници за собствени нужди
- да използва изкуствения интелект – роботи;
- мобилното оборудване да преминава поетапно към електрическа енергия;
- изграждане на станции за зареждане от собствени източници.

Иновативни инвестиционни проекти – финансиране. Минните дейности са значителни потребители на енергия. Независимо от добивания материал или вида на операцията, всяка фаза на работа изисква енергия под някаква форма. Като цяло индустрията е подложена на вниманието на правителствените и неправителствени организации поради дела си в потреблението на енергия. Например, Южноафриканският департамент по минерали

и енергетика съобщава, че рудодобивът консумира 6% от цялата потребена в Южна Африка енергия. Огромното минно предприятие *VALE* е най-големият потребител на енергия в Бразилия с близо 4% от енергийното потребление за страната. Добивната промишленост на САЩ е с 3% от потреблението на енергия в индустрията на страната. Според доклад, публикуван от Министерството на енергетиката на САЩ и Службата за енергийна ефективност и възобновяема енергия, на американските минни предприятия се падат приблизително 17% от общите разходи за доставки на енергия. Тези проценти могат да се считат за приблизителни за потреблението на енергия за минни дейности и в много други части на света. Около 1/3 от енергийната потребност за системите за трошене, смилане, обезводняване и вентилация се използва електрическа енергия. За нужната енергия за транспортиране и извозване се използват мазут и дизел. За останалата част от дейностите се използват природен газ и въглища. Необходимостта от рентабилна енергия представлява постоянен проблем за решаване от минните предприятия. Тъй като невъзобновяемите енергийни източници стават все по–оскъдни и минните компании се преместват във все по–отдалечени места, е необходимо управата да намери иновативни методи да произвежда и достави достатъчно енергия от правилния тип, за да си позволи непрекъснат технологичен процес на работа .

Иновативни методи за решаване на проблемите с енергоносителите. Тази дейност може да бъде реализирана чрез увеличаване на енергийната ефективност и чрез използването на възобновяеми източници на енергия, където е възможно. Вече има изградена смарт инсталация за закупуване на зелена енергия от енергоразпределителните дружества, използват се електромобили в подземен рудник Челопеч. Такъв ресурс може да се изгради по фасадната част (стени и покриви), по незаетите части от инфраструктурата със стабилна основа, които не се използват за производствени цели, дори и по стената на територията на рудник или производствена площадка – след поредица измервания със сеизмограф за устойчивостта на пластовете.

Всяка голяма компания може да премине към стратегия за възобновяеми източници на енергия чрез инвестиционни проекти, подпомагани от правителството на дадената страна, и изграждане на фотоволтаично поле от минната компания след приключване на дейността – безвъзмездно предоставено на местната власт за последващо използване и поддръжка. За преобразуване на слънчевата енергия в електрическа е необходимо за се избере място с голям брой слънчеви часове. С други думи, решението за управление на енергията вероятно ще бъде специфично за определено място и със сигурност ще бъде повлияно от икономическите и правителствени условия. Има енергийни корпорации, специализирани в устойчиви и енергийноефективни решения в индустриален мащаб, базирани на доказани и търговски жизнеспособни технологии. Тези решения се съчетават с познанията ни за минния сектор и с експертизи в изпълнението на програми, осигуряващи иновации, необходими за създаването на възобновяеми енергийни източници в минните обекти и за осигуряване на енергийната ефективност в работните и технологични процеси.

Дейности от разстояние

От гледна точка на бизнеса и безопасността, минните предприятия стигат до ключови заключения, че чрез автоматизация и роботизация на някои дейности може да се намали използването на човешки труд, което е обективна предпоставка за повишаването на безопасността. Компаниите търсят начини да намалят до минимум броя на работниците и служителите, активно работещи на територията на дадена мина, като същевременно приоритизират прилагането на правилните умения на точното място в точното време. Последната точка може да представлява значително предизвикателство. Специалистите с необходимите компетенции в минните проекти обикновено се разделят на три групи:

- голяма група от опитни минни инженери, геолози и проектанти;
- по–малка група от квалифицирани технологични оператори, които нямат практически опит в свързаните с минното дело дисциплини;
- много малка група от работници и служители, които притежават и двата вида умения.

Може да се очаква, че третата категория работници и служители е изключително търсена както между компаниите, така и в рамките на едно предприятие. Тези работници и служители лесно могат да бъдат изгубени, докато прекарват време в пътуване от рудник към рудник на една компания или към обекти на друга компания, предлагаща иновативни методи за решения в областта на пътуванията.

Автоматизиране и роботизиране на процесите, като иновативни решения. С намаляване броя на младите квалифицирани работници и служители е важно да се вземат най-добрите решения за тази дейност. Например, автоматизирането на всички или на част от определени работни процеси може да помогне за намаляването на уменията и компетенциите, необходими на дадено място или за изпълнението на определена дейност. Централизирането на уменията и компетенциите с най-голямо търсене и след това свързването им чрез уеб-базирани комуникационни канали може да позволи на един експерт да обслужва множество обекти за добив от едно място (смарт център, автоматизирани средства за управление на технологичните процеси, или АСУТП). Към специфични операции, където уменията са ограничени, може да се приложи модел за споделени услуги. Цели отдели могат да бъдат изнесени на места с достатъчно квалифицирани работници и служители.

Експлоатационна безопасност

През последните години минните кризи се случват в по-голяма или в по-малка степен на места без утвърдени процедури за безопасност. Сред най-сериозните кризи може да се посочат следните:

- м. февруари 2024 г., Турция: 43 миньори са затрупани в златна мина след свличане на земна маса поради продължителни проливни дъждове;
- м. април 2022 г., Сърбия: във въгледобивна мина има пострадали над 20 миньори без опасност за живота им;
- м. ноември 2021 г., Сибир, Русия: в мина загиват 45 миньори и спасители;

- м. ноември 2015 г.: край гр. Брумадиньо, собственост на VALE, загиват 99 миньори, а 259 миньори са в неизвестност след скъсване на стена на хвостохранилището на компанията;
- м. ноември 2015 г.: при подобен инцидент в мина, собственост на Vale, близо до гр. Мариана загиват 19 души;
- м. януари 2011 г.: 21 загинали и ранени работници при експлозия на въглищни мини;
- м. октомври 2010 г., Чили: в златно-медна мина са спасени 33 работници, след като са били затрупани под земята в продължение на два месеца поради пропадане;
- м. юни 2010 г.: в колумбийска въглищна мина 70 работници са убити след експлозия на газ ;
- м. април 2010 г., Западна Вирджиния, САЩ: 29 миньори загиват при експлозия;
- м. януари 2010 г., провинция Хунан, Китай: 25 миньори загиват при пожар в мина.

Оперативната безопасност се състои от редица дейности за управление на безопасността, здравето, сигурността и околната среда.

По време на експлоатацията на мината, от изграждането на добивната площадка до правилната работа на технологичното оборудване, е необходимо да се прилагат подходящи методи по предварително утвърдени процедури. На ниво предприятие оперативната безопасност се ограничава от четири стратегически фактора (повишен регулаторен фокус, демография на работната сила, организационна култура и оперативен натиск), а ръководството в минната индустрия трябва да отговори на ключови въпроси във връзка с програмите за безопасност, като:

- Как да се премине към по-последователни, устойчиви и безопасни дейности?
- Кое е „правилното“ ниво на стандартизация, за да се позволи гъвкавост в зависимост от местоположението?
- Какъв е най-добрият подход за ангажираност и задействане на оперативни звена в процеса на работа и при промени на работното място?

Идентифицирани са три основни предизвикателства, които оказват влияние върху ефективността на процедурите и системите за оперативна безопасност:

- текущо преминаване на служители и изпълнители от един минен обект в друг и от една дейност в друга;
- централизирано наблюдение на големи и отдалечени райони в реално време;
- интелигентен мониторинг, за да се избегне претоварването с информация и сигнали за фалшива опасност.

Необходимо е да се осъществява наблюдение на операциите в опасни и високорискови зони както в пилотна, така и в реална среда. Когато възникне извънредна ситуация, комуникационната система трябва да предоставя изчерпателен поглед в реално време на ситуацията, за да максимизира човешкото оцеляване, да запази оборудването и да сведе до минимум финансовото въздействие. Системата трябва да е програмирана за:

- предоставяне на точна информация в правилния формат на точния служител в точния момент;
- ефективно изпращане на първите реакции, където и когато са най-необходими;
- бързо и точно приключване на разследването след инцидента.

Умората на работниците и служителите представлява допълнително предизвикателство за безопасността при работа. Метеорологичните условия, работните места с много повтарящи се задачи и промените в модела по време на смяна са примери за фактори, които могат да увеличат умората на работниците и служителите, което от своя страна може да увеличи оперативните грешки, тъй като персоналът е по-малко бдителен и по-склонен към вземане на грешни решения.

Метод за решаване подобряване на експлоатационната безопасност. Ангажиментите за оперативна безопасност позволяват да се идентифицират четири ключови водещи добри практики, които могат значително да подобрят процедурите за безопасност в едно предприятие. Крайният резултат от тези практики е програма за оперативна безопасност, която се състои от:

1. ясни изисквания;
2. оперативна видимост и прозрачност;
3. систематично управление на риска;
4. зряло управление и устойчивост.

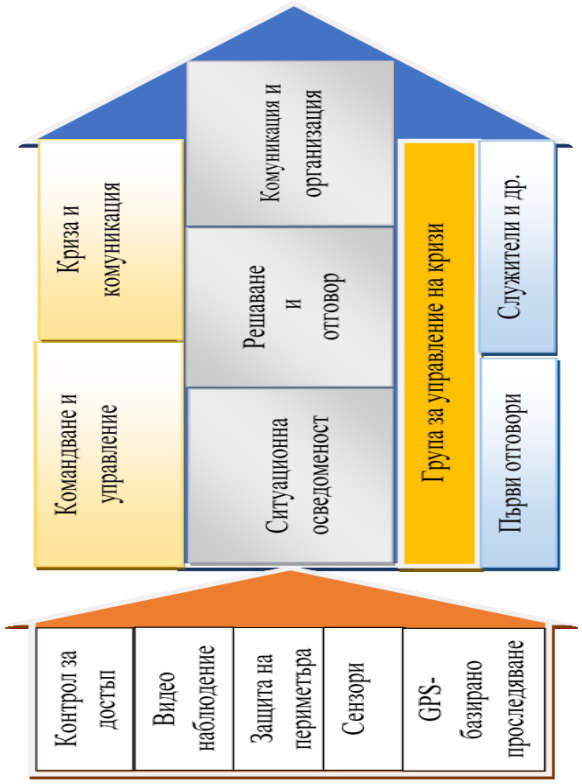
Тези области се проследяват най-добре последователно, което означава, че пускането им в действие е стъпаловидна прогресия от първата практика към четвъртата.

Необходимостта от комуникация и наблюдения на местоположението на работниците и служителите в рудниците е призната от минните организации, както и от държавните регулатори. Тази необходимост обхваща превенцията (текущ мониторинг на работници и служители и оборудването в реално време), както и реагирането при извънредни ситуации. Например, в законодателството Законът за подземните богатства задължава разработването на аварийни комуникации и механизми за проследяване (Аварийни планове). Системите за комуникации и мониторинг трябва да са подходящи за мина/рудник: например, системата в подземните мини трябва да работи както над, така и под земята, като същевременно да поддържа мобилност. Необходимо е да се вземе предвид обхвата на оборудването и мрежовите възможности и да се определи най-подходящото решение за конфигурацията на мините операции и дейността на персонала. Това изисква мултидисциплинарно планиране и изпълнение.

За пълното решение на проблема и за оперативната безопасност се разчита на ефективната комбинация от работници, служители, процес и технологии на място, както и на безпроблемната интеграция на множество системи от различни доставчици (фиг. 1).

Управлението на свързаните с умората оперативен риск може да бъде значително подобрено чрез технологични инструменти. Например, може да бъде внедрен софтуер за оценка на риска, за да помогне той на ръководството да определи състоянието на работници и служители в рудниците, така че да бъдат премахнати опасностите, свързани с умората. Бдителността на работниците и служителите също може да се измерва и наблюдава с помощта на автоматизирани системи, като наблюдение на задачите на място и биометрично измерване. Въз основа на нашите познания за минните операции, както и въз основа на съответния опит в други

индустрии, добре е да се включат подходящите съвременни технологии в съществуващите системи и процеси в минната индустрия, като напр. внедряване на изкуствен интелект.



Фиг. 1. Компоненти и функции на ефективно решение за мониторинг на безопасността.

Запазване на умения, компетенции и съхраняване на знания.

Недостигът на умения и компетенции в миннодобивната и преработвателна индустрия е добре документирана дейност и е част от проблемите на ЗБСОС. Броят на работниците и служителите, които навлизат в индустрията, е недостатъчен, за да се запази общият брой на работната сила. Опитът, придобит от години в тази област, може да изчезне заедно с опитните служители, които поддържат рудника безопасен. Липсата на правилни умения на правилното място увеличава рисковете при вземането на решения в рудника.

Чрез технологичните решения трябва да се обърне внимание на следните два фактора:

Запазване на организационните знания и компетенции. Минната индустрия се характеризира с големи и сложни дейности и много от тях са преместени на нови места или се добива по-дълбоко за по-нискокачествени материали. В същото време компаниите не са възприели принципа за съхраняване на знанията, придобити на минни обекти. Това довежда до „корпоративна амнезия“, която поне отчасти е отговорна за инциденти в мини.

Фирми, основани на компетентността. Едно–единствено решение, основано на недостатъчен опит, може да изложи на сериозен риск минния персонал и дейност. Освен това може да навреди и на най-утвърдения бизнес. Без стратегия, която да гарантира, че се използват правилните способности – т.е. да се определи кой ще работи в мината и в качеството си на какъв – решенията за персонала могат да бъдат по-малко сигурни и да изложат на риск минните дейности.

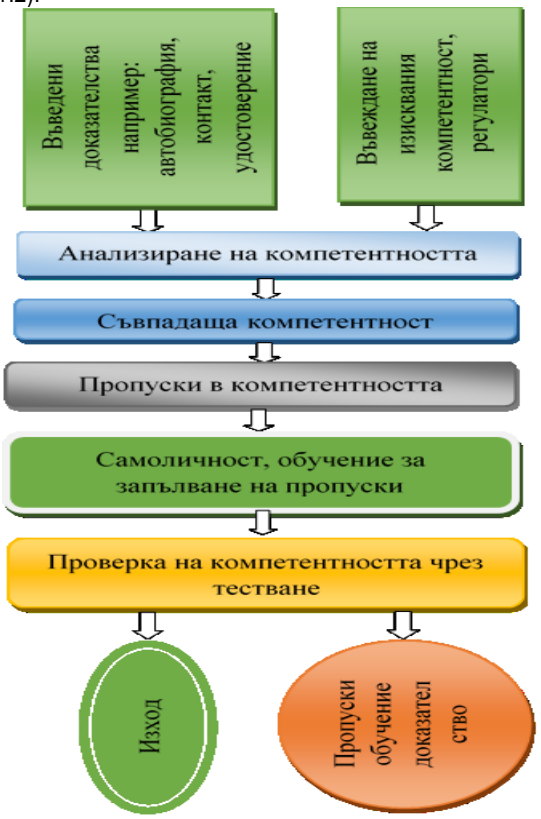
Методи за управление на кризи. Предотвратяването и управлението на кризи може да бъде подкрепено от редица технологични решения. По отношение на горните два фактора, решенията могат да бъдат:

Привличане и повторно използване на организационно обучение и организационни знания. Чрез осигуряване на достъп до официалната документация, базирана на облак, организациите могат да внедрят нужните технологии. Това ще спомогне за разсейване на корпоративната амнезия, която би влошила безопасността.

Управление на риска, основан на компетентности. Управлението на риска е необходимо да бъде сведен до минимум чрез:

- лесен достъп до информацията за компетентността на отделните изпълнители;
- тестване на служителите и изпълнителите за знанията и способностите, необходими за изпълнение на дейностите им на работното място;
- идентифициране на индивидуални пропуски в подготовката на служителите;
- процедури за докладване, при изпълнението на задачите от всеки служител се съпоставя с приемлив риск.

Тъй като условията на работното място могат да се променят, проверката на уменията трябва да се извършва периодично както за служителите, така и за изпълнителите (Фиг.2).



Фиг. 2. Процес на управление на риска, базиран на компетенции.

Консултантите от специализираните предприятия за управление на знанията имат опит във всички форми на събиране на информация и повторно използване на

знанията и компетенциите. Официалната документация, както и част от ключовите експерти, могат да бъдат достъпни в цялата организация чрез уеб или облачна инфраструктура. Системата гарантира, че ролите се изпълняват от квалифицирани лица и че уменията се обновяват редовно.

Съответствие с околната среда и социално съответствие

Защитата на природните ресурси и околна среда е ключова цел на регулаторните органи във всеки регион по света. Екологичните норми, касаещи минните дейности, продължават да се увеличават и обхващат всички аспекти за опазването на земята, водния баланс, флората и фауната, намаляване на шума и замърсяването на въздуха. Това е породено от факта, че *добивните дейности непрекъснато се преместват във все по-отдалечени места*. Подобренията в технологиите – например по-усъвършенствано събиране на данни и повишаване разширяване използването на безжичните комуникации – подобряват количеството, точността и скоростта на достъп до информацията, достъпна от минните обекти. Промените подтикват регулаторните институции да увеличат изискванията за информация и докладване.

Социалното съответствие също е важен фактор за околната среда. Местните заинтересовани страни представляват мощна сила, която може да подкрепи или да унищожи успеха на минното предприятие. В сравнение с компаниите, които намират, доказват и след това продават терени, минните компании искат да закупят площи с доказани залежи и ресурси, които са икономически осъществими от гледна точка на бизнеса, т.е. да влязат в експлоатация възможно най-бързо, за да минимизират разходите за финансиране. Всички фактори, които биха могли да забавят процеса на добив и преработка, оказват неблагоприятно влияние върху икономическата жизнеспособност на. минните дейности. Следователно, дори на даден терен да има доказан и жизнеспособен залеж и ресурс, наличието на социално-политически пречки може да спре планираната дейност. Накратко, компаниите от типа „намиране и продажба“ имат различни стратегии от онези от типа „намиране и експлоатация“. От първата група компании не се изискват инвестиции в социални услуги, за разлика от втората Търсенето и предлагането също оказват влияние:

- когато цените на минералите са високи и терените са оскъдни, купувачите са по-склонни да поемат разходите за справяне с предизвикателствата в отношенията със заинтересованите страни;
- когато цените на минералите са ниски или терените са в изобилие, купувачите могат да бъдат по–селективни.

Прилагане на иновативен метод за решаване. Прилагането на екологични и социални претенции изисква като основна бизнес стратегия задължителното включването на практики за устойчивост. Устойчивостта трябва да бъде ключов фокус през целия жизнен цикъл на даден обект, от анализа на осъществимостта на находищата до рекултивация на мините. На съвременния пазар устойчивите компании са тези, които не оказват отрицателни въздействия върху околната среда, общността и икономиката в областите, в които функционират, и поради своите практики придобиват допълнителна акционерска и конкурентна стойност. Ако бъдат изпълнени ефективно, стратегическите инвестиции в устойчивост могат да бъдат силни двигатели на растежа и рентабилността. Въпреки, че „спазването“ може да бъде първоначалната цел за прилагане на практики за устойчивост, резултатите надхвърлят регулаторните рамки. Например, мониторингът на сайтовете за социални мрежи е в състояние да определи проблеми или дейности, които могат да окажат неблагоприятно въздействие върху даден проект; така че в резултат може да се въведат активни мерки за предотвратяване на кризи.

Устойчивостта на бизнеса, проявена като решения на относно ЗБСОС, съчетава хора, процеси и технологии за постигане на стратегически цели и намаляване на рисковете. Тя е продължаващ процес и позволява постепенно да се идентифицират конкретни програми и проекти за дадена дейност. Автоматизацията играе важна роля в тези проекти както по отношение на събиране на данни, така и на мониторинга на резултатите. Устойчивостта на бизнеса на специализираните компании е стъпковидна. Заедно с глобалната екосистема от партньори и доставчици, специалистите помагат на клиентите да управляват параметрите на околната среда и енергията и да направят икономически ефективни оперативни подобрения. Следователно те подобряват социалните претенции. Рамката следва регулаторните изисквания, въплътени в инструменти като Протокола от Киото, EU ETS, UK CRC и Закона за чистия въздух на планетата.

Заключение

Тъй като глобалните ресурси намаляват, е необходимо компаниите да създават и внедряват иновации, за да са устойчиви. Много дейности от ЗБСОС в минната индустрия произтичат от ограниченията на ресурсите и ефективното използване на съвременни технологии. Разгледаните 5 дейности са примери, при които доказаните технологии могат да освободят критични ресурси, да подобрят производителността и да минимизират риска.

Сами по себе си обаче технологиите не могат да предоставят цялостно решение. Може да се наложи технологичните решения да се персонализират за всеки отделен обект, за да се вземат предвид различните фактори, като вид на добиване и държавни разпоредби.

Човешкото поведение също трябва да се управлява разумно и адекватно, за да се гарантира, че новите процеси и работни потоци са изцяло възприети от персонала.

И накрая, в случаите, когато дадено решение изисква интегриране на множество технологии от редица доставчици, проектирането, внедряването и управлението на промените или актуализациите може да се осъществява чрез собствени дейности.

Имайки предвид тези съображения, минната компания трябва да ангажира технологични партньори с подходящ опит, за да подкрепи и одобри правилните решения. Решенията за ЗБСОС съответстват на дейностите и потвърждават стъпките, които водят до желаните резултати. Сред секторите, обслужвани от

специализираните компании, са петролният и газовият, които до известна степен са сходни на минния сектор. Въпреки че миннодобивните компании извършват много по-широк спектър операции и извличат по-голямо разнообразие от ресурси, те обикновено следват същите работни процеси като нефтените компании. Поради тези прилики може да се ползва опита на специализираните компании в петролната и газова индустрия. Това дава на минните компании достъп до надеждни решения, които могат бързо да се използват в тяхната дейност за справяне с ключовите предизвикателства на съвременния пазар.

В заключение може да се каже, че е необходимо:

1. Да се разработят и актуализират всички етапи по проектиране и управление относно намаляване и поскъпване на невъзобновяемите енергийни източници и преминаване към възобновяеми.
2. Да се преминава плавно към изграждане на полета от възобновяеми енергийни източници (вятърни и фотоволтаични енергийни централи) за собствени нужди и доставка към централната енергийна мрежа, съгласувано с местната власт и съответните държавни институции, отговорни за инспектирането на компаниите.
3. Да се преминава към модернизиране на мобилното оборудване, ползващо невъзобновяеми енергоносители, и към електрическа енергия, и това да се управлява дистанционно чрез изкуствен интелект.
4. Да се изградят зарядни станции от възобновяеми енергийни източници за зареждане на мобилно и стационарно оборудване.

Литература:

https://www.24chasa.bg/mezhdunarodni/article/7274652
https://eur-lex.europa.eu kyoto_protocol
Реформа на схемата на ЕС за търговия с емисии - Consilium.europa.eu https://www.consilium.europa.eu › reform-eu-ets
UK Clinical Research Collaboration https://www.ukcrc.org
https://en.wikipedia.org/wiki/Clean_Air_Act_(United_States).
https://www.gov.za/about-sa/minerals
https://www.energy.gov/eere/about-office-energy-efficiency-and-renewable-energy
US Depart;ent of Labor Mine Safety and Health Administration (MSHA)
Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry
https://en.wikipedia.org › wiki › Vale_S.A.

INNOVATIONS IN THE MODERN APPEARANCE OF MUSEUMS AT THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI" – SOFIA, BULGARIA

Elitsa Zareva, Kamelia Marinova, Valentin Kabadiyski, Stoyan Stoyanov, Kaloyan Blazhev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: elitsa.zareva@mgu.bg; k.y.marinova@mgu.bg; kabadiyskivalentin@gmail.com; stoyan152@gmail.com; k.blazhev@mgu.bg

ABSTRACT. Contemporary trends in museum presentation necessitate the integration of digital technologies, the creation of more attractive and engaging exhibitions, and the implementation of STEAM activities and educational programs. In recent years, museum activities at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” have made significant progress in this direction through the development of virtual tours, the indexing of exhibits via QR codes, the creation of an exhibition featuring luminescent minerals, and the development of digital 3D models of exhibits.

Key words: museum, innovation, exhibits, minerals, fossils.

ИНОВАЦИИ В СЪВРЕМЕННИЯ ОБЛИК НА МУЗЕИТЕ ПРИ МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“ – СОФИЯ, БЪЛГАРИЯ

Елица Зарева, Камелия Маринова, Валентин Кабадийски, Стоян Стоянов, Калоян Блажев

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

РЕЗЮМЕ. Съвременните тенденции в музейното представяне налагат използването на дигитални технологии, създаване на по-атрактивни и ангажиращи експозиции, както и внедряването на STEAM активности и образователни програми. През последните години музейната дейност в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ отбеляза значителен напредък в тази посока чрез разработване на виртуални обиколки, индексиране на експонатите посредством QR кодове, създаване на експозиция с луминесцентни минерали, както и създаване на дигитални 3D модели на образци.

Ключови думи: музей, иновация, експонати, минерали, фосили.

Въведение

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ разполага с три музея, свързани с науките за Земята – Музей на уникалните кристали, Музей по геология и палеонтология и Музей по минералогия, петрография и полезни изкопаеми.

Музеят на уникалните кристали е открит през 2007 г. и е посветен изцяло на минералното богатство на Бразилия – разновидностите на кварца, скъпоценни минерали от района на Минас Жерайс, ахати, декоративни фигури от минерали. Специален акцент са Кристалната и Аметистовата зали посветени на едни от впечатляващите видове кварц – планинският кристал и аметиста.

Другите два музея, свързани с науките за Земята, са Музеят по геология и палеонтология и Музеят по минералогия, петрография и полезни изкопаеми. Те са открити официално през 1961 г. и се разполагат в специално построено за тях крило в рамките на Геологопроучвателния факултет на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“.

Първите колекции в Музея по геология и палеонтология датират още от четиридесетте години на 20-ти век. Той представя няколко основни експозиции – „Палеонтология“, „Исторична геология“, „Структурна геология“, „Геология на България“, както и някои по-малки колекции – „Обща геология“, „Кватернерна геология“. Освен тях в музея се съхраняват и монографични колекции, свързани с научно-изследователската дейност на преподаватели от университета, колекции, посветени на геоложкото наследство на България, както и дарителски колекции.

Музейната колекция на Музея по минералогия, петрография и полезни изкопаеми представя минерали, скали и полезни изкопаеми от над 50 страни от цял свят. Музейният фонд е изключително богат и в него се съхраняват над 13000 бр. образци, подредени в няколко колекции – „Минералогия“, „Петрография“, „Полезни изкопаеми“, „Ювелирни и декоративни минерали“, „Декоративни скали“ (Kostov, 2020). В Музея по минералогия, петрография и полезни изкопаеми се съхраняват личните сбирки от научните изследвания на голяма част от преподавателите в университета, а също така и дарителски колекции.

Иновации

Музеите към Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ имат утвърдена, дългогодишна традиция в сферата на образованието, като активно участват в процеса на обучение чрез представяне на богати експозиции, модерни демонстрационни средства и научно съдържание. Заедно с това те играят важна роля в популяризирането на науките за Земята пред широка аудитория. Чрез тези си дейности музеите допринасят за повишаване на обществената осведоменост относно науките за Земята и тяхното значение.

Цифровите технологии бележат значителен напредък и развитие през последните години. В този смисъл е необходимо да се отчете, че музейната аудитория обхваща широк спектър от посетители с различна възраст и професионална подготовка. Това налага преосмисляне и актуализиране на методите за представяне на информацията с цел музеите да бъдат в съответствие със съвременните тенденции и да осигуряват пълноценен и достъпен образователен ресурс за всички групи посетители (Миладинов, 2024).

Към настоящия момент музеите на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ са внедрили редица иновации, които значително обогатяват музейното преживяване и разширяват обхвата на представените научни дисциплини. Сред нововъведенията са виртуалните разходки в музейните пространства, както и използването на QR кодове за бърз достъп до информация за различните експонати (Зарева, Маринова, 2023). В допълнение, музейният фонд разполага с уникална експозиция с луминесцентни минерали, както и холограмна инсталация, която предоставя един иновативен подход за визуализация на минерални, скални и фосилни експонати. Модернизацията на експозициите е допълнена и с 3D модели на експонати, които позволяват детайлно разглеждане на предметите от различни ъгли. Не на последно място са разработени STEAM приложения, които стимулират активното участие и обучение по дисциплините свързани с науките за Земята.

Виртуални разходки

Виртуалните разходки са изключително популярни през последните години и значителна част от музеите в България и света разполагат с такива. Създаването на виртуални разходки дава възможност на музеите да надскочат физическите си граници и да станат достъпни за широка публика по всяко време и от всяка точка на света. Чрез дигитални устройства потребителите могат да се пренесат във вътрешността на експозициите, където на български и английски език получават информация за уникални образци. Интегрираната виртуална реалност (VR) осигурява завладяващо изживяване, което провокира интерес и ангажираност, особено сред младите хора и учащите.

Чрез дигитализиране са създадени 3D 360 градуса HDR 4K виртуални разходки с интерактивни информационни точки (тагове) на музеите (Фиг. 1a, b). Виртуалните разходки са интегрирани в интернет сайта на университета с придружаваща информация за музеите и експозициите в тях. Дигитализацията е полезен и бърз способ за запознаване на аудиторията с музеите, намиращи се в университета. Същевременно тя повишава качествата на интерактивната среда за обучение на студенти от различни специалности. По този начин е създаден и пряк път към университета за посещение по всяко време.

Методът, използван за изработването на този тип виртуални разходки, представлява сканиране на експонатите и представянето им в 3D ротационен модел (Dollhouse), който създава изключително реалистично усещане. Тази иновация позволява на наблюдателя да се движи свободно във виртуалното музейно пространство като лесно преминава от един сектор в друг, разгръщайки пълния потенциал на експозициите. Потребителят има възможност да разглежда в детайли различни части от експонатите и да получава допълнителна информация чрез интерактивни тагове, които са на разположение на два езика – български и английски. Такава платформа не само улеснява достъпа до научно съдържание, но и предоставя нови възможности за образователни преживявания в дигиталната ера.

Освен в сайта на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ виртуалните разходки се хостват и в интерактивния портал Виртуална България (https://virtualbulgaria.bg).



Фиг. 1. Детайл от виртуалните разходки в: a) Музей по геология и палеонтология, b) Музей по минералогия, петрография и полезни изкопаеми, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, https://mgu.bg/виртуални-разходки/

Индексиране на експозициите в музеите чрез QR кодове

QR (quick response) кодовете съществуват от повече от 30 години. Те са изобретени от японския производител на автомобили Denso Wave още през 1994 г. с търговска цел (Колева, 2013). QR кодовете са използвани за проследяване на инвентара тъй като позволяват бързо сканиране, съдържат повече информация от стандартен баркод – над 4000 знака в сравнение с около 20 за линеен баркод. Те са много по-надеждни тъй като могат да бъдат сканирани под ъгъл благодарение на трите ъглови квадрата като локатор и могат да бъде прочетени дори, ако са частично повредени.

QR кодовете са един от най-новите и популярни способи за получаване на информация и реклама, базирани на възможностите на мобилните телефони. Те са лесно достъпни чрез камерите на мобилните телефони и могат да бъдат приложими и използвани и за образователни цели (Tofan, Florin-Cătălin, 2017). Това е изключително удобен подход, защото представя в обобщен вид най-важната за посетителите информация за части от музея директно чрез техните смартфони.

Индексирането на експозициите в музеите с QR кодове улеснява възможността те да бъдат разглеждани с помощта на дигиталните технологии на място в музея или дистанционно. Това повишава качеството на изживяването за посетителите и предизвиква интерес към посещения на място.

Този подход представлява съвременен, технологично усъвършенстван и лесно достъпен инструмент за популяризиране на музейните колекции. Той е насочен към широка аудитория, включително настоящи и бъдещи студенти и външни посетители с цел да предизвика интерес и да стимулира лична ангажираност. В допълнение към комуникационната си функция, този подход изпълнява и важна образователна роля, като предоставя качествено съдържание, което може да бъде използвано за нуждите на дистанционно и онлайн обучение.

QR кодовете се разполагат във всички експозиционни зали непосредствено върху витрините и по този начин осигуряват допълнителна информация за богатото скално, минерално и фосилно разнообразие на музеите. Към настоящия момент всяка витрина в Музея на уникалните кристали и експозицията с Флуоресцентни минерали в Музея по минералогия, петрография и полезни изкопаеми е обозначена с QR код, който при сканиране отвежда към допълнително дигитално съдържание – описания, изображения и научни бележки. Това улеснява индивидуалното обучение и повишава достъпността на информацията.

QR кодовете се разпространяват активно чрез интернет и социалните мрежи, както и чрез издадените през 2024 г. брошури и флаери на музеите. Те са лесно достъпни за широка аудитория и предоставят бърз и удобен достъп до информация, свързана както с възможностите за обучение в университета, така и с различни аспекти на науките за Земята.

Експозиция с флуоресцентни минерали

Иновативната експозиция с флуоресцентни минерали е първа по рода си в рамките на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“. Тя поставя акцент върху природния феномен на луминесценцията и нейните проявления, като в конкретния случай – на флуоресценцията (Wilkins, 2008). Витрината е една от малкото подобни в България наред с тези в Националния природонаучен музей при БАН и Регионалния природонаучен музей в Пловдив. Тя предлага динамично визуално преживяване, разкривайки скритата светлина, която минералите излъчват при облъчване с UV лъчение с различни дължини на вълната.



Фиг. 2. Експозиция с флуоресцентни минерали

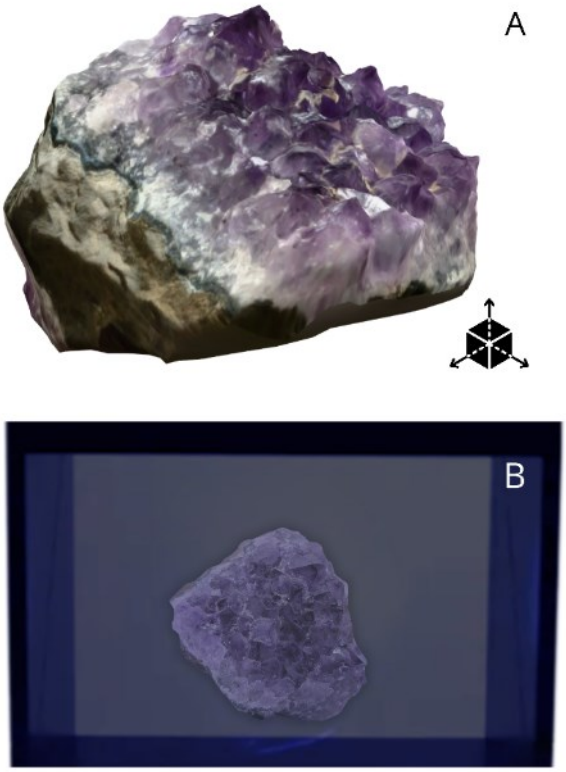
Новосъздадената експозиция, посветена на флуоресцентните минерали, представлява иновативен елемент в музейната дейност към Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ като съчетава научна информация и визуализация (фиг. 2). Експозицията е ефективен образователен ресурс, подпомагащ учебния процес по дисциплината Минералогия, особено в рамките на практическите занятия. Посредством представянето на явлението луминесценция и по-конкретно на флуоресценцията, студентите имат възможност да направят директна връзка между теоретичните представи и реалните проявления на минераложките свойства. Експозицията включва подбрана колекция с флуоресцентни минерали, събуждаща интереса на посетителите към физичните и химичните свойства на минералите.

С цел популяризиране пред по-широка аудитория, експозицията е придружена от визуални материали – постери и фотографии, както и от QR код, чрез който посетителите могат да получат допълнителна информация в дигитален формат. Такъв тип презентация не само улеснява достъпа до научното съдържание, но прави експозицията по-достъпна и въздействаща за аудиторията.

3D модели

3D визуализацията предоставя възможност за дигитално сканиране и възпроизвеждане на музейни експонати (Li et al., 2024). Това е от особено значение при работата с уникални или трудно достъпни образци тъй като по този начин се елиминира рискът от евентуалното им увреждане.

На място в музеите 3D моделите (Фиг. 3а) могат да бъдат показани чрез QR кодове и визуализирани чрез холограмна инсталация. Друга възможност е хостването им в онлайн хранилища например Sketchfab или MyMinyFactory, които предоставят линк, достъпен на сайта на университета.



Фиг. 3. a) 3D модел на аметистова друза, b) 3D модел, представен чрез холограмна инсталация

Към настоящия момент такъв тип визуализация набира популярност в някои от музеите в България, които предлагат достъп до експозициите си чрез 3D визуализирани модели. С дигитален архив с 3D музейни експонати разполагат някои музеи – Регионален исторически музей, Русе, Исторически музей, Петрич и др. По-голяма част от музеите към момента представят временни изложби на 3D експонати и обекти – Национален музей „Земята и хората“, София, Национален археологически институт с музей при БАН, София, Регионалния исторически музей, Хасково и много други.

В световен мащаб 3D визуализацията е по-широко застъпена и такъв тип представяне има в редица музеи в различни държави. Триизмерни модели на музейни експонати могат да бъдат видени директно на сайта на Музей по минералогия и геология към Харвардски университет, Великобритания, Институт Смитсониън, САЩ и др. 3D модели, визуализирани чрез холограмни инсталации са представени в Музей на изкуствата, Кливланд, САЩ, Природонаучен музей Риека, Хърватия, Египетски музей, Берлин, Германия и много други.

Холограмна инсталация

Представянето на 3D модели на експонати чрез холограмни инсталации е една сравнително нова тенденция в музейното дело (Hammady, Ma, 2021). Създаването на холограмни инсталации е комбинация от цифрово съдържания и техники за прожектиране. Музейните експонати се дигитализират с помощта на 3D сканиране, а след това цифровите данни се обработват и оптимизират за проектиране върху холографски повърхности (фиг. 3b) с помощта на специализирани проектори или дисплеи – холограмен вентилатор, холограмен куб, холограмна стена и др.

В България експозиции с холограмна инсталация са представени в някои музеи – Регионален исторически музей, Кюстендил; Регионален етнографски музей, Пловдив; Военноморски музей, Варна; Археологически музей “Велики Преслав”, гр. Велики Преслав; Археологическият музей, Сандански; Историческият музей, Приморско; Музей на архитектурата, Трявна; пещера „Магурата“ и др.

На световно ниво холограмните експозиции отбелязват нарастваща популярност и са все по-често използвани в музеите като се организират и изцяло холограмни музеи (Jeffrey et al., 2020).

STEAM приложения

Абревиатурата STEAM обединява пет ключови области – Наука, Технология, Инженерство, Изкуство и Математика (Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics). Това е една от водещите стратегии за преподаване на интердисциплинарни знания и умения на деца от различни възрастови групи (Grant, Patterson. 2016). Основната идея на STEAM подхода е насърчаване на креативното мислене и интегриране на знания от различни дисциплини в контекста на реални ситуации.

Предоставянето на научните преживявания извън рамките на традиционната класна стая, като например, музейни посещения, образователни демонстрации, практически дейности, играе важна роля в развитието на ранния интерес към науката и формирането на базисни научни познания. В този смисъл STEAM приложенията са ефективен инструмент за стимулиране на учебния процес, като допринасят за повишаването на ангажираността и интереса.



Фиг. 4. STEAM приложения: кръстословици, образователни карти, фосилен хербарий.

В рамките на музейната дейност при „Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски““ са разработени и внедрени разнообразни STEAM-базирани приложения – фосили и минерали за оцветяване, образователни кръстословици и карти, игри за търсене и разпознаване на минерали и фосили, попълване на фосилни хербарии (фиг. 4). Тези приложения имат за цел да стимулират наблюдателността, логическото мислене и интереса към науките за Земята по един увлекателен и достъпен начин.

Заключение

Иновативните подходи, които се прилагат в рамките на музейната дейност към „Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски““, трансформират съществено традиционното разбиране за функцията на музейното пространство.

Внедрявайки интерактивни методи и технологии, музеите насърчават възприемането на научни знания чрез достъпни и ангажиращи практически изживявания. Внедрените иновации значително разширяват обхвата на музейната комуникация извън рамките на университета и улесняват връзките с други музеи.

Ясен показател за високата ефективност и значимост на предприетите иновации са многобройните положителни оценки от посетителите, както и активното участие в научни фестивали и образователни събития. В условия на интензивно дигитално развитие подобен тип иновации са неотменим елемент от музейната комуникация и научното образование.

Благодарности (Acknowledgements).
Представените резултати са получени в рамките на проект за художественотворческа дейност в областта на науката

№ ХТ006/01.04.2025 г. „Софтуерно 3D реконструиране и визуализация на музейни експонати“.

Литература

Зарева Е., К. Маринова. 2023. Съвременни тенденции и интерактивни форми на представяне на музеите в Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“. *Спис. Бълг геол. д-во. 84, 3*, 363–366.

Колева, З. (2013) Инструментът „QR код” и неговите маркетингови приложения - ПЪРВИ НАУЧЕН СЕМИНАР на докторанти, постдокторанти и млади учени на ВТУ „Св. Св. Кирил и Методий“, 17.01.2013 г., изд. „Фабер“, В. Търново.

Миладинов, П. (2024). Ефекти от навлизането на новите технологии в музеите. Университетско издателство „Св. Климент Охридски“, 135 стр.

Grant, J., D. Patterson. 2016. Innovative Arts Programs Require Innovative Partnerships: A Case Study of STEAM Partnering between an Art Gallery and a Natural History Museum. The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas, 89, 4-5, 144–152.

Hammady, R., M. Ma 2021. Interactive Mixed Reality Technology for Boosting the Level of Museum Engagement. Augmented Reality and Virtual Reality. Conference paper, 77–91.

Jeffrey, S, S. Jones, M. Maxwell, A. Hale, C. Jones, C. 2020. 3d visualization, communities and the production of significance. International Journal of Heritage Studies, 26, 9, 885–900.

Kostov, R., 2020. Mineralogical museums at the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski” in Sofia. – In: Kostov, R. (Ed.). Mineralogy and Museums. Sofia, Publishing House “St. Ivan Rilski”, 33–37.

Li J., X. Zheng, I. Watanabe, Y. Ochiai. 2024. A systematic review of digital transformation technologies in museum exhibition. Computers in Human Behavior, 161, 1–30.

Tofan, Florin-Cătălin. 2017. QR CODES IMPLEMENTATION IN MUSEUM EXHIBITIONS. Studii si Comunicări, 25, 142-146.

Wilkins, A. (2008). Ultraviolet Light and its Use with Fluorescent Minerals. Technical Report. Fluorescent Mineral Society (FMS), 1–9.

MAIN ADVANTAGES AND OBSTACLES IN THE IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE MAINTENANCE IN INDUSTRIAL COMPANIES

Georgi Kondev[1], Damyan Ganchev[2]

[1] University of Chemical Technology and Metallurgy, 1756 Sofia; E-mail: kondev@uctm.edu
[2] Technical University of Sofia, 1756, Sofia; E-mail: ganchev_d@tu-sofia.bg

ABSTRACT. Predictive maintenance is a highly effective and widely used approach to diagnosing machines, devices, and other equipment in a variety of industrial systems. A key feature is the use of data to predict when failures or malfunctions will occur. By collecting and analysing data from sensors and other technical means, algorithms in machine learning software can identify patterns that indicate when a component is expected to fail. This provides reliable information for managers to plan maintenance activities before failures occur, minimising downtime and interruptions to operations. This article reviews the definition of maintenance, types, and benefits of implementing predictive diagnostics. It is particularly useful for industrial machines and equipment, which often play a critical role in ensuring a continuous production process. The presence of unplanned downtime, process delays, or breakdowns often leads to significant losses in terms of productivity and profit. Implementing this approach helps to avoid these losses by ensuring that the equipment is always in optimal operating condition. Predictive diagnostics is one of the key innovations introduced by Industry 4.0. Thus, the analysis of data on critical operating parameters is often used in decision-making to optimise maintenance time, determine operating conditions, process engineering and re-engineering.

Key words: predictive maintenance, diagnostics, industry, competitive advantage.

ОСНОВНИ ПРЕДИМСТВА И ПРЕЧКИ ПРИ ВНЕДРЯВАНЕ НА ПРЕДСКАЗВАЩАТА ПОДДРЪЖКА В ПРОМИШЛЕНИТЕ КОМПАНИИ

Георги Кондев[1], Дамян Ганчев[2]

[1]Химикотехнологичен и металургичен университет, 1756 София
[2]Технически университет - София, 1756 София

РЕЗЮМЕ. Предсказващата поддръжка е високоефективен и широко прилаган подход за диагностика на машини, апарати и друго оборудване в редица индустриални системи. Ключова характеристика е използването на данни, за да се предвиди времето за възникване на повреди или несъответствия. Чрез събиране и анализиране на данни от сензори и други технически средства, алгоритмите в даден софтуер, свързан с машинно обучение, могат да идентифицират модели, които показват кога се очаква даден компонент да се повреди. Това осигурява достоверна информация за мениджърите да планират дейности по поддръжка, преди възникване на повреди, с което минимизират времето за престои и прекъсване на операциите. Настоящата статия извършва преглед на определението за поддръжка, видовете поддръжка и ползите от внедряване на предсказваща диагностика. Тя е особено полезна за индустриални машини и оборудване, които често имат критична роля за осигуряване на непрекъснат производствен процес. Наличието на непланирани престои, забавяне на процеса или аварии често води до значителни загуби по отношение на производителност и печалба. Внедряването на този подход помага да се избегнат тези загуби, като осигурява гаранция, че оборудването винаги е в оптимално работно състояние. Предсказващата диагностика е една от ключовите иновации, въведени от индустрия 4.0. Така анализът на данни относно критични работни параметри често се използва при вземането на решения за оптимизиране на времето за поддръжка, определяне на работни състояния, инженеринг и реинженеринг на процеси.

Ключови думи: предсказваща поддръжка, диагностика, индустрия, конкурентно предимство.

Introduction

Predictive maintenance (PdM) is a strategic tool for diagnostics of industrial equipment, which is based on databases, aiming to avoid unplanned downtimes by predicting the optimal operating state of the monitored objects. This should avoid unnecessary replacement of spare parts and critical deviations in the quality of processes due to accidents or failures. This approach is one of the key innovations adopted by Industry 4.0. The implementation of continuous measurements and analysis of this maintenance allows managers to predict the remaining service life of machines and individual components with high accuracy. The definition of adequate critical operating parameters is often used as a decision-making tool for optimising downtime and determining the current operating state.

The implementation of observations on the operating characteristics of the equipment is based on a concept related to the application of monitoring techniques that register and collect information in real time about the operation of the monitored components. However, the use of this traditional approach does not allow for the prediction of related failures or wear. A turning point in this process was marked by the creation of increasingly sophisticated sensors, more efficient and productive communication networks, and more powerful computer systems for processing data sets. This supports the process of comparing data with failure models using stochastic algorithms, which allows for the identification, simulation, and interpretation of different models with the registered operating parameters. The presence of these models that allows for more accurate calculation of forecasts regarding the operating life, as well as the unification of all operational data in the system into a single database. This leads to a real opportunity to optimise every aspect of the provision of services/products for the customer, but also for the supplier, who can implement improvements specific to their activity.

In today's turbulent environment, the availability of efficient and highly productive industrial facilities for the production of industrial products, mining, power, and resource sectors is a key component for progress and growth in developing economies. By implementing advanced predictive maintenance technologies, organisations and governments have the opportunity to perform fast and efficient diagnostics, which is essential for the aforementioned industries. Predictive maintenance not only extends the life of machines and industrial equipment, but also increases the safety and competitiveness

of an organisation. Preventing equipment failures means eliminating potentially dangerous incidents that could injure not only machine operators, but also people around them. On the other hand, this also achieves a high level of safe and healthy working conditions, which is part of the so-called social pillar in the concept of sustainable development. As a rule, in less developed regions, the equipment used in industry is older and therefore more susceptible to breakdowns and emergency situations. Any occurrence of a fault leads to a slowdown in production processes or even their shutdown, which threatens productivity and human health. For such regions, predictive maintenance, which provides information about when equipment needs repair or adjustment before it breaks down, is particularly important.

The application of this type of maintenance techniques in the working environment is often associated with improvements by installing new sensors in certain areas of machines, devices, vehicles and other long-lasting tangible assets. This provides a good opportunity to detect and solve problems with operating parameters before they cause a real emergency situation. If the data collected from the sensors show that the equipment's performance is deteriorating, there is a possibility of taking immediate repair actions. Known traditional maintenance methods include checking and adjusting at regular intervals, for example every three or six months. The presence of a failure can occur at any time, especially for continuous processes that are characterised by high intensity of wear and aging of parts and components. Therefore, obtaining data on the condition of the equipment continuously allows problems to be eliminated at the moment of their occurrence. By using techniques leading to early recognition of problems, the organisation can plan the maintenance of the machines and carry out any repairs or adjustments before the asset fails. The availability of such an approach has become a strong competitive advantage over the last decade, but it is necessary to overcome the economic barriers associated with processing a huge amount of data before concrete decisions for improvements can be made. The purpose of this study is to identify key advantages and main obstacles when implementing a predictive diagnostics system. The study will help to define leading elements in a comprehensive competitive strategy aimed at eliminating failures and accidents in the long term.

Equipment maintenance types

In modern industrial organisations, maintenance costs represent almost as large a percentage of operating costs as energy costs. However, there are still cases where this money is spent inefficiently by applying a reactive approach, which is associated with carrying out repairs after a failure has occurred. A number of managers who are engaged in maintenance of tangible assets are taking measures to more accurately predict the future condition of equipment in order to make adequate and more informed decisions in this direction.

According to studies by various authors, annual equipment maintenance costs vary widely, averaging up to 40% of total costs. For example, estimates of maintenance costs for manufacturing equipment range from 15% to 70% of the cost of manufactured products (Thomas and Weiss, 2018). Literature often uses different indicators and assessment methods, for example, Komonen (2002) estimates that industrial maintenance is 5.5% of the company’s turnover (i.e. sales), but it varies from 0.5% to 25%. Other studies estimate that maintenance is 37.5% of the total cost of ownership (Herrmann et al., 2011). Along with the variations in the indicators in the scientific literature on maintenance costs, the values vary depending on the country and industry of study, which makes comparison and generalisation difficult.

Therefore, in such a dynamic environment, the development of new technologies and effective maintenance strategies that can improve the performance and economic efficiency of equipment is essential. This has an important impact not only on the economic benefits of the equipment, but also on the reliability, availability, and security of the system. The development of maintenance technologies goes through three key stages: corrective maintenance, preventive maintenance, and predictive maintenance. Corrective maintenance is a “fault-only” approach, which is the initial stage of maintenance; preventive maintenance is carried out at predetermined intervals to check and replace parts, and to prevent damage, destruction and secondary losses; predictive maintenance is condition-based, and according to the condition of the system, it is decided whether to carry out repairs. Corrective maintenance and preventive maintenance are the traditional way of maintenance, which leads to lower equipment reliability and high maintenance costs. Predictive maintenance integrates equipment condition monitoring, fault diagnosis, adequate data for decision-making in predicting fault states and maintenance activities, which is a new way of thinking and can improve economic efficiency and reliability.

- *Corrective maintenance.* It is usually associated with practical activities to repair equipment when it breaks down or its performance deteriorates to levels that do not meet the set production goals. This is the so-called traditional approach to maintenance activities, which is accepted as a natural reaction to repair machines when they break down. The advantages of this approach in the short term are related to the seemingly low implementation costs. It is possible that the costs per month are equal to what is needed to repair a damaged machine, or even lower if an emergency situation does not occur. Secondly, a minimum number of maintenance personnel is needed, since the machines are repaired by operators who are familiar with the~~ir~~ technical parameters. This approach can be successfully applied when all the equipment is new, since a high degree of reliability and good performance are realistically expected and achievable at the beginning of the life cycle.

In the opposite direction are a number of weaknesses associated with this maintenance approach. Some of the most commonly identified are: increased operating costs over a long period of time due to unplanned equipment downtime; increased labour costs, especially if an emergency repair is required; urgent costs for emergency repairs or replacement of critical components; possible damage to non-productive machines or processes due to the shutdown of essential ones; reduced motivation among people due to stress in the workplace. In most work situations, these disadvantages are the opposite of the possible benefits. For example, adopting a program to reduce monthly maintenance costs for a heating installation is likely to be ineffective if it breaks down in bad weather conditions in winter. Productivity can be severely reduced if it is too cold to open the work premises. Managers are forced to wait for maintenance personnel to carry out the necessary repairs. This can lead to the second point - increased labour costs. The urgency and specificity of the equipment may require calling in outside help or paying staff overtime to work overtime. And if managers decide not to make this expenditure, it must wait until

the building is habitable again. Either way, this scenario significantly increases maintenance costs. Therefore, although corrective maintenance is easy to plan, its widespread implementation can lead to production shutdowns when key machines fail. Thus, without immediate access to the necessary components, the costs of emergency delivery along the supply chain can increase dramatically. In essence, the lack of a strategy for implementing this approach can lead to increased downtime and higher maintenance costs.

- *Preventive maintenance.* This approach refers to the regular maintenance of equipment according to a predetermined schedule, which is based on the characteristics and individual features of the equipment, usually provided by its manufacturer. The main goal here is to extend the life of tangible assets, as well as to prevent potential failures. Typically, a preventive maintenance program includes periodically scheduled activities, such as replacing moving parts and filters, cleaning internal and external coils, lubricating motors and bearings, cleaning and disinfecting cooling towers, adjusting and checking control modules, painting and controlling corrosion processes.

The implementation of preventive maintenance has a number of advantages in ensuring the reliability and performance of equipment compared to corrective maintenance. Therefore, it is associated with lower costs over a long period of time, as it reduces emergency situations and unplanned outages. Studies in this direction show that 12-18% of costs can be reduced when implementing preventive maintenance compared to corrective maintenance. (Sullivan et al., 2010)

A significant disadvantage of preventive maintenance in a highly dynamic economic environment is the lack of the ability to clearly prioritise. In other words, equipment is evaluated in the same way and maintenance is performed according to a pre-established schedule with recommended activities. There is often no reasonable system for classifying maintenance activities according to the potential consequences of failure, so people do not necessarily pay primary attention to key tangible assets. For example, changing a filter in an air conditioning system for a drone test would have the same weight as replacing a temperature sensor in a fire protection system. The former is likely to have minimal impact on the flight characteristics of the aircraft, while the failure of the latter could be catastrophic, especially for facilities with a high degree of cargo hazard. By performing preventive maintenance as the equipment designer intended, we will increase reliability closer to the design level. The “checklist” approach to preventive maintenance is better than the corrective “wait-for-it-to-fail” approach, but is less effective and efficient than the optimal approach - predictive maintenance.

- *Predictive maintenance.* Like preventive maintenance, predictive maintenance is based on the principle that a proactive approach is better than a corrective one. In return, however, repairs are not carried out based on a pre-established calendar schedule, but on an assessment of the actual operating condition of the equipment. Thus, key operating parameters are checked and data from them is recorded continuously by personnel or by sensors. The readings are then analysed and used to assess the condition of the equipment and predict future performance or the probability of failure. These measurements indicate the beginning of deterioration of operating parameters (functional condition), thus eliminating or controlling the causes before significant deterioration of the physical condition of the tangible asset. A key element of predictive maintenance is that the current condition of the equipment and the production system determines the direction of the activities performed, rather than adhering to a pre-established schedule. This means that repairs are made at the right time, resources are not wasted on unnecessary work, and equipment is maintained at a higher level of performance and reliability. On the other hand, this approach reduces costs by an additional 8-12% overall compared to preventive maintenance. (Sullivan et al., 2010)

Predictive maintenance activities should be prioritised within the organisation based on the organisation’s unique characteristics and the skills and knowledge of the people involved. In some cases, significant investment in training or new employees with specific competencies may be required. A production testing facility will need sufficient staff with technical expertise to continuously monitor and trend all data coming from the sensors in place and compare this information to the optimal performance metrics provided by each manufacturer. Maintenance should then be prioritised based on the potential impact on costs, ergonomics, and safety. It is important to note that additional staff will likely be needed to actually go out and fix the problems found.

The implementation of predictive maintenance is often hindered by one key drawback, and that is the necessary costs that the organisation must foresee. Additional financial resources may be required to implement and maintain new software solutions that collect and process data on the current state of the equipment in use. Operators will likely need to undergo additional training, and people with specific knowledge and skills in the field will also need to be attracted. Regardless of whether these activities are in-house or outsourced, performing analysis and prioritisation leads to increased investments in this direction. The scope of the mentioned factors will depend largely on the scale and globalisation of the production systems and the adopted organisational culture. Therefore, the implementation of this approach represents a serious challenge for a number of organisations, as it requires commitment and approval from senior management. The biggest obstacle stands out the need to change the organisational culture, which is the driving force for implementing the planned improvements.

Advantages and obstacles of implementing predictive maintenance as a diagnostic tool

In a highly competitive environment, modern supply chains are becoming increasingly complex and unpredictable, making them more vulnerable to disruptions in their rhythm. That is why managers, responding to these transformations, are looking for opportunities for reliable and sustainable production processes over time with minimal delays or interruptions. In response to this need, predictive maintenance has emerged as a critical area of research in the management of various industrial systems. The leading goal of the strategic predictive maintenance approach is to prevent unforeseen equipment failures, while increasing productivity and minimising the costs and downtime they cause. Various software solutions based on the so-called precedent method can identify deviations, and through data analysis to predict possible upcoming emergency conditions. Thus, the capabilities for proactive planning and execution of maintenance tasks enable people to reduce unplanned downtime to improve the overall efficiency of the organization. (Schwendemann et al., 2021). Other conventional approaches, such as corrective and preventive maintenance, are often associated with the need for premature replacement of spare

parts or the occurrence of unplanned outages. Therefore, long downtimes or high costs for preventive activities and spare parts are possible. The implementation of condition-based maintenance (CBM) successfully overcomes these problems because it constantly monitors the current operating characteristics of the maintenance objects. However, predictive diagnostics extends this approach by calculating and analysing the remaining optimal condition, which allows for a preliminary selection of the necessary maintenance measures and replacement of spare parts before failure. As a result, a number of failures can be avoided at an early stage, which is especially useful in interconnected and continuous industrial processes with bottlenecks and expensive spare parts. Thus, indirect maintenance costs that are alternative due to the occurrence of a failure can actually be minimised. (Busse et al., 2019).

Despite the undeniable advantages and recognised potential of predictive maintenance to increase operational efficiency and reduce downtime and breakdowns, the number of successful implementations in industrial organisations remains disproportionately low compared to other approaches. One of the representative studies in this direction shows that 60% of the surveyed organisations in Europe have an adopted strategic goal to introduce the approach, but only 11% have successfully completed this task. (Haarman et al., 2018). Such studies provide real information about the different options for planning and practical implementation of strategic goals and tasks. The presented literature data provides information about successful examples related to effective maintenance management and sustainable production processes without unplanned failures. However, they lack clearly expressed consistently repeated effective implementations in industrial organisations that would exceed the theoretically presented possibilities. (Srivastava and Mondal, 2016; Welte et al., 2020). To clarify the reasons for the low rate of practical applications and to develop models in this direction, it is necessary to summarise successful solutions and classify them by economic sectors. Some authors examine various economic models that are based on artificial intelligence, the Internet of Things, case base **reasoning** and other empirical data in the field. (Passlick et al., 2021). In line with this are the studies of van Oudenhoven et al. (2022) for more practically oriented research in the field of predictive maintenance implementation. In their observations on the implementation of predictive maintenance, Hoffmann and Lasch (2023) emphasise the need for empirical records that explain in more detail the reasons for the small number of successful applications, and analyse the critical factors for implementation.

- Obstacles to implementing predictive maintenance

The implementation of a successful predictive maintenance system in industrial organisations is associated with overcoming numerous obstacles and complications, which are generally accepted as significant shortcomings in the future. The huge amounts of data required to actually implement the approach must be adequately collected and analysed, which is a significant problem. Managers have difficulty deciding on the investment in infrastructure and other resources required to effectively process, manage, and evaluate this data. The introduction of information from multiple sources, such as sensors, logs for condition assessment, has the potential to create confusion among people in making the optimal decision.

The need for more people with good professional training in data processing and analysis and machine learning is also a critical problem for the approach. The organisation may not have people with specific experience and abilities needed to implement a predictive maintenance system. Hiring new people, training existing ones, or contracting with external consultants often takes a lot of time and additional financial resources. In addition, building a comprehensive management system aimed at this approach is likely to face data unification due to the complexity and individual characteristics of the various machines and equipment used. They may require different methods and algorithms for unifying data from installed software solutions. Internal resistance and lack of leadership skills among senior management is another serious problem in adopting the necessary changes. The absence of support and internal motivation for adopting such an innovative approach can be identified in people who prefer conventional methods of corrective and preventive maintenance. That is why it is extremely important that senior management and people be informed about the key benefits of predictive maintenance and how it can increase overall productivity and efficiency.

The main obstacles to implementing a predictive maintenance system in the context of Industry 4.0 are examined in detail and analysed as challenges and opportunities by Nunes et. al. (2023). Key issues are investigated, such as: guidelines for real-time data analysis, merging data from different sources and formats, creating and offering predictive models based on precedents in complex industrial systems, etc. The authors also describe a set of proposals and possible solutions to the above-mentioned problems related to improving reliability and productivity. Some of the most common challenges are related to complicated access to accurate and reliable data on the operating condition of the equipment; inadequate data collection and analysis, as they are often scattered across different software platforms in different formats; high investments for the acquisition and installation of sensors, devices, software, and system upgrades. (Filipov and Vasilev, 2016)

Developing a predictive maintenance system for industrial equipment using algorithms related to the precedent method is practically feasible in a short period of time and without high additional investments. Using this approach would enable organisations to predict possible failures and solutions accurately and efficiently. This will lead to increased operational efficiency, reduced maintenance costs, increased customer satisfaction, and a strong competitive advantage. Systematising the following advantages are critical factors for the potential successful implementation of a comprehensive predictive diagnostics strategy.

- Post-implementation benefits of predictive maintenance

It should be emphasised that the perception of predictive maintenance as a competitive advantage it is not a universal solution. Successful implementation is associated with the assessment of individual features, customisation, modification, and development of almost every operation. Thus, the benefits are primarily related to: minimising the risk of unexpected failures and extending the life of assets; reducing maintenance costs by avoiding unnecessary repairs; optimising the availability of spare parts; and maximising reliability.

The advantages regarding the implemented production processes are related to ensuring high reliability by eliminating serious failures that compromise the planned rhythm. In a continuous production cycle, it is extremely important that the equipment can operate with optimal characteristics even during maintenance activities. This is a key objective in a number of strategic plans. Reliability is evaluated primarily by the mean time to repair, deviation response time, and availability of resources for troubleshooting. Through the predictive

diagnostics approach, many possible failures can be predicted in advance, preparing and planning the necessary maintenance measures. In addition, unplanned downtime can affect subsequent process steps, leading to interruptions and large losses, especially in assembly line workshops.

Compared to other maintenance approaches where the current condition of the facility is unknown, such as corrective or time-based maintenance, predictive maintenance enables the prevention of unplanned downtime. Therefore, response time is minimised; there is a practical opportunity to secure resources and reduce mean time to repair, as maintenance personnel are effectively prepared for the next restoration of operational status. This effectively prepares for upcoming maintenance activities during non-production time, setup time, or when equipment is moved to another department.

One of the key advantages of predictive maintenance is that it can be considered as an extension of condition-based maintenance as it involves *continuous monitoring* of diagnostic objects. Therefore, sudden failures can be identified because the system provides 24/7 monitoring of the objects, especially in continuous processes where stopping and starting production is expensive and energy-intensive. This, in turn, ensures stable operation of the equipment, which is of great importance for interconnected and environmentally critical processes. When failures or accidents occur, errors can affect product quality and lead to failure or scrap. In addition, the constantly known condition of the maintenance objects also has a positive impact on risk management. In particular, processes without critical equipment carry a high risk of downtime throughout the entire production chain, which can be mitigated by an appropriate data-driven maintenance strategy. The large amount of data allows for easy identification of the condition of the equipment based on information from multiple sensors. These quantitative parameters can be used for graphical presentation, which provides a good overview of the condition of all maintenance objects.

The ability to accurately predict the remaining useful life of equipment allows one to predict when an emergency will occur, which helps managers plan the necessary maintenance measures in advance. The main elements here are: financial resources, people, spare parts, and tools. In time-based preventive maintenance, planning the necessary measures is relatively easy, since the intervals are fixed. However, this strategy carries the risk of unplanned failures and emergencies. In comparison, predictive diagnostics can detect failures in advance with enough time to plan resources, making it suitable for automating repair processes using artificial intelligence.

Legal regulations and corporate measures to improve *health and safety* at work are constantly increasing, along with reliability and cost-effectiveness. Health and environmental protection are linked to two main directions. One is aimed at ensuring that no harmful substances are released into the environment by continuously monitoring facilities with hazardous substances and detecting leaks at an early stage of the process. On the other hand, predictive maintenance has additional positive environmental effects, as fewer spare parts have to be produced and transported, and less waste is produced due to the optimal use of wear opportunities.

Continuous monitoring and maintaining optimal parameters allows for extensive root cause analysis in the event of failures. On the one hand, such data from operating time to failure is very valuable for training and optimising algorithms for remaining useful life. On the other hand, it can be used to create a knowledge database for maintenance personnel, including failure indicators and their causes. Such a database is also used to categorise and visualise defects. In this way, it is possible to monitor both critical points and key causes of errors, and to implement strategically prioritised improvement measures.

To assess the impact of predictive maintenance on costs, it is necessary to divide them into direct and indirect costs.

Direct costs include all those related to the maintenance measures actually carried out, such as spare parts, human resources, and additional materials. Long-term benefits from the reduction of manual labour and the associated savings in operational maintenance are often added here. Compared to time-based preventive maintenance, predictive maintenance results in fewer measures, as the wear reserve is fully used and parts are replaced less frequently, which leads to reduced material costs. In addition, predictive maintenance requires fewer people on hand, as the risks of unplanned breakdowns and accidents are minimal. Since spare parts can be delivered on demand and less inventory needs to be maintained, storage costs are also reduced.

Indirect maintenance costs are opportunity costs that arise due to failures. Especially in manufacturing organisations where very short technological time intervals have to be maintained, individual system failures can lead to expensive scrap and reduced productivity, which leads to reduced profits. Therefore, accurate prediction of the condition of critical equipment is beneficial in avoiding high subsequent costs. Furthermore, production interruptions can lead to non-fulfillment of agreed deliveries along the logistics chain. As a result, customers are likely to resort to very high contractual penalties. To avoid such events in the event of a failure, expensive *ad-hoc* measures are required. Predictive maintenance thus gains a significant advantage by *extending the life of the equipment* by reducing or eliminating breakdowns and failures by replacing only worn-out spare parts. Furthermore, expensive replacement investments can be reduced and the life cycle costs of the equipment can decrease significantly over time.

Effective implementation of predictive maintenance provides significant strategic advantages for the organisational structure and competitiveness of organisations. Continuous monitoring and forecasting of operating conditions can limit reductions or overproduction in critical production processes, allowing for a *more efficient organisation of units (departments)* with less unused capacity. By more efficiently using existing capacities, all other things being equal, higher productivity is achieved based on optimised availability, while reducing production areas. Similar results are often complemented by activities related to supply chain management. Predictive maintenance associated with reducing the risk of unplanned interruptions and downtime means that fewer spare parts need to be stored. This provides more space for *high-value production activities.* These savings have a positive environmental impact, as continuous condition monitoring also detects worn components and unusual interruptions, *preventing excessive energy consumption*.

Adopting a predictive maintenance approach always involves the use of data collection methods based on sensors and other sensitive elements. The huge amount of data in volume and scope can be used as a strategic tool by equipment manufacturers to optimise future versions of machines and to identify weaknesses based on the *collected baseline information*. In addition, there is the advantage of being able to *customise sales opportunities* to customer wishes, such as

modules with case studies that are individually adapted and take into account the condition of the machine and operating conditions.

Many industrial organisations are well aware of the critical impact of product cost on competitiveness over the *life cycle* phases. Predictive maintenance under certain conditions leads to a reduction in operating costs, which is an opportunity for manufacturers and suppliers in the supply chain to generate competitive advantage through *differentiation* in a turbulent environment. Thus, customers in the chain include life cycle costs in negotiations for new equipment and contractually reserve the right to renegotiate prices after a few years if the planned costs for this are not achieved.

Conclusion

In a highly competitive and challenging economic environment, organisations must overcome a number of obstacles and hurdles before building a predictive maintenance system, including data administration, a shortage of experienced people, complex technologies, and resistance to change. After the successful implementation and adoption of the predictive maintenance approach, there are significant benefits for organisations related to reducing maintenance costs, reducing downtime, and increasing overall productivity and efficiency. The described difficulties and advantages of implementing predictive maintenance are intended to assist managers in creating and implementing a comprehensive strategy that generates added value for all stakeholders.

Predictive maintenance should be seen as a long-term investment in the sustainable implementation of production processes. The financial benefits are unlikely to be visible in the short term, but by preventing accidents and indirect maintenance costs in critical processes, they would become clear. Predictive maintenance is therefore an essential element of the overall strategy of any industrial organisation that leads to the reduction of risks to stability, health and safety of people and the environment.

From another perspective, predictive maintenance is not a solution to all problems related to optimising production processes. Therefore, it is advisable to apply it purposefully to critical systems, where failures must be prevented due to safety concerns, operational sustainability or the occurrence of indirect maintenance costs. The approach itself could not achieve high efficiency as a stand-alone solution and requires complete integration into the organisation. The implementation is often hindered by inadequate information infrastructure and a shortage of programmers and artificial intelligence specialists, These are all needed to connect with existing application systems and meet the requirements of the organisation and its customers. These problems are not unique and are common obstacles for many technologies in the Internet of Things environment. In addition, the reluctance of many employees to adopt new technologies is a major problem in practice. This problem is also evident in the challenge of implementing top-down approaches when employees do not accept them. One solution is to provide comprehensive information to dispel prejudices and demonstrate the benefits for all people involved in the process.

Modern predictive maintenance tools can achieve incredible results, especially when people combine sensors with a top-notch software system. Together, these tools can predict machine failures before they happen and issue alerts, so that maintenance teams know exactly where they are needed. Such systems could even generate work orders and schedule tasks automatically, so that maintenance teams never miss a beat. The future promises to deliver even more. Artificial intelligence and machine learning technologies are poised to enhance diagnostic capabilities, so that they can identify the root causes of machine failures and recommend solutions. Operations that successfully implement the best of today’s tools will be well-positioned for the technologies of tomorrow.

Adopting a predictive maintenance pilot program allows organisations to test and refine their strategies, thereby ensuring the success of the improvements undertaken before they are discovered by competitors. Continuous monitoring and data analysis are crucial for identifying potential equipment failures and effectively prioritising maintenance tasks.

Acknowledgement

This study is funded by the European Union - Next Generation EU, through the National Recovery and Resilience Plan of the Republic of Bulgaria, project № BG-RRP-2.004-0002, "BiOrgaMCT".

References

Busse, A., Metternich, J., & Abele, E. (2019). Evaluating the benefits of predictive maintenance in production: a holistic approach for cost-benefit-analysis. In *Advances in production research*, ed. R. Schmitt, G. Schuh, 690–704. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03451-1_67.

Filipov, V., Vasilev, Pl. *International scientific journal industry 4.0*, Bulgaria, Volume 1. Dec. 2016, pp. 19-24, ISSN/ISBN: ISSN 2543-8582.

Haarman, M., de Klerk, P., Decaigny, P., Mulders, M., Vassiliadis, C., Sijtsema, H., & Gallo, I. (2018). Beyond the hype: PdM 4.0 delivers results. In *Predictive Maintenance 4.0*. R. https://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/pwc-predictive-maintenance-4-0.pdf.

Herrmann, C., Kara, S., & Thiede, S. (2011). Dynamic life cycle costing based on lifetime prediction. *International Journal of Sustainable Engineering*, *4*(3), 224-235.

Hoffmann, M. A., & Lasch, R. (2023). Tackling industrial downtimes with artificial intelligence in datadriven maintenance. *ACM Computing Surveys* https://doi.org/10.1145/3623378.

Komonen, K. (2002). A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking. *International journal of production economics*, *79*(1), 15-31.

Oudenhoven, Van, B., Van de Calseyde, P., Basten, R., & Demerouti, E. (2022). Predictive maintenance forindustry 5.0: behavioural inquiries from a work system perspective. *International Journal of Production Research* https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2154403.

Passlick, J., Dreyer, S., Olivotti, D., Grützner, L., Eilers, D., & Breitner. M. H. (2021). Predictive maintenance as an Internet of Things enabled business model: a taxonomy. *Electronic Markets 31*(1):67–87. https://doi.org/10.1007/s12525-020-00440-5.

Nunes, P., Santos, J., & Rocha, E. (2023). Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *40*, 53-67.

Schwendemann, S., Amjad, Z., & Sikora, A. (2021). A survey of machine-learning techniques for condition monitoring and predictive maintenance of bearings in grinding machines.

Computers in Industry 125:103380. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103380.

Srivastava, N. K., and S. Mondal. 2016. Development of framework for predictive maintenance in Indian manufacturing sector. *International Journal of Services and Operations Management* 24(1):73–98. https://doi.org/10.1504/IJSOM.2016.075764.

Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., & Hunt, W. D. (2010). Operations & Maintenance Best Practices - A Guide to achieving operational efficiency release 3.0 5.1-5.9. Washington, D.C., United States. Dept. of Energy.

Thomas, D. S., Weiss, D. S. (2018). *The costs and benefits of advanced maintenance in manufacturing* (pp. 100-18). Gaithersburg, MD, USA: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

Welte, R., Estler, M., & Lucke, D. (2020). A method for implementation of machine learning solutions for predictive maintenance in small and medium sized enterprises. *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 93*:909–914. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.074

COMPETITIVENESS OF THE BULGARIAN MINING INDUSTRY

Veselin Mitev, Yoan Hristov, Antonio Cherchelanov, Elitsa Arsova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia

ABSTRACT. The report presents the state of competitiveness of the Bulgarian economy, the Industry sector and the Mining and Quarrying subsector for the period 2018-2024. The change in key quantitative indicators characterising competitiveness at the level of the national economy, the Industry sector and the Mining and Quarrying subsector is analysed. The aim of this study is to outline the state of competitiveness of the Bulgarian mining industry in the period 2018-2024 through an analysis of the available sectoral and national statistical information. The results substantiate that in the period 2018-2024, the Bulgarian mining industry raised its economic results, labour productivity, personnel remuneration, and competitiveness.

Key words: Bulgarian mining industry, competitiveness, sector analysis.

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТ НА БЪЛГАРСКАТА МИННА ИНДУСТРИЯ

Веселин Митев, Йоан Христов, Антонио Черчеланов, Елица Арсова

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

РЕЗЮМЕ. В доклада е представено състоянието на конкурентността на българската икономика, на сектор „Индустрия“ и на подсектор „Добивна промишленост“ за периода 2018 – 2024 г. Анализирано е изменението на ключови количествени показатели, характеризиращи конкурентността на равнище национална икономика, сектор „Индустрия“ и подсектор „Добивна промишленост“. Целта на настоящото изследване е чрез анализ на наличната браншова и национална статистическа информация да се очертае състоянието на конкурентността на българската минна индустрия през периода 2018 – 2024 г. Резултатите обосновават, че през периода 2018 – 2024 г. българската минна индустрия повишава икономическите си резултати, производителността на труда, заплащането на персонала и конкурентоспособността.

Ключови думи: българска минна индустрия, конкурентоспособност, секторен анализ.

Introduction

Michael Porter was the first to introduce the category of “competitiveness” at the industry, corporate, and business levels (Porter, 1980). In his later works, he further developed his theory of competitiveness (Porter, 2003, 2009). Other authors, such as (Chursin & Makarov, 2015), accept it as a complex category, without being an economic conceptual category, due to its use as a generalising concept at different levels (national, regional, industry, company, product), as well as due to the use of different values and indicators for its measurement.

On the other hand, according to Siderova (2013), "Competitiveness is an overall measure of the economic development of any system of economy and summarises the effectiveness of the functioning of its economic, sectoral, social, financial, government, and other subsystems".

Competitiveness reveals the ability of economic entities to increase national, sectoral, and individual productivity and to compete with other entities at, respectively, global, regional, sectoral, and company level.

At the level of the national economy, competitiveness is manifested in many directions, namely: the potential for sustainable growth with its inherent three pillars – economic, social, and environmental. Economic competitiveness must combine with sustainable development, thus, with the rational and efficient use of the natural resources of a national economy (Dogaru, 2020; Ikram & Sayagh, 2023).

According to the definition of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 1996, as cited in Garelli, 2002), a nation's competitiveness is “the degree to which a country can, under free and fair market conditions, produce goods and services that meet the test of international markets, while simultaneously maintaining and expanding the real incomes of its people in the long term”. This definition includes the following three major conditions:

1. The ability of the economy to meet international requirements.
2. Free market and trade.
3. Real incomes do not increase within a long period.

Unfortunately, specialised literature has not clarified the concept of "competitiveness" at the industry level in terms of specific indicators by which it can be determined.

Research data and methods

The methods used in the development of this study are: research of scientific literature and statistical information, analysis and synthesis, systemic approach, the method of inter-economy comparisons, and graphical methods for time series analysis.

The aim of this study is to outline the state of competitiveness of the Bulgarian mining industry during the period 2018-2024 through an analysis of industry and national statistical information available.

The sources of information for the study are: national and international databases with scientific information, statistical data of the National Statistical Institute of the Republic of Bulgaria, its INFOSTAT information system, the Ministry of Economy, and the Ministry of Energy.

Competitiveness of the Bulgarian economy

According to the renowned global competitiveness ranking for 2024 of the Institute for Management Development (IMD), Switzerland, Bulgaria is ranked among the 67 countries with less than 20 million population. In the ranking, this country is lagging behind from 48th place in 2020 to 58th place in 2024 in terms of

the overall implementation of the four main groups of criteria, including a total of 20 such criteria, presented in Table 1.

Table 1. Global competitiveness ranking for Bulgaria by criteria groups for 2024.

Indicator	Ranking position
Economic Performance	
Domestic Economy	48
International Trade	28
International Investment	59
Employment	56
Prices	9
Government Efficiency	
Public Finance	43
Tax Policy	24
Institutional Framework	54
Business Legislation	62
Societal Framework	57
Business Efficiency	
Productivity & Efficiency	57
Labour Market	67
Finance	53
Management Practices	61
Attitudes & Values	64
Infrastructure	
Basic Infrastructure	65
Technological Infrastructure	54
Scientific Infrastructure	54
Health & Environment	53
Education	52

Source: per data from the Institute for Management Development, compiled by the authors. https://imd.widen.net/content/ma2a4k34pb/pdf/BG1page_WCY_2024.pdf.

The data in Table 1 shows that the most serious lag is in the following criteria: labour market; attitudes and values; basic infrastructure; management practices; business legislation; international investment; productivity and efficiency. These areas need to be a particular priority for the Bulgarian government when developing strategies and policies for the sustainable development of the Bulgarian economy.

Fig. 1 presents the change in real GDP of the World, American, European, and Bulgarian economic systems in the period 2018 – 2024, along with and the International Monetary Fund (IMF) forecast for 2025 and 2026.

The data in Fig. 1 show that Bulgaria’s national economy maintains a higher real GDP growth than the EU economy, is close to that of the US, and is inferior to the Chinese and global economies. The forecasts for the development of the EU economy are highly pessimistic; for years, two-thirds of the Bulgarian commerce has been with the countries of Central and Southern Europe. This determines Bulgaria’s strong dependence on the situation in Europe. Of course, the economic environment is highly dynamic and is affected by significant economic and political shocks.

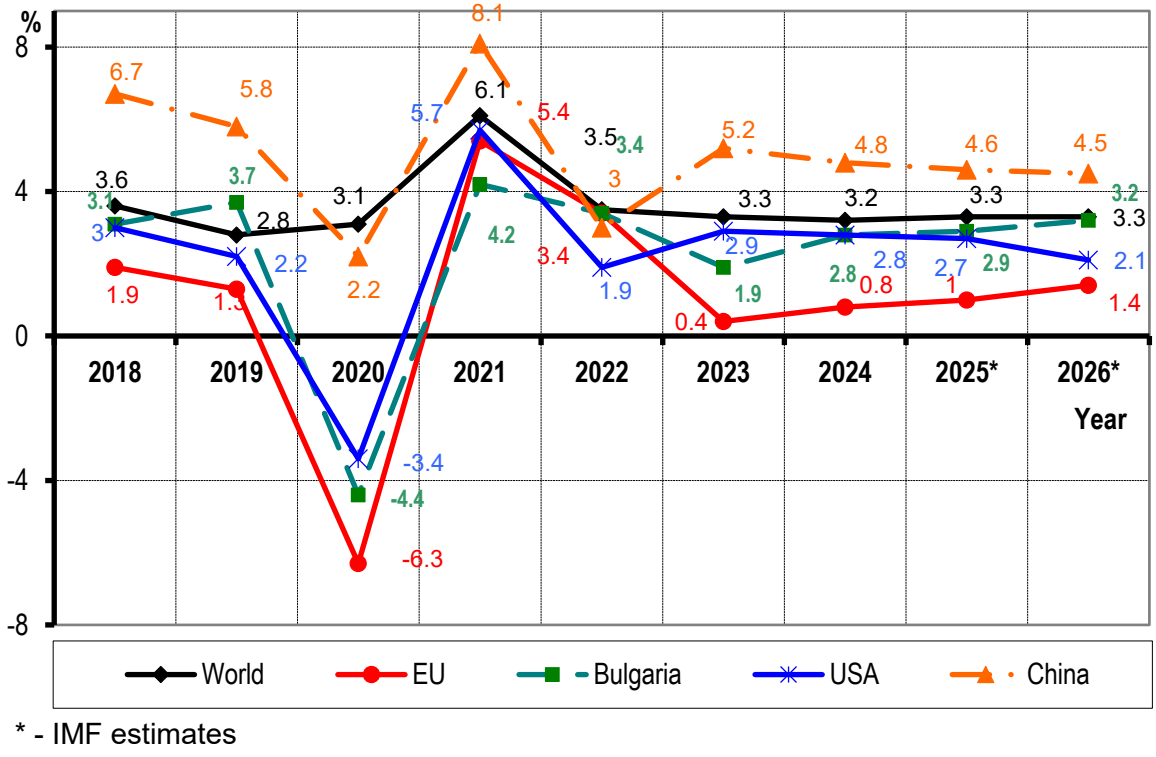


Fig 1. Change in the real GDP of the World, American, European and Bulgarian economic systems during the period 2018-2024 and forecasts for 2025 and 2026.
Source: per IMF. World Economic Outlook. (2019÷2025); compiled by the authors.

Fig. 2 presents Bulgaria’s gross domestic product (GDP) at current prices and at 2020 prices according to INFOSTAT data for the period 2018-2024.

The data in Fig. 2 shows that for the period 2018–2024, the Bulgarian economy achieved an average sustainable real growth of 2.6% per year. The exception is 2020, when the anti-epidemiological measures were the most restrictive, which led

to a decline in consumption and economic activity both on a national and global scale. The Bulgarian economy contracted by 4.4% then. Linear regression models of the time series of Bulgaria's GDP at current prices and at 2020 prices are derived. These are characterised by very high determination coefficients (R^2). This justifies a very high degree of predictability of the indicators based on a retrospective period. Of course, such forecasts are significantly influenced by the occurrence of significant changes in the micro- and macroeconomic environment.

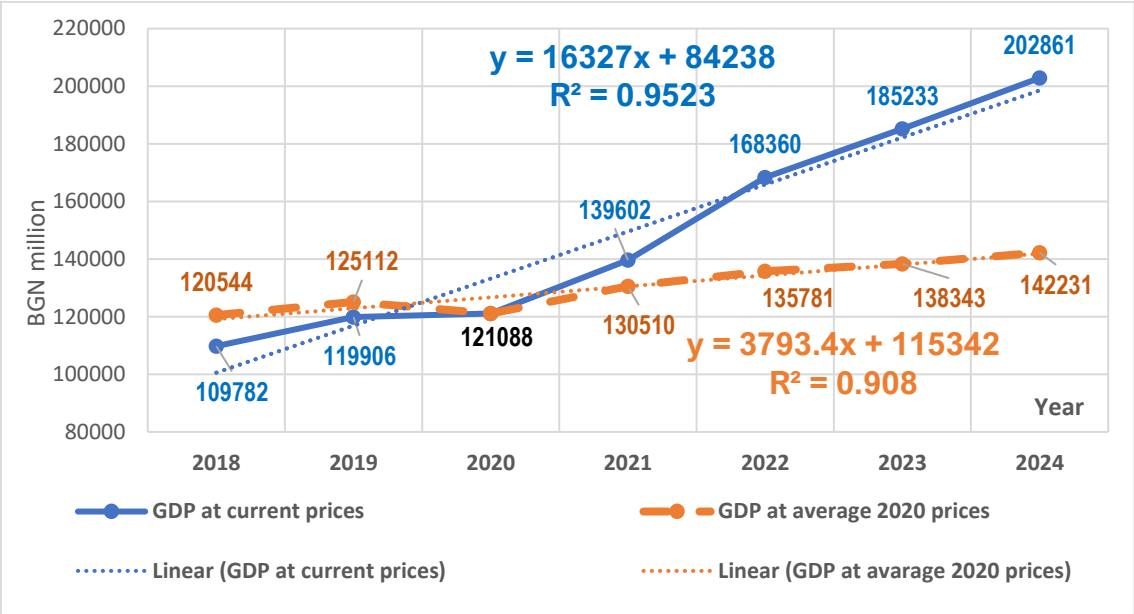


Fig. 2. Gross domestic product of Bulgaria at current prices and at 2020 prices.
Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1169

Competitiveness of the Industry Sector (excluding Construction)

Fig. 3 shows the gross value added (GVA) per basic prices for Bulgaria and for the Industry sector (excluding Construction) according to INFOSTAT data for the period 2018-2024.

The data in Fig. 3 show that the Industry sector (excluding Construction) achieved sustainable real growth in GVA for the period 2018–2024 of 14.1% on average per year. Bulgaria's gross value added achieved sustainable real growth for the period 2018–2024 of 14.3% on average per year. For the period 2018 –2024, the relative share of sector “Industry (excluding Construction)” in Bulgaria's GVA changed from 21.4% in 2018 to 21.3% in 2024. The derived linear regression models of the time series of the GVA of the Industry sector (excluding Construction) and of Bulgaria are again characterised by very high coefficients of determination.

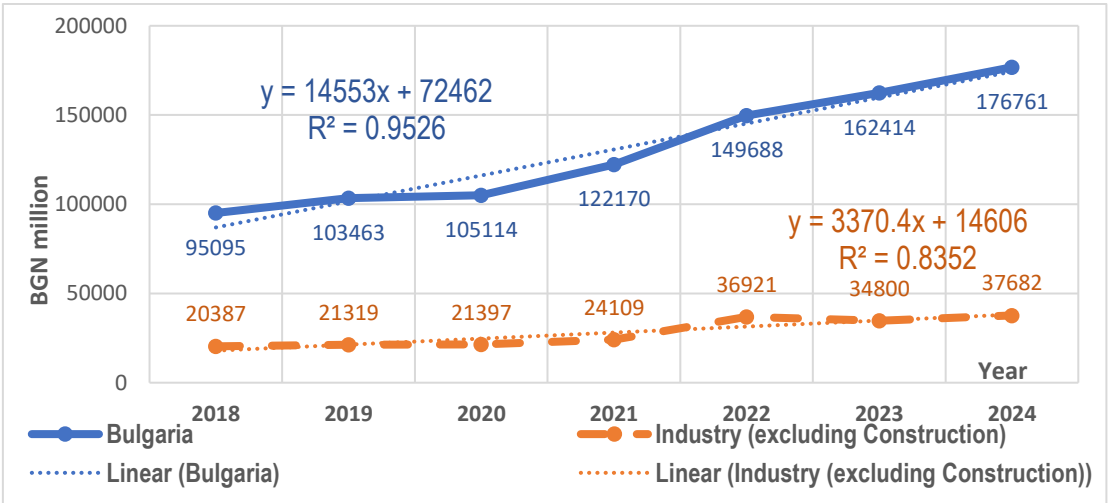


Fig. 3. GVA per basic prices for Bulgaria and for the Industry sector (excluding Construction) for the period 2018-2024.
Source: based on data from "INFOSTAT", compiled by the authors. https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=135

Competitiveness of the Mining and Quarrying Subsector

According to information officially published by the National Statistical Institute (NSI) and data from the INFOSTAT information system of the NSI, the Ministry of Economy, and the Ministry of Energy, presented in Table 2, a large part of the

Bulgarian mining enterprises currently achieve high production and economic results.

The data presented in Table 2 show that in the period 2018–2024, the subsector of Mining and Quarrying Industry developed sustainably and at an increasing pace with slight fluctuations.

Table 2. Main economic indicators of the Bulgarian mining industry for the period 2018 ÷ 2023.

Indicators	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Number of enterprises, num.	368	343	350	338	336	315
Number of persons employed, num.	21522	19022	20084	19406	18700	18666
Production value, BGN'000.	2759501	2586650	3097435	3713231	4306251	n.a.
Turnover, BGN'000.	2708557	2410071	3016884	3604437	3996061	n.a.
Wages and salaries, BGN'000.	454973	415738	483440	525294	575655	n.a.
Personnel costs, BGN'000.	603185	559309	637403	525294	571983	n.a.
Value of tangible fixed assets, BGN'000	2474027	2525260	2436826	1759214	1798815	1381536
Operating income, BGN'000.	2981356	2727440	3341833	4012363	5536084	4602496
Operating expenses, BGN '000.	2562865	2569378	2637844	3009184	4620868	38028720
Financial result from operating activities, BGN '000	418491	158062	703989	1003179	915216	799624
Value added at factor costs, BGN '000.	1345218	1277034	1790034	2044514	1911332	n.a.
Export of mining production, € '000.	3287707	3848548	2293456	3017475	7059375	5057451
Import of mining production, € '000.	6364848	6136746	4579977	6041212	12169804	5657451

Source: The table is based on INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=567
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=250
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=1947
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=2166

Table 3 presents the industrial production indices for the Industry sector, the Mining and Quarrying subsector, in total and by activities, calendar-adjusted to 2021.

The data in Table 3 show that, overall, the industrial production indices of the Mining and Quarrying Industry subsector lagged behind the industrial production indices of the Industry sector throughout the period. As a result of the economic crisis, a significant decline in the industrial production indices in 2020 was observed for the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector, and for the "Coal Mining" activity. During the analysed period, only "Mining of Non-Metallic Minerals and Raw Materials" remained stable.

Table 3. Industrial production indices for the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry sub-sector, in total and by activity (calendar-adjusted to 2021 = 100%)

Indicator	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Industry – Total	**98.6**	**97.1**	**91.1**	**100.0**	**113.3**	**103.8**	**100.1**
Mining and quarrying	87.1	91.5	90.0	100.0	108.6	93.8	89.6
Mining of coal and lignite	95.0	95.0	75.4	100.0	131.9	71.3	48.4
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	91.8	97.7	103.5	100.0	98.0	109.3	106.9
Other mining and quarrying	69.1	73.1	76.7	100.0	100.7	92.8	88.8
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..

Note: Data for the activities of "Oil and Natural Gas Extraction" and "Ancillary Activities in Extraction" are confidential because there are less than four companies.
Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2299

Table 4 presents the turnover indices in industry for the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector in total and by activities, calendar-adjusted to 2021.

The data in Table 4 show that only in 2020, in general, the turnover industry indices in Mining and Quarrying Industry subsector were ahead of f the Industry sector turnover indices, while significantly lagging behind in other periods. For the period 2018-2024, the mining industry realised extremely high dynamics of the turnover indices in the industry. According to this indicator, the industry underwent a series of ups and downs. Only coal mining remained relatively stable; however, since 2023 it has already shown a trend of significant decline. In the period 2022-2024, the mining of non-metallic raw materials was the most sustainable in growth.

Table 4. Turnover indices in industry for the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector in total and by activities (calendar-adjusted to 2021 = 100%)

Indicator	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Industry – Total	**78.9**	**81.5**	**75.5**	**100.0**	**156.8**	**123.9**	**121.5**
Mining and quarrying	63.3	70.7	76.8	100.0	107.7	92.1	92.8
Mining of coal and lignite	105.9	99.9	79.8	100.0	137.0	80.9	65.3
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	62.5	69.7	80.7	100.0	97.7	83.5	89.2
Other mining and quarrying	60.9	66.6	71.7	100.0	121.4	132.7	127.9
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..

Note: Data for the activities of "Oil and Natural Gas Extraction" and "Ancillary Activities in Extraction" are confidential because there are less than four companies.

Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2302

Table 5 presents the turnover indices on the domestic market and on the international market in industry for the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector, in total and by activities, calendar-adjusted to 2021.

Table 5. Turnover indices on the domestic market and on the international market in industry for the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector, in total and by activities (calendar-adjusted to 2021 = 100%).

Turnover indexes on domestic market in industry	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
Industry – Total	**74.9**	**76.5**	**71.8**	**100.0**	**163.11**	**121.4**	**117.7**
Mining and quarrying	68.7	70.5	73.2	100.0	113.2	110.3	111.0
Mining of coal and lignite	105.9	99.5	79.8	100.0	137.0	80.9	65.4
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	62.6	64.3	72.8	100.0	102.8	110.3	117.45
Other mining and quarrying	62.0	66.2	69.0	100.0	110.9	135.1	135.6
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..
Turnover indexes on non domestic market in industry	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
Industry – Total	**85.2**	**89.1**	**81.2**	**100.0**	**147.0**	**127.6**	**127.3**
Mining and quarrying	46.9	71.7	88.1	100.0	88.8	38.4	27.1
Mining of coal and lignite	..	..	..	..	..	..	..
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	62.1	86.8	105.2	100.0	81.5	0.0	0.0
Other mining and quarrying	56.4	68.6	83.5	100.0	125.3	117.8	102.8
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..

Note: Data for the activities of "Coal Mining", "Oil and Natural Gas Extraction", and "Ancillary Activities in Extraction" are confidential because there are less than four companies.

Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2303
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2304

The data in Table 5 show that, in general, the turnover indices on the domestic market of the Mining Industry subsector are lower than those of the Industry sector. The mining industry has achieved constant growth, with a slight decline of 2.9% in 2023. In 2022, record coal production was recorded, followed by a significant decline in 2023 and 2024. A trend of constant growth has become evident in the mining of metal ores and non-metallic minerals and raw materials. The turnover indices on the domestic market have been higher than those on the international market, which indicates that mining production is primarily directed to the domestic market. On the international market, the turnover indices of the Mining Industry subsector have been significantly lower than have been those of the Industry sector.

An interesting fact is that from September 2022 to the end of 2024, the turnover indices on the international market for the mining of metal ores were zero.

Table 6 presents the general manufacturer price indices in the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector, in total and by activities, calendar-adjusted to 2021.

Table 6. General manufacturer price indices in the Industry sector, the Mining and Quarrying Industry subsector, in total and by activities (calendar-adjusted to 2021 = 100%)

Indicator	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Industry – Total	**98.6**	**88.5**	**86.7**	**100.0**	**137.3**	**124.9**	**121.3**
Mining and quarrying	80.0	81.1	85.6	100.0	109.2	110.1	121.6
Mining of coal and lignite	110.2	104.3	104.4	100.0	104.3	119.7	134.8
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	69.1	70.1	76.6	100.0	104.3	99.0	111.7
Other mining and quarrying	91.1	93.1	96.1	100.0	123.4	140.7	146.7
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..

Note: Data for the activities of "Oil and Natural Gas Extraction”, and "Ancillary Activities in Extraction" are confidential because there are less than four companies.
Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1102

The data in Table 6 show that, with the exception of 2024, the overall manufacturer price indices of the Industry sector have been higher than those of the Mining and Quarrying subsector. In the mining industry, a steady growth of the overall manufacturer price indices has been observed. Only in 2023 was a decline observed in the prices of mined out metal ores. The extracted non-metallic minerals and raw materials have seen the highest average annual price increase. In 2024, a significant growth of 34.8% in the prices of the mined coal was also reported.

Table 7 presents the manufacturer price indices on the domestic market and on the international market in industry for the Industry sector, the Mining and Quarrying subsector, in total and by activities (calendar-adjusted to 2021 = 100%)

Table 7. Manufacturer price indices on the domestic market and on the international market in industry for the Industry sector, the Mining and Quarrying subsector, in total and by activities (calendar-adjusted to 2021 = 100%)

Producer price indexes on the domestic market in industry	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Industry – Total	**84.0**	**87.2**	**87.0**	**100.0**	**148.4**	**129.9**	**123.6**
Mining and quarrying	84.5	82.9	84.4	100.0	112.6	114.1	123.4
Mining of coal and lignite	110.2	104.3	104.3	100.0	104.4	119.8	134.9
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	74.2	69.8	72.6	100.0	109.0	104.1	113.0
Other mining and quarrying	92.9	95.0	96.3	100.0	120.6	136.2	144.1
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..
Producer price indexes on non-domestic market	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
Industry – Total I	**88.6**	**90.3**	**86.2**	**100.0**	**121.2**	**117.7**	**117.9**
Mining and quarrying	62.0	73.9	90.6	100.0	95.7	93.8	114.3
Mining of coal and lignite	..	..	..	..	..	..	..
Extraction of crude petroleum and natural gas	..	..	..	..	..	..	..
Mining of metal ores	..	..	..	..	..	..	..
Other mining and quarrying	85.4	86.2	95.5	100.0	133.4	156.8	155.8
Mining support service activities	..	..	..	..	..	..	..

Note: Data for the activities of "Coal Mining", "Oil and Natural Gas Extraction", ”Metal Ore Mining”, and "Ancillary Activities in Mining" are confidential because there are less than four companies.
Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1107
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1330

The data in Table 7 show that, in general, the manufacturer price indices on the domestic market are higher than the manufacturer price indices on the international market. The exception is the manufacturer price indices on the international market for the extraction of non-metallic minerals and raw materials: those have seen the highest growth rates.

Table 8 presents the GDP and GVA per employee for Bulgaria – in total, the GVA per employee for the Industry sector, and value added (VA) by factor costs per employee for the

Mining and Quarrying subsector at current prices in BGN. Labour productivity in the Mining subsector for the period 2018-2024 has been calculated in two variants based on INFOSTAT information about realised revenues from the activity and VA at factor costs, related to the number of employees in the subsector, previously presented in Table 2.

Table 8. GDP and GVA per employee for Bulgaria – in total, GVA per employee for the Industry sector, and VA by factor costs per employee for the Mining and Quarrying subsector at current prices

Indicator	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
GDP per employee – Bulgaria as a whole, BGN per employed person.	31174	34578	35550	40958	48879	53206	57653
GVA per employed person – Bulgaria total, BGN per employed person.	24790	27503	28584	33439	40771	43730	47746
GVA per employee – "Industry" total, BGN per employed person.	27155	28816	30585	33259	49438	48943	53297
Income from the activity of one employee for the subsector "Extractive industry", BGN per employed person	138526	143383	166393	206759	294473	246473	n.a.
VA at factor costs per employee for the "Extractive Industry" subsector, BGN per person employed.	62504	67135	89127	105355	101667	n.a.	n.a.

Source: per INFOSTAT data, compiled by the authors.
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=185
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=789
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=2166
https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=1947

Unlike GDP, the calculation of GVA measures the result of production at basic prices, before the assessment of taxes, including subsidies on products and services. For this reason, GVA is lower than GDP. Unfortunately, at the level of the Mining and Quarrying subsector, the GDP and GVA indicators are not determined. For this reason, the labour productivity of the subsector can only be represented by the indicators of "Revenues per employee" and of "VA by factor costs per employee".

The data in Table 8 show that the revenue per employee in the Mining and Quarrying Industry subsector grew from 138,526 BGN per employee in 2018 to 246,473 BGN per employee in 2023, which was an increase of 107,947 BGN per employee, or a 77.9% rise. The VA on factor costs per employee in the Mining and Quarrying Industry subsector grew from 62,504 BGN per employee in 2018 to 101,667 BGN per employee in 2022. The growth was 39,163 BGN per employee, or 62.7%. This was an average annual growth of 15.7%.

Conclusion

According to the renowned competitiveness ranking for 2024 of the Institute for Management Development, Switzerland, for the period 2020-2024, Bulgaria has lagged behind from 48th to 58th place. The most serious lag is in the following criteria: international investment; employment; labour market; attitudes and values; basic infrastructure; management practices; business legislation; productivity, and efficiency. These areas need to be a priority for the Bulgarian government.

Bulgaria’s national economy maintains a higher real GDP growth than the EU economy, is close to that of the US, and is inferior to the Chinese and global economies.

In the period 2018-2024, the Bulgarian economy marked a sustainable real growth of 2.6% on average per year. The derived linear regression models of the time series of Bulgaria's GDP at current prices and at 2020 prices justify a very high degree of predictability of the indicators based on a retrospective period.

The Industry sector (excluding Construction) achieved sustainable real growth in GVA for the period 2018–2024 of 14.1% on average per year. Bulgaria’s gross value added achieved sustainable real growth for the period 2018–2024 of 14.3% on average per year. For the period 2018–2024, the relative share of sector “Industry (excluding Construction)” in Bulgaria’s GVA changed from 21.4% in 2018 to 21.3% in 2024.

For the period 2018-2024, the industrial production indices, industrial turnover indices, turnover indices on the domestic and international market, general producer price indices, and domestic and international manufacturer price indices of the Mining and Quarrying sub-sector generally lagged behind the analogous indices of the Industry sector throughout the period.

For the period 2018-2024, the Bulgarian mining industry achieved extremely high dynamics, which indicates that the industry went through a series of ups and downs with a growth trend.

The revenue per employee in the Mining and Quarrying Industry subsector grew from 138,526 BGN per employee in 2018 to 246,473 BGN in 2023. This was an increase of 107,947 BGN (or 77.9%) per employee, or a rise of 15.6% per year.

The indicator of VA per factor costs per employee in the Mining and Quarrying Industry subsector grew from 62,504 BGN per employee in 2018 to 101,667 BGN per employee in 2022. The growth was by 39,163 BGN (or 62.7%) per employee, which was an average annual growth of 15.7%.

In the period 2018-2024, the Bulgarian mining industry increased its economic performance, labour productivity, personnel remuneration, and competitiveness.

Acknowledgements
This study was conducted in connection with the implementation of a contract for financing a research project "Socio-Economic Analysis of the Mining Industry in Bulgaria" - № MTF - 203 - 01.04.2025 of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" – Sofia.

References

Chursin, A., & Makarov, Y. (2015). *Management of Competitiveness: Theory and Practice*. London: Springer.

Dogaru, L. (2020). Eco-innovation and the contribution of companies to the sustainable development. *Procedia Manufacturing*, *46*, 294-298, DOI 10.1016/j.promfg.2020.03.043.

Garelli, S. (2002). *Competitiveness of Nations: The Fundamentals*. International Institute for Management Development. Available at: http://www.compilerpress.ca/Competitiveness/Anno/Anno%20Garelli%20CN%20Fundamentals.htm.

Ikram, M., & Sayagh, Y. (2023). The consequences of COVID-19 disruption on sustainable economy in the top 30 high-tech innovative countries. *Global Journal of Flexible Systems Management*, *24*, 247-269. DOI 10.1007/s40171-023-00338-z.

IMF. (2019). *World Economic Outlook Update: A Weakening Global Expansion.* January 2019. (accessed 11 March 2025).https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2019/01/11/weo-update-january-2019.

IMF. (2020). *World Economic Outlook Update: Tentative Stabilization, Sluggish Recovery?* January 2020. (accessed 11 March 2025).https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/01/20/weo-update-january2020.

IMF. (2021). *World Economic Outlook Update: Policy Support and Vaccines Expected to Lift Activity*. January 2021. https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2021/01/26/2021-world-economic-outlook-update. (accessed 11 March 2025).

IMF. (2022). *World Economic Outlook Update: Rising Caseloads, A Disrupted Recovery, and Higher Inflation.* January 2022. https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2022/01/25/world-economic-outlook-update-january-2022 (accessed 11 March 2025).

IMF. (2024). *World Economic Outlook Update: Moderating Inflation and Steady Growth Open Path to Soft Landing*, January 2024. https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2024/01/30/world-economic-outlook-update-january-2024 (accessed 11 March 2025).

IMF. (2023). World Economic Outlook. April 2023. https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2023/04/11/world-economic-outlook-april-2023. (accessed 11 March 2025).

IMF. (2025). *World Economic Outlook Update: Global Growth: Divergent and Uncertain*. January 2025. https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2024/01/30/world-economic-outlook-update-january-2024 (accessed 11 March 2025).

Institute for Management Development. (2024). *Bulgaria: Competitiveness Trends – Overall*. Provided by: Centre for the Study of Democracy, Sofia. available at: https://imd.widen.net/content/ma2a4k34pb/pdf/BG1page_WCY_2024.pdf.

OECD, 1996, Industrial competitiveness, Paris.

Porter, M. (1980). Competitive Strategy: Techniques for Analysing Industries and Competitors. *The Free Press*, Macmillan.

Porter, M. (2003). Building the Microeconomic Foundations of Prosperity: Findings from the Business Competitiveness Index. *The Global Competitiveness Report 2003-2004*. NY: Oxford University Press.

Porter, M. (2009). *Microeconomics of Competitiveness.* Institute for Competitiveness and Strategy, Harvard.

Siderova, G. 2013. Competitiveness of the Bulgarian mining industry. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 56*, Part IV, Humanitarian Sciences and Economics.

INFOSTAT - Information System of National Statistical Institute of Bulgaria,

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=135 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=185 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=789 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=567 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=250 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1102 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1107 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1330 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=1947 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/query.jsf?x_2=2166 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=1169 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2299 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2302 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2303 (accessed 11 April 2025).

https://infostat.nsi.bg/infostat/pages/reports/result.jsf?x_2=2304 (accessed 11 April 2025).

PREPARATION IN A FOREIGN LANGUAGE OF STAKEHOLDERS AND STUDENTS FOR TRAINING IN A SPECIALISED LABORATORY DURING MOBILITY

Milena Purvanova, Teodora Hristova

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

ABSTRACT. The mobility of students and teachers is a priority of the European Union and, as its member; Bulgaria participates in the provided and financed programmes. In this regard, the article presents a brief and algorithmic approach to preparing instructions in English for safety in an electrical laboratory. Initially, several standard instructions are offered, and then explanations of the possible harms are given. Examples of the applicability of the algorithm are also given at the stage of foreign language training of students according to their level of language proficiency. The materials are adapted for different levels of foreign language knowledge.

Key words: mobility, specialised laboratory, electrical equipment, instructions, foreign language training.

ПОДГОТОВКА НА ЧУЖД ЕЗИК НА ЗАИНТЕРЕСОВАНИ СТРАНИ И СТУДЕНТИ ЗА ОБУЧЕНИЕ В СПЕЦИАЛИЗИРАНА ЛАБОРАТОРИЯ ПРИ ОСЪЩЕСТВЯВАНЕ НА МОБИЛНОСТ

Милена Първанова, Теодора Христова

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

РЕЗЮМЕ. Мобилността на студентите и преподавателите е приоритет на Европейския съюз и България като негов член участва в предоставените и финансираните програми. Във връзка с това в статията е представен кратък и алгоритмичен подход за изготвяне на инструкции на английски език за безопасност в електротехническа лаборатория. Първоначално се предлагат няколко стандартни инструкции, а след това и обяснения за възможните вреди. Дават се примери за приложимост на алгоритъма и на етап чуждоезиково обучение на студенти според нивото на владеене на езика. Материалите са адаптирани за различните нива на знание на чуждия език.

Ключови думи: мобилност, специализирана лаборатория, електротехника, инструкции, чуждоезиково обучение.

Introduction

According to statistics, 3,200 projects from 84,000 organisations with over 1.3 million participants and a funding of 4.5 billion dollars take part in the *Erasmus*+ programme (“Factsheets and statistics on Erasmus+ - Erasmus+,” 2025). Of these funds, €19,110,619 was used for higher education in Bulgaria alone in 2023. This is the most famous programme in the field of higher and secondary schools, which is also the best funded.

Local inter-university projects exist which provide additional opportunities for lecturers and students to visit foreign educational and scientific institutions for training, exchange of experience, and teaching (“Four ways universities can enhance their community impact,” 2024). These may be partners with the local community, such as for acquiring knowledge on the part of stakeholders in business organisations. Another well-known option is for a particular institute to conduct research, innovation, or training on a topic assigned by the business in order to fill in the gaps in the community. Many pprogrammes for developing and implementing innovations to enhance sustainable development have been gaining popularity in recent years, including the production, distribution, and consumption of energy while maintaining its quality. The latter proves that mobility is not an end in itself, but an organised process. Its importance and participants are growing annually.

In connection with the available opportunities, each university must be ready to welcome foreign students and interested business people and help them quickly adapt to the educational and scientific process. Preparation for work in an electrical, mechanical, chemical, or other engineering laboratory is very specific. In this article, we particularly focus on the preparation of instructions for work in an electrical engineering laboratory. For this purpose, first an algorithm for presenting the material has been prepared; then, the most important regulations are cited; basic instructions are given; and finally, several examples are offered of possible damage in case of incorrect operation of the equipment. The described algorithm is also applicable in the training of Bulgarian students leaving for / participating in an international mobility. They are also obliged to observe the established safety rules at the university they are visiting. Therefore, they must also know the foreign language to an extent allowing them to understand the rules. This, in turn, determines the timely, high-quality, and thematically focused foreign language training of the students. To increase the level of comprehensibility, examples are given according to the level of proficiency in a foreign language.

Risks when working in an electrical engineering laboratory

The preparation of safety instructions, their translation, and presentation to students are performed according to a predefined order. The algorithm is as follows:

- The main hazards in a laboratory are defined; in this case considering an electrical engineering type, for electrical materials, or an electronics laboratory;
- The regulatory framework is reviewed;
- Basic safety rules are prepared;
- The method of delivering the briefing is determined;
- Some remarks are formulated, focusing on specific features and scientific research;
- The rules are translated for three levels of proficiency in English.



Fig.1. Students in a laboratory with a short circuit hazard

Hazards in laboratories are classified into:
• those with the occurrence of a short circuit,
• those with the occurrence of a fire,
• avoiding damage to equipment or a device.

To protect against the above, planning activities are carried out to reduce the risk (Asparuhov, 2014). In the manufacturing of high-tech equipment, stricter requirements are imposed regarding the presence of flammable materials or reagents (Asparuhov, 2015).

After the planning, the instructions are prepared. The hazards in laboratories are various, but the basic instructions are based on the regulations and the law. The most important of those are:

- Ordinance № 3 (“Ordinance No. 3 of June 9, 2004 on the design of electrical and power transmission lines,” 2018);
- Health and safety regulations when working in electrical installations of electric heating plants and on electrical grids (“Regulations for safety and health when working in electrical installations of electric heating plants and on electrical networks,” 2004) (State Gazette, issue 34/2004);
- Health and safety regulations when working with electrical equipment with voltage of up to 1000V (State Gazette, issue 21/2005);
- In the presence of machines, Ordinance № 02-01 (“Regulation No. RD-02-20-1 of June 12, 2018 on technical rules and regulations for control and acceptance of electrical installation work,” 2018) is used as well;
- The technical rules and standards for the control and approval of electrical installation works (“Regulations on the design and safe operation of transmission and distribution gas pipelines, and of natural gas facilities, installations, and appliances", n.d.);
- Regulations on the design and safe operation of transmission and distribution gas pipelines, and of natural gas facilities, installations, and appliances", 2018 /NUBEPRGSIUPG/ - adopted by Decree of the Council of Ministers № 171 of 16th July 2004, amended by State Gazette, issue 60 of 20th July 2018.

Laboratory rules are mandatory. Usually, the legal foundations, the basic rules and responsibilities, along with the official in charge, are stated.

Briefings

Visitors to the laboratories are made familiar with the rules through briefings. Depending on the hazard, briefings may be given at each entry, once a semester, or at a certain frequency: on a monthly basis, every other month, etc. Usually, the responsible officials are also briefed and have a certain classification group.

Special cases

Sometimes, briefings need to include provisions based on special cases or specific studies. These include the construction of buildings and laboratories close to a high-voltage network; supply with non-conventional energy sources; or additional installations for storing substances. They all must comply with the good practices not just in the operation, but also in the construction and the granting of permits for admissibility for use. Cases like these, supported by relevant studies, may include the following:

- Parameters of current when a person is in contact with conductive objects under high-voltage power lines (Petrov et al., 2023);
- Assessment of possible injuries when current from the electrical circuit passes through the human body (Petrov et al., 2022);
- Special fire prevention practices during construction, work in and operation of buildings (Vladkova, 2020);
- Parameters of gas and hydrogen pressure, their barometric characteristics, and the pressure exerted on the pipes which transport them (Vlaykova et al., 2024).



Fig.2. Short circuit on the human body

It can be seen that according to the specialty and the capabilities of the laboratory, there are various good practices. The job of specialists and laboratory managers is to monitor publications and research and select the most appropriate ones for a particular laboratory. Official rules should not be ignored. They need to be included in the major briefing. However, it is always appropriate to include examples of possible negative consequences according to the studies of specialists.

The introduction of the instructions to the persons must be followed by their understanding and compliance. That is why it is necessary to give examples of the possible accidents in case instructions are overlooked.

Training procedures

There are several options for preparing students for work in a specialised laboratory:

- One is direct briefing upon arrival at the site;
- The other is through distance learning, even before students arrive at the host institution. This can be performed in several ways:
  - through materials prepared in advance and sent out, with which students or stakeholders become familiar;
  - conducted in a remote environment via an online platform – asynchronously or synchronously (Department of Electronics, University of Ruse Angel Kanchev, Ruse, Bulgaria et al., 2022);
  - remote work in a virtual laboratory (Hristova et al., 2021).

The trainee feedback depends on the method of implementation. The goal is that after the briefing or reading the written instructions, they will have understood the basic safety rules and their obligation not to violate those.

The relationship between regulations and English language learning

English textbooks and manuals teach regulations and offer exercises to master them as speech patterns / oral statements. They are compatible with the rules in laboratories, regardless of their type. Here, we share our experience in foreign language safety training for students in electrical engineering specialties and for those studying oil and gas drilling and extraction. Through planned exercises, students themselves can consolidate knowledge not only in a foreign language, but also remember the necessary rules for visiting a laboratory or when doing field work.

In the elementary level of English language learning (A1) or from A1 to A2, safety rules when working with electricity are introduced with the study of modal verbs (Abbs and Freebairn, 1992):

- *must* and *have to* - to express [+degrees of duty or obligation];
- *must not* and *do not have to/does not have to* - to express [+degrees of prohibition].

Examples:

You must switch off the apparatus/tools/computers after work.

You must wear PPE on the oil rig.

You must turn off your mobile phone.

You have to look after your equipment.

You must not touch live wires with bare hands.

In the intermediate level of English language training (B1 to B2), the safety rules include the study of other modal verbs and the passive voice is introduced:

- *should /should not* and *ought to / oughtn't to* - to express [+recommendation] / [+advice].

Examples:

If you are not sure, you ought to ask the supervisor / responsible officer.

First, bare wires should be checked for electricity.

Protective clothing / Protective footwear / Safety helmets must be worn in this area.

Your seatbelt has to be fastened throughout the whole flight over water.

In the subsequent level of English language learning (B2), the study of modal verbs with a perfect infinitive to express the category of [+Aspect] is added to the safety rules.

For example, *for an electrical engineering laboratory,* the knowledge of a modal verb plus a perfect infinitive is used to express the semantic element of [+criticism on past actions], as in:

The student ought to have plugged each apparatus in a different socket to avoid overloading the network [meaning: but they did not do so].

The student ought to have monitored the quality of insulation because the damaged insulation caused a shortcut.

The student ought to have installed only certificated devices in the network and the apparatus.

The student should not have smoked a cigarette outside the smokers' cubicle because they caused a fire [meaning: they did it, breaking the rules, and caused damage to the equipment and hazards for the personnel].

A training example for students in the course of study in *Drilling* (Frendo and Bonamy, 2012, 2011)*:*

The roustabout should have used taglines to control the load [meaning: but they did not and the load swung to the left and right and posed a serious danger].

Conclusion

The article examines the latest trends in the mobility of participants and other stakeholders. There is an increasing interest among both Bulgarian and foreign students to visit educational institutions in partner countries or in third countries. Due to the need to brief them for safe work in electrical equipment, mechanical, machine-repair, chemical, drilling, and other laboratories, the briefing materials need to be prepared in a foreign language. Training materials which are in accordance with the regulatory framework have been prepared and are offered. The materials are adapted for different levels of foreign language knowledge. We believe that the latter is a prerequisite for quality preparation and training of students not only at the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", but also in other universities.

References

Abbs, Br., Freebairn, In. (1992). Developing Strategies, Students' Book. Prosveta, Longman, Sofia.

Asparuhov, S. (2014). Planning models for universal laboratory spaces (1/2), in: 14th International scientific conference VSU. p. 6.

Asparuhov, S. (2015). Design specifics for laboratory supporting spaces. Presented at the 15th International scientific conference VSU'201, Sofia, Bulgaria, p. 6.

Department of Electronics, University of Ruse Angel Kanchev, Ruse, Bulgaria, Evstatiev, B., Hristova, T., Gabrovska-Evstatieva, K. (2022). Investigation of Engineering Students' Attitude towards Virtual Labs during the COVID-19 Distance Education. ijeetc 373–384. https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.5.373-384

Four ways universities can enhance their community impact [WWW Document], (2024). THE Campus Learn, Share, Connect. URL https://www.timeshighereducation.com/campus/four-ways-universities-can-enhance-their-community-impact (accessed 3.27.25).

Frendo, E., Bonamy, D. (2012). English for Oil and Gas 2. Pearson ELT.

Frendo, E., Bonamy, D. (2011). English for the Oil Industry 1, Pearson ELT.

Hristova, T., Gabrovska-Evstatieva, K., Evstatiev, B. (2021). Prediction of engineering students' virtual lab understanding and implementation rates using SVM classification. *Journal of e-Learning and Knowledge Society* pp.62-71. https://doi.org/10.20368/1971-8829/1135420

Ordinance No. 3 of June 9, 2004 on the design of electrical and power transmission lines, 2018.

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, 012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012013

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, in: 2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES). Presented at the 2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), IEEE, Veliko Tarnovo, Bulgaria, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/CIEES55704.2022.9990795

Regulation No. RD-02-20-1 of June 12, 2018 on technical rules and regulations for control and acceptance of electrical installation work, 2018.

Regulations for safety and health when working in electrical installations of electric heating plants and on electrical networks, 2004.

Regulations on the design and safe operation of transmission and distribution gas pipelines, and of natural gas facilities, installations, and appliances"., n.d.

Vladkova, B. (2020). Best practices to improve construction site safety, in the specific conditions of processing plant building. MATEC Web Conf. 305, 00014. https://doi.org/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”, 67*, Sofia, pp. 97–101.

AVAILABILITY OF CRITICAL AND STRATEGIC METALS IN BULGARIA IN THE CONTEXT OF INTERNATIONAL PRIORITIES

Angelika Sofronieva

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

ABSTRACT. The raw materials considered by the European Union, the USA, and China as critical and strategic for ensuring the society sustainable development are indicated. Information accessible in the literature on the availability of critical and strategic raw materials in the Republic of Bulgaria is summarised, in particular for bismuth, vanadium, tungsten, gallium, germanium, cobalt, the platinum group metals, rare earth elements, and titanium.

Key words: critical, strategic, raw materials.

НАЛИЧНОСТ НА КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ МЕТАЛИ В БЪЛГАРИЯ В КОНТЕКСТА НА МЕЖДУНАРОДНИТЕ ПРИОРИТЕТИ

Ангелика Софрониева

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

РЕЗЮМЕ. Посочени са суровините, които се считат от Евпропейския съюз, САЩ и Китай като критични и стратегически за осигуряване устойчиво развитие на обществото. Обобщена е достъпна в литературата информация за наличието на критични и стратегически суровини в Р България, по-специално - за бисмут, ванадий, волфрам, галий, германий, кобалт, металите от платиновата група, редкоземните елементи и титан.

Ключови думи: критични, стратегически, суровини.

Въведение

Металите са необходими за устойчивото развитие на обществото и за всекидневния ни живот. Например, антимонът се използва в смеси, забавящи горенето, като катализатор, както и в оловните акумулатори. Бисмутът се използва в металургията, за атомни изследвания и в медицината. Ванадият се влага в батерии и металургията (като легиращ елемент на стомана), прилага се и като катализатор. Волфрамът се използва за производство на износоустойчиви метални сплави. Галият е незаменим в интегрални схеми и оптични устройства. Производството на оптични влакна и на приложения за нощно виждане, развитието на военната техника са немислими без германий. Кобалтът се използва в производството на акумулаторни батерии и суперсплави. Металите от платиновата група, като платина и паладий, са незаменими в производството на катализатори и каталитични конвертори. Редкоземните елементи се влагат в производството на батерии, постоянни магнити, лазери, оптични влакна и усилватели, аерокосмически сплави, използват се в ядрената енергетика. Титанът се използва основно в металургията за производство на специални стомани и за производство на пигменти.

Перспективи за употребата и критичност

Нарастването на населението, интензивната индустриализация и световната тенденция за развитие и прилагане на електромобилност, безвъглеродни технологии и използване на възобновяеми енергийски източници, бумът в комуникациите водят до нарастващото търсене на суровини в световен мащаб. Голяма част от суровините, жизнено важни за развитието на новите технологии, са концентрирани в малко, често политически нестабилни страни, което създава силна зависимост за много общности, включително Европейския съюз. Това води до създаване на списъци с критични суровини, предимно метали. Изборът на тези суровини се основава на два параметъра: икономическо значение и висок риск за доставките.

Икономическото значение отразява разпределението на суровините към крайните потребители по отношение на промишлените приложения. Рискът за доставките се фокусира върху географската концентрация на производството на първични суровини и възможността за снабдяване на съюза/държавите, изготвящи списъците. По отношение на Европейския съюз вторият параметър включва също отчитане на опазващи околната среда аспекти от производителите доставчици, приноса на рециклирането, заместването, зависимостта на ЕС от вноса и търговските ограничения в трети страни.

Последният списък на критичните и стратегически за Европа суровини включва антимон, арсен, барит, берилий, бисмут, боксит, бор/борат, ванадий, волфрам, галий, германий, кобалт, коксуващи се въглища, леки редкоземни елементи, литий, магнезий, манган, мед, метали от платиновата група, никел, ниобий, природен графит, силиций метален, скандий, стронций, тантал, тежки редкоземни елементи, титан метален, фелдшпат, флуоршпат, фосфати, фосфор, хафний, хелий. Медта и никелът не отговарят на праговете за критични суровини (CRM), но са включени в списъка с CRM като стратегически суровини, в съответствие с Европейското законодателство (European Commission, 2023).

Списъкът на САЩ от 2022 г. (https://www.federalregister.gov/documents/2022/02/24/2022-04027/2022-final-list-of-critical-minerals) включва алуминий, антимон, арсен, барит, берилий, бисмут, церий, цезий, хром, кобалт, диспрозий, ербий, европий, флуоршпат, гадолиний, галий, германий, графит, хафний, холмий, индий, иридий, лантан, литий, лутеций, магнезий, манган, неодим, никел, ниобий, паладий, платина, празеодим,

родий, рубидий, рутений, самарий, скандий, тантал, телур, тербий, тулий, калай, титан, волфрам, ванадий, итербий, итрий, цинк и цирконий. В действителност, двата списъка се припокриват в значителна степен, като в списъка на ЕК, редкоземните елементи и металите от платиновата група са обобщени. Като допълнителни критични метали в списъка на САЩ се забелязват индий, калай и цинк.

Китай оценява като критични и стратегически следните суровини: алуминий, антимон, кобалт, графит, литий, молибден, мед, никел, калай, волфрам, итербий, цирконий, графит, редкоземни елементи, желязо, хром, злато, калиев хлорид, флуорит (Andersson, 2020).

Ясно е, че има метали, които са включени едновременно в списъците на критичните суровини на водещите световни икономики. Тази дисбалансирана ситуация причинява икономическо, екологично и социално напрежение по целия свят. Следователно е налице спешна необходимост от диверсификация на първични и вторични източници, включително и преразглеждане на възможността за използване на суровини, които в миналото са се считали за неперспективни, както и от нови геоложки изследвания. Находищата с висока концентрация на критични метали, са рядкост и в значителна степен изчерпани. В този контекст нараства по значение изучаването на микроелементите (елементи с концентрация в геоложките материали под 0.1%). Носителите на критични метали обикновено се срещат като второстепенни фази или заместявания в скалообразуващи или аксесоарни минерали. Има данни за наличието на метали, включени в списъците на критичните, в България. Цел на настоящата статия е предоставянето на първоначална информация за някои от тези метали.

Наличие на някои критични метали в руди в България

Широко известни са достъпните и разработвани запаси на България по отношение на мед (von Quadt et al., 2005; Renaud, 2019), барит и манган (Nachev, 1998; Marchev et al, 2004; Moritz et al, 2014; Renaud, 2019; Dekov et al. 2020), наличните запаси на никел [https://oec.world/en/profile/bilateral-product/nickel-ores-and-concentrates/reporter/bgr; Bulgaria - Nickel Ores and Concentrates - Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights, INDEXBOX, 2025 Source: https://www.indexbox.io/store/bulgaria-nickel-ores-and-concentrates-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/), както и присъствието на арсен в нашите руди, като последният в повечето случаи създава проблеми на производителите на съответните концентрати (Dimitrova et al., 2016; Yotova et al, 2018; Hernández et al., 2023; Karimov et al., 2024).

По тази причина няма да се спираме на тези стратегически материали. Внимание ще бъде отделено на наличието на критични метали, които частично може да се разглеждат като "екзотични", тъй като руди не са добивани и преработвани с цел извличане на тези метали.

Антимонът е рядко срещан в земната кора, като горната й част съдържа само 0.4 ppm. Антимонът се среща в над 100 различни минерала, обикновено в асоциация с елементи като живак, сребро и злато. Основен руден минерал на антимона е стибнитът (Sb_2S_3) (European Commission, 2020).

Антимон, под формата на пираргирит (Ag_3SbS_3), се среща в находищата в Източните Родопи, например в Седефче, което е епитермално Ag-Au находище, част от Звездел-Пчелоядското рудно поле (Marchev et al., 2005; Lyutov, 2016).

В Западните Родопи (рудно поле Рибново, намиращо се на 10–20 km североизточно от Гоце Делчев) антимонът е концентриран в находища Рибново и Кременица. Антимонова руда е открита и в находище Аканджиево-2 - минерализирана зона обхваща североизточните склонове на Рила планина и части от Ихтиманска Средна гора, в района на Костенец и Белово (Popov and Popov, 2019).

Изследването на съдържанието на елементите примеси в пирит от медно-златното високосулфидно находище Челопеч, посредством Лазерна аблация, индуктивно свързана плазмена масспектрометрия (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry - LA-ICP-MS) метод, е установило, че антимонът е характерен примес за пирити от всички блокове на рудника, като концентрацията му достига до 172 - 327 ppm и се дължи на изоморфното му включване. Същевременно положителната му корелационна връзка с оловото индикира, че част от антимона се носи от галенита (Вангелова и др, 2023).

LA-ICP-MS анализите на минералите пирит, арсенопирит и на сулфосол от рудното поле Елаците-Челопеч в северната част на Панагюрска област са показали, че меднопорфирни находища, жилки от неблагородни метали и злато-неблагородни метали са основни носители не само на злато, но и на сребро и антимон (Stefanova et al., 2023).

Антимон е идентифициран на няколко места както в пирита, така и в халкопирита в мина Асарел, като средната му концентрация в пирита е под 0.6 ppm, а в халкопирита - под 0.5 ppm. Следователно, концентрациите на антимон са твърде ниски, за да се считат за потенциален страничен продукт при производството на мед (Lobo, 2022).

Бисмутът се среща естествено в минералите бисмутинит (сулфид), бисмутит (карбонат) и бисмит (оксид). Много рядко се извлича като основен метал, той често се добива като страничен продукт от преработването на оловни руди, като богатият на бисмут галенит е основната използвана руда, където бисмутът замества оловото в галенита или се среща също като включения в галенита (European Commission, 2020).

Изследванията показват, че в Маданското рудно поле има сребърно–бисмутни сулфосоли, в Ардинското рудно поле - сребро–бисмут–телур - съдържащи минерали (Marchev et al., 2005).

Малките рудни проявления и минерализации Суха река, Семиза и Качак чарк (Баташка минерализирана зона, обхваща част от Северните Родопи) се състоят от рудни жилки, гнезда и лещи, които образуват препластявания в мрамора (Стара река) или амфиболита (Семиза и Качак чарк) с бисмутинит, шеелит и пирит. Волфрамовото находище Грънчарица (Рило-Западнородопски руден район) - Бабяк-изток и Дагоново - запад, Юруково и Гъбника - запад и Заровец, съдържат волфрам-молибден-бисмутни руди, докато Червена могила и Св. Георги запад - молибден-бисмутни руди, Юруково - запад и Гъбника - волфрам-бисмутна руда. Рудната минерализация е

представена от шеелит, молибденит и бисмутинит в малки кварцови жили (Popov & Popov, 2019).

Комплексна бисмутова минерализация е установена в златорудното находище Свищи плаз (Централна Стара планина). Минерализацията е жилен тип, вместена в палеозойски диоритови, гранодиоритови и кварц-диоритови тела. Бисмутовата асоциация е сложна и най-често - полифазна. Микросондовите анализи са показали наличето на няколко групи от бисмутови минерали: самороден бисмут, бисмутоносен галенит, полиметална медно-оловна руда, съдържаща бисмут, полиметална сребърно-медно-оловна руда, съдържаща бисмут, и сребро-мед-олово-бисмут сулфосоли. Галенитът в находището съдържа от 1.23 до 4.72 тегл.% бисмут и от 1.06 до 1.86 тегл.% сребро (Mladenova et al. 2001).

Телуриди и селениди на бисмута са установени в медно-порфирните руди на Елаците под фомата на витинхенит - Cu_3BiS_3 и в Асарел - като айкинит - $PbCuBiS_3$ (Strashimirov et al., 2002).

Изследването на съдържанието на елементите - примеси в пирит от Челопеч също установява наличие на бисмут (Вангелова и др., 2023). Бисмут е наличен и в енаргит-лузонита от същото находище (Вангелова, 2023).

Геохимично проучване на халкопирит и пирит от находище Асарел на порфирни медно-златни руди показва, че бисмутът присъства в ниски количества както в пирита, така и в халкопирита, с концентрации, вариращи от 0.60 ppm до 21.54 ppm в пирита и от 0.94 ppm до 20.95 ppm в халкопирита. Някои проби от пирит, обаче, съдържат 44400 ppm бисмут. В повечето мини, където бисмут се добива като страничен продукт, съдържанието на метал варира между 0.08 тегл.% и 1.7 тегл.% (Lobo, 2022). Резултатите от изследването показват, че бисмутът може потенциално да се превърне в страничен продукт на мина Асарел. Необходимо е да се направи проучване за осъществимост, което да включва други жизненоважни фактори, като например вида на процесите на обработка, налични в момента в мината, общия обем на този метал в находището, цената на метала на пазара и др.

Ванадият се среща в много минерали и се получава основно като страничен продукт от производството на стомана. Наличието на ванадий в горната част на земната кора е 97 ppm. Сред 65 минерала, които съдържат ванадий, най-разпространените са патронит (VS_4), ванадинит [$Pb_5(VO_4)3Cl$] и карнотит [$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H2O$]. Ванадият присъства също във фосфатни, бокситни и железни руди. Основният минерал, в който се включват оксидните ванадиеви руди, е ванадиево-съдържащия магнетит, който често се среща в габрото. Типичните концентрации на ванадий в този магнетит са 0.7 - 1.5 % (European Commission, 2020).

Ванадиевите минерали сулванит и колозит се срещат в рудата от Медет, а в Асарел има арсен-съдържащ сулванит и колозит (Strashimirov et al, 2002).

С помощта на LA-ICP-MS анализ е установено набогатяване на алунита от Шарло Дере (високосулфидно епитермално (Cu-Au) находище Челопеч) с ванадий (концентрации 150 - 250 ppm), докато в западната част на находището концентрацията на ванадий е 106 - 133 ppm (Georgieva et al., 2020).

Вангелова и съавтори (2023) установяват наличие на ванадий в пирит, както и в енаргит-лузонит (Вангелова, 2023) от находище Челопеч. Концентрациите на ванадия в пирита са в интервала 0.5 - 83 ppm, най-често 0.6 - 7 ppm. Концентрациите на ванадия в енаргит-лузонита са в интервала 1.4 - 253 ppm, най-често 20 - 40 ppm.

Волфрамът се среща естествено на Земята почти изключително в химични съединения. Важните му руди включват волфрамит и шеелит. Концентрацията му в земната кора е 1.25 ppm (European Commission, 2020).

Волфрамова руда е открита в сребърно-оловно-цинковия руден пояс Осогово- Бесна кобила, в кварц-шеелит-молибденитова рудна формация. Формацията включва много волфрам-молибден рудни проявления, разположени в югоизточната част на Руенското рудно поле в Централно Осогово (Mankov, 2006).

Както бе споменато по-горе (при описанието, касаещо бисмута), в Рило-Западнородопския руден район, находище Гръмчарица са установени волфрамови руди. Волфрам има и в Югово-Нареченското рудно находище (Popov and Popov, 2019).

Молибденито-шеелитовата руда е добивана експериментално през 1981-1984 г. в участъци Перчинки и Прекоп на мина Мартиново в гранатовите (гросулар-андрадит) - пироксенови скарни. През този период са добити 91 тона молибден от 79 000 тона руда с 0.12% молибден, но не е известно дали волфрамът също е бил добиван заедно с молибдена (Dimitrova et al., 2017).

Съдържанието на **галий** в горната континентална кора е 17.5 ppm, което е сравнимо с това на оловото. Галият, обаче, не се среща в елементарната си форма в природата, а предимно замества други елементи в определени минерали, като например галит ($CuGaS_2$). Галият се извлича като страничен продукт от производството на алуминий и в много по-малка степен от производството на цинк. Тъй като е страничен продукт, оценката на ресурсите на галий е свързана с ресурсите на боксит и цинк (European Commission, 2020). Поради рядкостта на галиевите минерали в природата, галий се произвежда главно от минерали, съдържащи по-малко от 100 ppm Ga, в които елементът се среща като включвания или в твърд разтвор (Foley, et al. 2017).

Сфалеритът от Седефче (Звездел-Пчелоядското рудно поле, Източни Родопи) съдържа 133 - 136 ppm галий, като разпределението на галия в сфалерите е много равномерно (Lyutov, 2016).

Галий е установен посредством LA-ICP-MS и в медно-златното високосулфидно находище Челопеч - в пирита (Вангелова и др., 2023), както и в енаргит-лузонит, като в някои проби достига до 149 ppm, но най-общо концентрацията му е в интервала 0.8 – 20-20 ppm (Вангелова, 2023). В алунит от същото находище са установени концентрации в интервала от 7 - 8 до към 170 ppm (Georgieva et al., 2019).

Галий е открит както в пирит, така и в халкопирит от находище Асарел. Средната концентрация на галия в халкопирита от находище Асарел е около 37 ppm, докато в пирита е 0.56 ppm. Някои проби от халкопирит показват около 218 ppm Ga, а някои проби от пирит - 1.28 ppm. Следователно, галият може да представлява потенциален страничен продукт от производството на мед в Асарел (Lobo, 2022).

Германият се извлича от остатъци от производство на цинк (напр в Белгия, Канада, Финландия) и от въглищна пепел в Русия. Като страничен продукт, производството на германий е силно зависимо от производството на цинк и

производството от въглищна пепел (European Commission, 2020).

Германий е открит като микроелемент (в концентрации 2 - 20 ppm) в алунит от Челопеч, чрез използване на аналитичната техника LA-ICP-MS (Georgieva et al., 2019).

Изследванията на Вангелова и съавтори потвърждават наличието на германий в пирит (от 0.3 до 45 ppm, но най-често - под 10 ppm), както и в енаргит - лузонит (от 1 до 218, но най-често - под 25 - 30 ppm) (Вангелова, 2023).

Кобалтът се произвежда главно като страничен продукт от производството на никел и мед. Добивът на кобалт зависи от добива на мед и никел (European Commission, 2020).

Много високи концентрации (0.52 +0.19 %) на кобалт са открити в милерита от Маданско рудно поле, Крушев дол (Petrov, 2023).

Съгласно изследванията на Страшимиров и др. (2002) кобалт-никелов тиошпинел е установен в находищата на Медет и Елаците, в Медет се среща също кобалт, включен в пирита, както и каролит - $CuCo_2S_4$.

LA-ICP-MS анализите на минералите пирит, арсенопирит и на сулфосол от рудното поле Елаците-Челопеч са установили, че пиритът от медно-порфирните руди съдържа до 376 ppm кобалт, а сфалеритът - 100-110 ppm (Stefanova et al, 2023).

Находището на порфирна мед Асарел също съдържа кобалт (Hikov, 2013). В находището кобалтът е открит главно в пирита, с концентрация между 4.4 и 674 ppm, като в относително най-богатите на кобалт рудни жили е със средни стойности към 130 ppm. Установените концентрации навеждат на мисълта за потенциално извличане на кобалт като страничен продукт (Lobo, 2022).

Платиновата група метали (PGM) се състои от шест елемента: платина (Pt), паладий (Pd), родий (Rh), рутений (Ru), иридий (Ir) и осмий (Os). Разпространението на Pt в земната кора е 0.005 ppm, на Pd 0.015 ppm, а на Rh 0.001 ppm. Южна Африка е и вероятно ще остане доминиращият световен доставчик на Pt, поради огромната си ресурсна база, установената инфраструктура и експертиза за добив и преработване, като паладият и други платинови метали са вторични продукти. В Русия, PGM (главно Pd) са по същество страничен продукт от добива на никел. В Канада платината обикновено е страничен продукт от добива на мед и никел. В Съединените щати платината е страничен продукт от производството на паладий. Родият е страничен продукт от добива на платина и паладий (European 2020).

Василит, $(Pd,Cu)_{16}(S,Te)_7$, е открит край Новоселци, Бургаско и описан от Атанасов (1990).

Концентрациите на елементи от платиновата група и разпределението на минералите от платиновата група са изследвани в хромититовите проявления Добромирци и Плетене от ултрамафичния комплекс на Източните Родопи. Концентрациите на PGM в хромититите варират от 0.787 до 0.891 ppm (Добромирци). Най-високата стойност е регистрирана в хромитна руда от Плетене (1.274 ppm). Обогатяването на PGM се дължи на високото съдържание на Os, Ir и Ru, докато съдържанието на Rh, Pt и Pd е сравнително ниско. Съдържанието на Ru е 0.480-0.600 ppm. Текстурните аспекти и резултатите от химичните анализи показват, че концентрацията на PGM не е причинена от заместване в решетката на хромита, а от магматично образуване на дискретни PGM преди или едновременно с хромита (Tarkian et al., 1991).

Меднопорфирните минерализации в Средногорието съдържат PGM. Economou-Eliopoulos и Eliopoulos (2000) дават ценна информация за концентрациите на Pd и Pt в различни типове руди от Медет, Асарел и Елаците:

- Медет: калиев-пропилитно-силикат - Pd 50 ppb, Pt 26 ppb; основни минерали кварц и ортоклаз - Pd 30 ppb, Pt <10 ppb; пирит, халкопирит - Pd 7 ppb, Pt <10 ppb; калциево-алкални минерали - Pd 29 ppb, Pt 12 pp.
- Асарел: калиев-пропилитно-силикат - Pd 10 ppb, Pt 33 ppb; калциево-алкални минерали - Pd 10 ppb, Pt 33 ppb.
- Елаците: основни минерали кварц и ортоклаз - Pd 20 ppb, Pt <10 ppb; пирит, халкопирит - Pd 1 ppb, Pt <19 ppb (Economou-Eliopoulos and Eliopoulos, 2000).

Изследванията на Страшимиров и съавтори (2002) показват, че паладият е под формата на многобройни финозърнести минерални включвания (паладоарсенид, Pd-рамелсбергит) в халкопирит и пирит от Елаците.

Редкоземните елементи (REE) се разделят на две групи: леки редкоземни елементи (LREE - La, Ce, Pr, Nd, Sm) и тежки редкоземни елементи (HREE - Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y), както по физико-химични, така и по търговски причини (European Commission, 2020).

Находищата на редки елементи се срещат в голямо разнообразие от скали и генетични типове (Bru et al., 2015). Най-важните за търговска експлоатация са находищата, свързани с карбонатити (включително изветрели карбонатити), находища с йонна адсорбция, алкални магмени скали (включително алкални гранити), разсипни находища и по-рядко хидротермални находища и находища на морското дъно. Находищата варират по размер и съдържание. Находищата, свързани с карбонатити, са склонни да бъдат със среден до голям тонаж и с високо съдържание. Находищата на алкални скали обикновено са с по-голям тонаж, но с по-ниско съдържание. Плажните пясъчни разсипни находища са с променлив размер и обикновено с ниско съдържание; основният минерал, съдържащ REE в тези находища е моназитът (с потенциално съдържание на торий). Находищата с йонна адсорбция са сравнително малки и с ниско съдържание, но относително богати на HREE, съдържащи се в йонно-адсорбционни глини и ксенотимова минерализация. Концентрацията на редкоземни елементи варира в зависимост от вида минерализация, както и между отделните рудни тела. Към днешна дата само 4 минерала (бастнастит, моназит, ксенотим и йонните глини в Китай) се преработват успешно (European Commission, 2020).

За наличие на тежки редкоземни елементи в рудата от Елаците (повече) и Асарел (по-малко) се споменава в работата на von Quadt и съавтори (2005). По-късни изследвания потвърждават тази информация. Хиков дава стойности за сумата на редкоземните елементи в различни проби от вулканични и порфирни руди от находище Асарел най-общо в интервала 100 - 120 ppm (Hikov, 2013)

Гранатът от скарнови промени, асоцииращи с медно-порфирно златно находище Елаците съдържа повече HREE, в сравнение с LREE (Georgieva, et al, 2023).

Изследван е алунит от Cu-Au находище Челопеч - проби от Шарло дере (отдалечена най-източна част на находището – повърхност със съвременна надморска височина 750 m, с нерентабилна минерализация) и проучвателен блок 151 (западен сектор на находището, по-дълбоки нива). LA-ICP-MS анализите показват, че съдържанието на REE са по-високи в алунитите от по-

дълбоките слоеве, в сравнение с алунити от Шарло Дере. Измерените концентрации на LREE като цяло ясно преобладават над HREE. Резултатите от анализите показват наличие на La в границите 0.59 - 6.67ppm, Ce 1.52 - 20.50 ppm, Pr 0.25 - 2.08 ppm и Nd <1.13- 7.67 ppm (Georgieva et al., 2020).

Титанът се получава главно от минералите рутил, илменит и рядко от анатаз (бета-титанов диоксид). Други минерали, съдържащи титан, са перовскит, сфен и титанит. Тъй като йонният радиус на титана е подобен на някои други често срещани елементи, титанът присъства в повечето минерали, скали и почви. Въпреки това, има малко титанови минерали с повече от 1% съдържание на титан. Земната кора съдържа 0.64 тегл % TiO_2. Титанът може да се добива от интрузивни кристални скали, изветрели скали и неконсолидирани седименти. Половината от целия добит титан идва от неконсолидирани седименти, известни като брегови разсипни находища (European Commission, 2020).

Първото специализирано изследване на богатия на титан магнетит от Странджа датира от 1941 г., когато Димитров и Каменов (1941). представят доста подробни петрологични изследвания на минералното сраствane титан-магнетит-илменит в габрото на Манастирските височини. Те правят количествена и качествена оценка на титановите минерали и техните вместващи скали. Следващото ниво на разбиране е подробна статия на Каменов (1969), който описва петрологичните разновидности на многофазното находище, дефинира специален тип „рудоносно габро“, което вмества на титановата минерализация. През 1975 г се появява информация в доклад на Американското геоложко общество за наличие на титан и ванадий в Странджа, находището край с. Кости - скалите габро съдържат TiO_2 6-7 %, V_2O_5 - 0.56 - 0.63 % (Fisher, 1975). Акцентът върху ванадия е поставен от Канурков (1988) в публикация, която посветена на няколко горнокредни базисни интрузии в България, включително находището в Странджа, всички от които носят богат на титан магнетит.

Изследванията на Бонев и съавтори посочват наличието на титан в метаморфозирани мафични офиолитни скали в метаморфния разрез на Източния Родопски масив в България (Bonev et al., 2023). Те се характеризират с променливо съдържание на TiO_2 (0.26–3.76 тегл. %) и се разделят на две групи - с високо съдържание на титан (>1 тегл. %) и ниско съдържание на титан (<1 тегл. %). Същите метамафични скали съдържат и ванадий - в концентрации 140 – 819 ppm.

Титанит ($CaTiSiO_5$), е открит чрез GeoCore X10 сканиране и EPMA-EDS анализи в централната част на мина Асарел, като самостоятелен минерал в основната маса и/или като включвания, заедно с рутил (TiO_2), в пирита от сулфидно-носещите рудни жилки. Средна концентрация от 2500 ppm титан е твърде ниска, за да се счита този метал за възможен страничен продукт за мината (Lobo, 2020).

Заключение

България има потенциала да се превърне в ключов доставчик във веригата за снабдяване на Европа с някои критични суровини.

Направеният кратък преглед на публикуваните резултати води до извода, че се обръща основно внимание на наличие на критични метали в изследваните геоложки материали, на процесите на формиране на минералите, в които се намират съответните критични метали, но не толкова на общата картина, описваща всички минерали в дадени рудни находища, още по-малко на средните концентрации на металите в рудата и съответните количества/запаси на рудата, носеща тези метали. Необходими са допълнителни инвестиции в проучване и актуализиране на оценката на добивния потенциал, резервите и ресурсите на България.

Критичните метали обикновено се срещат в носители, които са второстепенни фази или замествания в скалообразуващи или аксесоарни минерали. Следователно е обичайно икономическата целесъобразност за добив на критични метали да е свързана с цените на основните метали (напр. мед, олово, цинк). Това е свързано със затруднения при първичния им добив, включващи технологични, екологични, икономически и социални проблеми. С цел осигуряването на устойчиво извличане на критични метали от първични суровини са необходими целенасочени изследвания, внедряване на иновации в съществуващите технологии и разработването на нови технологии.

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

Вангелова, В. (2023). Геохимия на рудни минерали от находище Челопеч: II. Елементи-примеси в енаргит-лузонит, *Списание на българското геологическо дружество*, год. 84, кн.1, 59–77. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.1.59

Вангелова, В., Добрев, М., Топчийски, С., Кузманова, П. (2023). Геохимия на рудни минерали от находище Челопеч: I. Елементи-примеси в пирит, *Списание на българското геологическо дружество*, год. 84, кн. 1, 31–57. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.1.31

Andersson, P. (2020). Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, categories, policies, and implications, *The Extractive Industries and Society 7*, 127–137. https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.01.008

Atanasov, A. V. (1990). Vasilite, (Pd, Cu) 16 (S, Te) 7, a new mineral species from Novoseltsi, Bulgaria. T*he Canadian Mineralogist*, *28*(3), 687-689.

Bonev, N., Dotseva, Z., Filipov, P. (2023). Geochemistry and tectonic significance of metamorphosed mafic ophiolitic rocks in the upper high-grade basement unit of the eastern Rhodope Massif (Bulgaria-Greece) *Geologica carpathica*, 74, 1, 23–39. https://doi.org/10.31577/GeolCarp.2023.05

Bru, K., Christmann, P., Labbe, J .F., Lefebvre, G. (2015). Panorama 2014 du marché des Terres Rares. Rapport public BRGM/RP-64330-FR, BRGM. https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65330-FR.pdf

Dekov, M. V., Maynard, J B., Kamenov, G. D., Rouxel, O., Lalonde, S., Juranov, S. (2020). Origin of the Oligocene manganese deposit at Obrochishte (Bulgaria): Insights from

C, O, Fe, Sr, Nd, and Pb isotopes. *Ore Geology Reviews,* 122 Article 103550. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103550

Dimitrov, Z., Kamenov, B. (1941). *Der Titanomagnetite in den Manastirhöhen S.O. Bulgariens*. Annu Directorate natural wealth, A 662 – 1, 105-120 (In Bulgarian with a German abstract)

Dimitrova, D., Velitchkova, N., Mladenova, V., Kotsev, T., Antonov, D. (2016). Heavy metal and metalloid mobilisation and rates of contamination of water, soil and bottom sediments in the Chiprovtsi mining district, Northwestern Bulgaria. *Geologica Balcanica 46*, 47–63. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.45.0.47

Dimitrova, D. A., Mladenova, V. G., Gorolomova, V. D., Skarn-hosted molybdenite ± scheelite mineralization in NW Bulgarian, Proceedings of the XXXIV International Conference on Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits, 4-9 August 2017, Miass, Russia (pp. 60-62).

Economou-Eliopoulos, M., Demetrios, Eliopoulos, G. (2020). Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance, *Ore Geology Reviews, 16*, 59-70, PII: S0169-1368_99.00024-4. https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00024-4

European Commission, COM (2023). *160 final Annexes to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the 625 Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regula-626 tion European Commission s (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020*, Brussels. [accessed 31 July 2025]. https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j4nvgs5kjg27kof_j9vvik7m1c3gyxp/vm1k8v6i2yzm/f=/7568_23_add_2.pdf

European Commission, (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials*, Factsheets on Critical Raw Materials, European Commission B-1049, Brussels.

Fisher, R. P. (1975). Vanadium resources in titaniferous magnetite deposits. Geology and resources of vanadium deposits, Geological Survey, Professional Paper 926-B, U.S. Government Printing Office Washington.

Foley, N. K., Jaskula, B. W., Kimball, B . E., Schulte, R. F. (2017). Gallium, chap. H, Klaus J. Schulz, DeYoung Jr., Robert R. Seal, II, and Dwight Bradley (Eds.). Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey, Professional Paper 1802, p. H1–H35, https://doi.org/10.3133/pp1802H.

Georgieva, H., Nedialkov, R., Stefanova, E., Milenkov, G., Krumov, I., Georgiev, N. (2023). Preliminary data on the mineral chemistry of garnet from the skarn alteration associated with the Elatsite porphyry-copper gold deposit, Bulgaria, *Review of the Bulgarian geological society, 84*, 3, 31–34, https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.3.31

Georgieva, S., Stefanova, E., Hikov, A., Peytcheva, I. (2019). LA-ICP-MS trace element study of alunite from the Chelopech high-sulphidation epithermal deposit, Bulgaria, *Review of the Bulgarian geological society*, *80*, 3, 66–68.

Georgieva, S. Stefanova, E., Hikov, A., Peytcheva, I. (2020). Trace element geochemistry of alunite from the Chelopech high-sulphidation epithermal deposit, Bulgaria: a potential tool for exploration of epithermal deposits, *Comptes rendus de l'Acad´emie bulgare des Sciences*, *73*, 8, 1092-1101, https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.08.07

Hernández, M.C., Benavente, O., Roca, A., Melo, E., Quezada, V. (2023). Selective Leaching of Arsenic from Copper Concentrates in Hypochlorite Medium. *Minerals*, *13*, 1372. https://doi.org/10.3390/min13111372

Hikov, A. (2013). Geochemistry of hydrothermally altered rocks from the Asarel porphyry copper deposit, Central Srednogorie. *Geologica Balcanica*, 42 (1 – 3), 3-28.

Kamenov, B. (1969). Petrochemical characteristics of the rocks from the Manastir heights. Annu Sofia University, 61(1), 1-31.

Kanurkov, G. (1988). *The iron-ore deposits of Bulgaria*. Technika: Sofia, Bulgaria. (In Bulgarian with an abstract in French).

Karimov, K., Dizer, O., Tretiak, M., Rogozhnikov, D. (2024). Purification of Copper Concentrate from Arsenic under Autoclave Conditions. *Metals 14*, 150. https://doi.org/10.3390/met14020150

Lobo, L. (2022). Geochemical study of trace and critical elements in chalcopyrite and pyrite from the Assarel Porphyry-Cu-Au deposit, Bulgaria, Published at Department of Earth Sciences, Uppsala University (www.geo.uu.se), Uppsala, Degree Project at the Department of Earth Sciences, ISSN 1650-6553 Nr 578, 120 pp.

Lyutov, G., (2016). Trace-elements in sphalerite, pyrargyrite, pyrite and arsenopyrite from silver-gold deposit Sedefche, Eastern Rhodopes, *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Vol. 59*, Part I, Geology and Geophysics, 35-40.

Mankov, S. (2006). The ore belt "Osogovo - Besna kobila" (ore formations, morphogenetic types of deposits and physico-chemical conditions of forming), *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Vol. 49*, Part I, Geology and Geophysics, 119-130.

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

Marchev, P., Raicheva, R., Downes, H., Vaselli, O., Chiaradi, M., Moritz, R. (2004). Compositional diversity of Eocene–Oligocene basaltic magmatism in the Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: implications for genesis and tectonic setting, *Tectonophysics*, *393*, 1–4, 301-328, https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.07.045

Mladenova, V. Kerestedjian, T., Dimitrova, D. (2001). Ag-Cu-Pb-Bi mineralization from the Svishti Plaz gold deposit, Central Balkan Mountain, Bulgaria, *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, *38*, 55-66.

Moritz, R. Noverraz, C., Marton, I., Marchev, P., Spikings, R., Fontignie, D., Spangenberg, J. E., Vennemann, T., Kolev, K., Hasson, S. (2014). Sedimentary-rock-hosted epithermal systems of the Tertiary Eastern Rhodopes, Bulgaria: new constraints from the Stremtsi gold prospect. Article Geological Society London Special Publications. https://doi.org/10.1144/SP402.7

Nachev, K. I. (1998). The Alpine manganese ores in Bulgaria-paleogeodynamic control, *Review of the Bulgarian Geological Society*, *59*, 1, 27-32.

Petrov, P. (2023). Millerite from the Madan ore field, *Review of the Bulgarian Geological Society*, *84*, 3, 2023, 67–69, https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.3.67

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.

Quadt, A., Moritz, R., Peytcheva, I., Christoph, A. Heinrich Z. (2005). Geochronology and geodynamics of Late Cretaceous magmatism and Cu–Au mineralization in the Panagyurishte region of the Apuseni–Banat–Timok–Srednogorie belt, *Bulgaria Ore Geology Reviews 27*, 95–126, https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.024

Renaud, M. K. (2023). The Mineral industry of Bulgaria, 2019 Minerals Yearbook, Bulgaria, US dept. of Interior, US Geological Survey.

Stefanova, E., Georgiev, S., Peytcheva, I., Marchev, P., von Quadt, A., Raicheva, R., Gerdjikov, I., Kouzmanov, K., Boyce, A., Vennemann, T. (2023). Sulfide Trace Element Signatures and S- and Pb-Isotope Geochemistry of Porphyry Copper and Epithermal Gold-Base Metal Mineralization in the Elatsite–Chelopech Ore Field (Bulgaria). *Minerals 13*, 630. https://doi.org/10.3390/min13050630

Strashimirov, S., Petrunov, R. & Kanazirski, M. (2002). Porphyry-copper mineralisation in the central Srednogorie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita, 37*, 587–598, https://doi.org/10.1007/s00126-002-0275-6

Tarkian, M., Naidenova, E. & Zhelyaskova-Panayotova, M. (1991). Platinum-group minerals in chromitites from the Eastern Rhodope ultramafic complex, Bulgaria. *Mineralogy and Petrology 44*, 73–87 https://doi.org/10.1007/BF01167101

Yotova, G., Zlateva, B., Ganeva, S., Simeonov, V., Kudłak, B., Namieśnik, J., Tsakovski, S. (2018). Phytoavailability of potentially toxic elements from industrially contaminated soils to wild grass Ecotoxicology and Environmental Safety, 164 317–324, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.077

INNOVATIVE METHODS IN ENTERPRISE MANAGEMENT IN THE DIGITAL ERA

Boryana Trifonova, Emil Dimov

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

ABSTRACT. The digitalisation of modern economic, technological and social processes imposes a new conceptual basis for the management process in enterprises. At the same time, the introduction of environmentally sustainable practices in industry is becoming increasingly necessary due to the growing requirements for the protection of natural resources and responsible production. Responsible management includes considering the benefits of digital transformation and the social effect of technological innovations. The purpose of the research in the report is to prove the connection between stimulating innovation through the implementation of digital tools and the competitiveness of enterprises. The development methodology includes a study of scientific literature, conducting a survey, summarising, and a systematic and graphical approach. The results show that new technologies not only improve the efficiency of companies but also create a more flexible and motivated work environment that is able to adapt to future challenges.

Key words: digitalisation, enterprise management, innovations, management methods.

ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ В УПРАВЛЕНИЕТО НА ПРЕДПРИЯТИЯТА В ДИГИТАЛНАТА ЕРА

Боряна Трифонова, Емил Димов

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

РЕЗЮМЕ. Дигитализацията на съвременните икономически, технологични и социални процеси налага нова концептуална основа на управленския процес в предприятията. В същото време въвеждането на екологично устойчиви практики в индустрията става все по-необходимо поради нарастващите изисквания за опазване на природните ресурси и отговорно производство. Отговорното управление включва отчитане на ползите от дигиталната трансформация и социалния ефект на технологичните иновации. Целта на изследването в доклада е да докаже обвързаността между стимулирането на иновациите чрез внедряването на дигитални инструменти с конкурентоспособността на предприятията. Методиката на разработване включва: проучване на научната литература, провеждане на анкетно проучване, обобщение, системен и графичен подход. Резултатите показват, че новите технологии не само подобряват ефективността на компаниите, но и създават по-гъвкава и мотивирана работна среда, която е способна да се адаптира към бъдещите предизвикателства.

Ключови думи: дигитализация, управление на предприятия, иновации, методи на управление.

Introduction

The growth of new technologies undermines several traditional concepts such as economic growth, social equality, ecological balance, property rights, stable incomes, material assets, professional employment, labour exploitation, work habits, political power, liberalism, personal life and home environment, information processing, security, and human intelligence. These challenges are inevitably reflected in the management policy and practice of industrial enterprises. **The aim** of the report is to establish the extent of the use of innovative methods in the management of industrial enterprises in Bulgaria, indicating both the benefits and difficulties associated with the digitalisation of processes. Four main **tasks** are set: a comprehensive review of the existing literature on the topic; conducting a study of the innovative methods used in the management of industrial enterprises in Bulgaria; deriving the indicated advantages of the digitalisation of processes; systematising the difficulties in implementing innovative methods in these enterprises. **The research thesis** to be proven is achieving competitiveness of industrial enterprises that is linked to the use of innovative methods in managing the challenges of imperative investments in technology, training, and development of human capital, and expectations for process efficiency. Against the backdrop of contemporary trends in industrial society, related to dynamic changes in technology and engineering, the deteriorating state of the labour market and forecasts, the unstable political and international environment, **the research questions** are related to the impact of digitalisation on the policies and practices of management of industrial enterprises in Bulgaria.

Literature Review

Innovation, digitalisation, automation, digitization, and high technologies play an important role during the crisis due to the need to change and adapt processes in enterprises. They show the potential to provide a relevant response to the crisis situation that has arisen for businesses and to respond to new tendencies (Galabova, 2021).

Contemporary business trends include advanced digitalisation, big data, and artificial intelligence (AI), which at the same time emphasises the role of new technologies in meeting emerging demands on the industrial, societal, and environmental landscape. This means using data and AI to increase production flexibility in times of disruption, and rendering value chains more robust; it means deploying technology that adapts to the worker, rather than not the other way around; and it means using technology for circularity and sustainability (Breque, De Nul, Petridis, – European commission, 2021, p. 11).

Competitive advantage has shifted from a firm’s tangible/actual resources and capabilities to being significantly dependent on a firm’s digital capabilities in the digital age. (Shao, 2024) In the Digital world, the terms digitalisation, sustainability, and innovation are the ones that draw attention and transform the modern business development and societal welfare. Business has collective needs for optimising operations, for managing raw materials, large production, innovative assembling, packing, and dispatching. Digitalisation can play a vital role in providing valuable data to help making businesses more efficient and sustainable. Sustainability measurement as a whole requires comprehensive data and information. (Anbuselvi and Selvamani, 2025)

Petrova (2023) emphasises that “the evolution of industrial revolutions has gradually enabled the integration of circular economy principles into traditional industrial models, with digital technologies acting as a catalyst in this transformation”. This suggests that technological innovation is not only a tool for modernisation, but a structural enabler of sustainability transitions across sectors.

Fast advancing tech behind machine-learning, natural language processing, and data analytics continues to spur the increasing use of AI in business. Their capacity to analyse massive volumes of structured and unstructured data allows organisations to gain instant insights and make information-based choices (Topol, 2019). AI is used in the finance industry to enhance risk evaluation, fraud detection, and market prediction. Predictive analytics enables financial organisations to analyse trends, evaluate risks, and determine optimal investments (Kou et al., 2021).

Scholars and practitioners have focused upon defining the elements of an agile organisation with less focus upon how leaders build organisations with high levels of agility. An argument may be made that additional research is necessary to determine how organisations become more agile, with specific attention to how organisation leaders create agile organisations. The theory of transformational leadership could contribute to the knowledge of how leaders create more agile organisations (Gagel, 2017)

We can summarise current and effective leadership approaches towards creating organisational flexibility:

• Agile management – management that focuses on collaboration, adaptability, and rapid response to changes

• Flat Hierarchy – reducing the levels of hierarchy in the enterprise, which encourages communication and rapid decision-making

• Data-Driver management – using large databases and analytical tools for decision-making

• Design thinking – an approach that puts the customer at the center of the process of developing new products from idea to implementation

• Self-managing teams – creating teams that organise their own work, make decisions without constant supervision

• Holacracy – a variant of a linear structure, in which power is distributed between teams with very clearly defined responsibilities

• Objectives and Key Results (OKR) – a method in which management emphasises on clearly set goals, the results of which are measured by previously set key indicators

• AI integration – means implementing automation of routine tasks, which frees up employees’ time and effort for more creative and strategic tasks

• Change management – the “ADKAR” (**A**wareness, **D**esire, **K**nowledge, **A**bility, and **R**einforcement) approach can be mentioned, which helps the organisation adapt to changes more effectively. It is oriented towards communication, training, and support of employees

• Empathetic leadership – managers are oriented towards understanding the emotional and personal needs of employees, to improve engagement and productivity

• Circular management – adopting the principles of the circular economy, to reduce the company's environmental footprint

• Gamification – introducing the game element into the work process, in training, in assessment, to enhance motivation and engagement

• Open management – this means more transparency of management decisions and processes with which employees are involved in management, understand, and accept the goals of the organisation as their own

• Remote team management – using digital tools for effective management of remote teams, most often through the Google and Zoom platforms

• Experimental management - a method for reducing the risk of failure of innovations. It involves conducting experiments and testing new ideas on a small scale, before their final application.

Digital management of a company changes the framework and basic principles applied by traditional management. For example, roles in the structure of the organisation change, accountability and decision-making are carried out in a different way, as well as the powers of managers in these processes. Where a framework for transitioning to digital management is built, the costs and time for its implementation are minimised. According to Thomas Chamorro-Premuzic (Chamorro-Premuzic, 2021) In fact, the essence of digital transformation is to become a data-driven organisation, ensuring that key decisions, actions, and processes are strongly influenced by data-driven insights, rather than by human intuition. He points out five necessary components to implement the digital transformation of the organisation, shown in Fig. 1.

Any transformation, even digital, starts with the **people** from whom some actions are expected - be it as users, employees, or customers. To increase organisational competitiveness, it is necessary to have more and more **data** about the interactions with these users, employees, or customers. This is where new technologies are largely used, which can extract the most useful from all the data. Therefore, in the third place, come the experts with whose help we can delve into the data and turn it into meaningful **insights**. But even the most interesting and fascinating insights may not be used if a plan is not made on how to turn them into **actions**. Finally, **the results** are evaluated, which in turn are also a type of data necessary for the future work of the company's management.

Creating a digital transformation requires leadership in team management to successfully guide the perception and behaviour of the parties involved. The crucial aspect is balance between all essential segments in the context of new paradigms, but always keeping human in the center. Generally, the Industry 5.0 paradigm brought the change of main research objectives from sustainability towards human-centricity. From the managerial perspective, it means focusing on workers’ education and lifelong learning, instead of focusing on the purchase of new technology, or similar. (Zizic et al., 2022). In this iterative process, it is imperative to improve and develop the skills of employees so that they are ready for the challenges of transformation.

Methodology

The aim of the study is to prove the relationship between the degree of use of innovative methods in the management of industrial enterprises and their competitiveness. The methodology of the study includes a study of scientific literature, a survey, a summary, and a systematic and graphical approach. The prepared questionnaire comprising 20 questions examines the challenges that the management of industrial enterprises faces in the conditions of digitalisation.

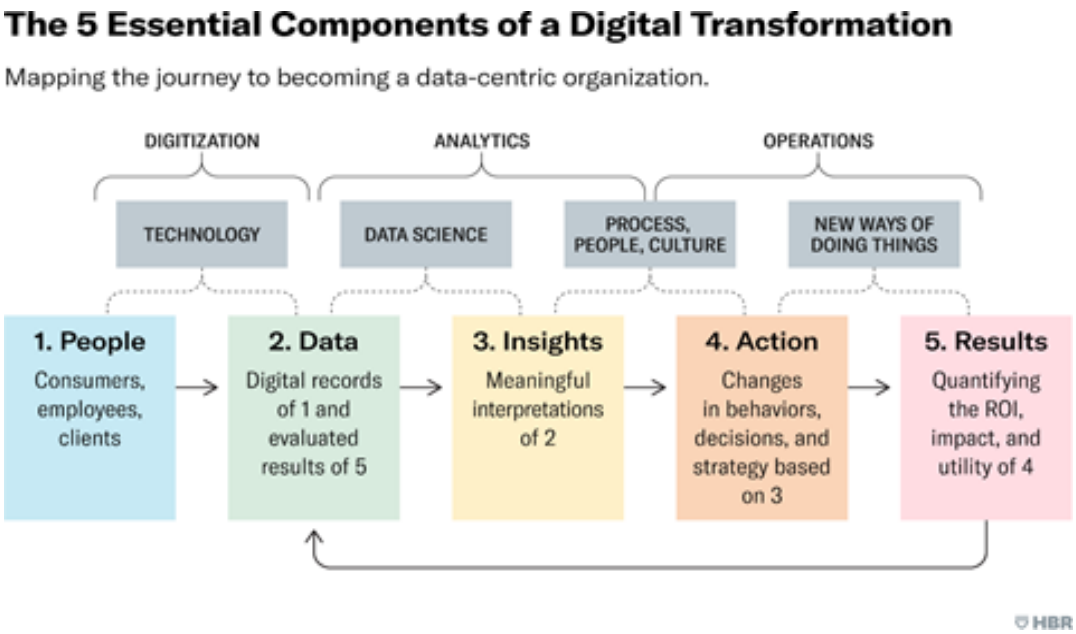


Fig. 1. Components of digital transformation
Source: Adapted from (Chamorro-Premuzic, 2021)

The questions cover not only the degree of digitalisation of management processes in enterprises, but also specifically the level of digital changes in activities. The digital tools used by the surveyed enterprises are indicated. Both the benefits that are obtained because of digitalisation and the main difficulties faced by the management of the organisations that participated in the survey are summarised.

The participants in the survey are enterprises from the industrial sector, mainly from the mining and processing industries (21 companies out of 30 surveyed). The companies are most often medium-sized enterprises with up to 50 employees (25 enterprises have 10-49 employees, 4 enterprises have 50-249 employees, and one has 1 to 9 employees). The people who completed the surveys mainly perform human resources management and financial and accounting activities (5 people are part of the companies' management, 12 are from the Human Resources department, 8 - from the Finance and Accounting department and 5 - from the Marketing and Sales department). The results were processed using Google forms. The graphs presented were generated using Excel.

Results

The survey was conducted between January 2025 and April 2025 and included 30 industrial enterprises.

The first question is related to an assessment of the degree of digitalisation of management processes in enterprises. We can summarise that the surveyed industrial enterprises have a good degree of digitalisation (66.67% answered “Good” and 33.33% rated it as “Excellent”).

The digitalisation of various management activities shows the following:

- Management of administrative and accounting processes (Yes 73% and Rather yes than no 27%)
- Management of production processes (To a large extent 23%, Yes 64%, and Rather yes than no 13%)
- Management of interaction with partners (To a large extent 27%, Yes 53%, .and Rather yes than no 20%)
- Marketing activities of the enterprise and customer relations (To a large extent 27%, Yes 20%, and Rather yes than no 53%)
- Planning of activities at individual hierarchical levels (To a large extent 20%, Yes 27%, and Rather yes than no 53%)
- Optimisation of processes in the enterprise (Yes 43% and Rather yes than no 57%)
- Strategic management (To a large extent 23%, Rather yes than no 64%, and No 13%).

Processes in administrative and accounting activities, in production, as well as interaction with partners are leading in the organisation of the overall activity in enterprises. It is no coincidence that their digitalisation is among the first to occur in them. Of the digital tools with the most popularity, the following are used: Artificial intelligence (reported by 70% of the respondents); Sensor technologies and Virtual reality (40% of the respondents). Gamification, catboats, and social networks, related to Empathetic leadership, also find a place in the management of the organisation and its optimisation. To the question ”What innovative methods does your management use?”, the respondents outlined: Data-Driver management and Change management - 8 answers, Agile management and Circular management - 6 answers, Open management and Remote team management - 5 answers (more than one answer was indicated).

The companies outlined the following as good practices: "Based on the digitalisation, the administration works or has the opportunity to work from home, which alleviates absences and sick leave. The extraction of quarries is gradually digitalised, reducing losses. The processing of marble slabs is computerised, albeit slowly. The processes are monitored remotely via cameras. Intra-company communication platforms are used" (own study).

Discussion

The established good digitalisation of the management process in these enterprises also brings relevant benefits to the companies. They mostly indicate that employee productivity

has increased, followed by automation of management activities, and single entry of information. (Fig. 2.) Along with the other benefits mentioned, the use of innovative methods impacts the overall effectiveness of the organisation.

Based on the answers to the next questions, we can deduce the main difficulties faced by industrial enterprises in the digital era. The lack of digital skills ranks first with 18 answers. The second place is taken by the lack of digital attitudes - 16 answers; Insufficient provision of digital resources comes third - 11 answers; 2 answers each score Lack of support from management and Lack of adequate legislation for the digitalisation of all processes (the respondents provided more than one answer). As noted in the literature review, every transformation started with people, and whether it will be successful depends on the human factor. Therefore, in these enterprises, the main difficulties are also related to digital skills and attitudes. In this regard, the respondents' answers to the question “Would you organise formal and/or informal training to develop new competencies of your employees in connection with technological changes?” are almost 50% Categorically yes. (Fig. 3.) The need to improve the qualifications of workers and stimulate lifelong learning is recognised. Only in this way can enterprises guarantee their future competitiveness.



Fig. 2 Company benefits in relation to digitalisation
Source: own research

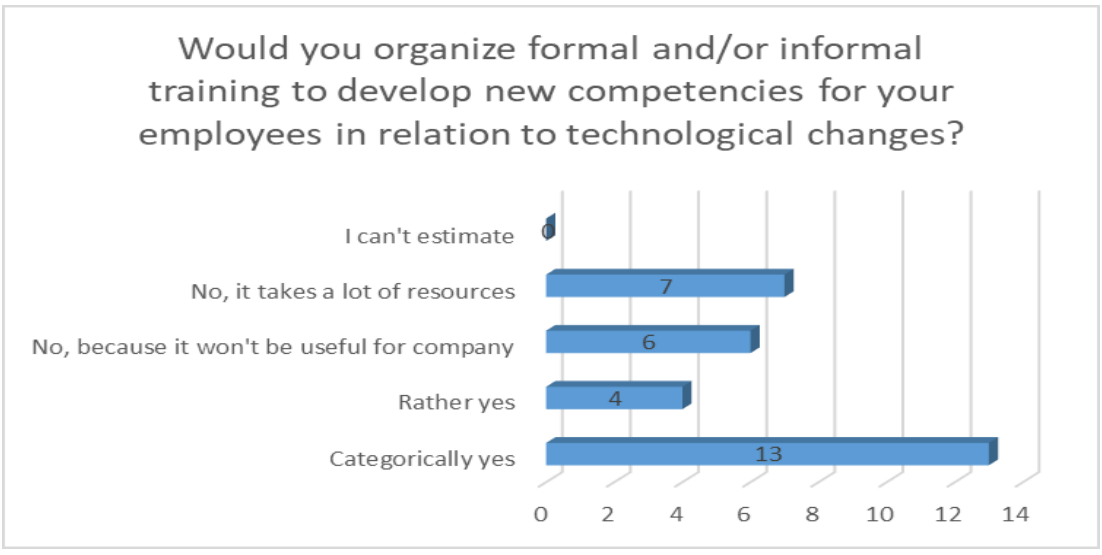


Fig. 3. Organising training for company employees
Source: own research

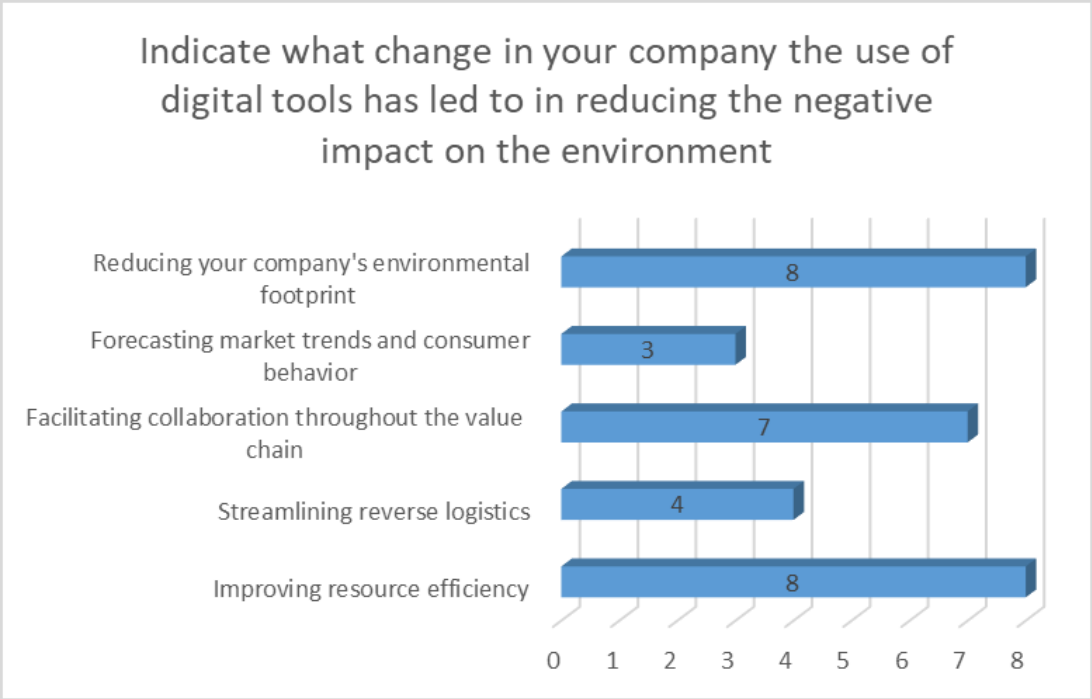


Fig.4. Change in the company due to digitalisation
Source: Own study

Responsible management includes considering the benefits of digital transformation and the social effect of technological innovations. Sustainable behaviour of industrial enterprises can be achieved using digital tools. This is also evident from the answers of the respondents: to the greatest extent, they believe that they have managed to Reduce the ecological footprint and Improve their resource efficiency – 8 answers. This is followed by Facilitating cooperation throughout the value chain – 7 answers. Also, useful changes that have occurred in these enterprises are Rationalisation of reverse logistics and Forecasting market trends and consumer behaviour. (Fig.4) The use of environmentally sustainable practices in industry is inextricably linked to the implementation of digital tools and is aimed at creating efficiency and a favourable image of enterprises.

Conclusion

Innovative methods that include digital technologies are of the utmost importance for promoting sustainable business practices. Modern innovative companies are oriented towards continuous development, maintaining the balance between man and nature, with an emphasis on human potential development and waste management. As a result of the conducted research, it was found that industrial enterprises mainly use the following innovative methods: Agile management, Data-Driver management, AI integration, Change management, Empathetic leadership, Circular management, Gamification, Open management, Remote team management. The benefits companies receive are increased employee productivity, followed by automation of management activities and one-time entry of information. Regarding the achievement of sustainable behaviour, these enterprises have managed to reduce their ecological footprint and improve their resource efficiency. The difficulties they face are mainly the lack of digital skills and digital attitudes in human resources. Therefore, the main recommendation to them is to monitor new digital technologies, paying attention to their application in practice and organising employee training for each change. It is also necessary to monitor innovative business models to identify methods that can be implemented in the management of industrial enterprises.

Acknowledgements

We are grateful to all participants in the study.

References

Anbuselvi, R., Selvamani. P. (2025). The Role of Digital Technology for Sustainable Development of Business, *International Journal on Economics and Business Management, Vol. XIV*, Issue 46, pp 77-81.

Breque, M., De Nul, L. and Petridis, A.: European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. (2021). Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office of the European Union https://data.europa.eu/ ; doi/10.2777/308407.

Chamorro-Premuzic, Tomas. (2021). The Essential Components of Digital Transformation, *Harvard Business Review*, November 23, https://hbr.org/2021/11/the-essential-components-of-digital-transformation.

Gagel, G. (2017). The Intersection of Organizational Agility and Transformational Leadership: A Literature Review, *Academy of Management Proceedings,* doi:10.5465/AMBPP.2017.10895.

Galabova, B. (2021). Innovation management of the industrial enterprise in a crisis context. International Scientific and Practical Conference. Conference Proceedings, Volume 2, D. A. Tsenov Academy of Economics – Svishtov, Tsenov Academic Publishing House, Svishtov, p. 266-274.

Kou, G., Xu, Y., Peng, Y., & Shen, F. (2021). AI in banking and finance. *Financial Innovation, 7*, p.26.

Petrova, V. (2023). The Impact of the Industrial Revolutions in the Transition from Linear to Circular Economy. *Annual of University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 66*/2023, 328–332. https://doi.org/10.5281/zenodo.8339129

Shao, W. (2024). The Role of Digital Transformation in Enhancing Organisation Agility and Competitive Advantage: A Strategic Perspective, 3rd International Conference on Financial Technology and Business Analysis, DOI:10.54254/2754-1169/154/2024.19552.

Topol, E. (2019). Deep medicine: How artificial intelligence can make healthcare human again. Basic Books.

Zizic, M. et al. (2022). “From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology”, *Energies 15*, no. 14: 5221. https://doi.org/10.3390/en15145221.

TECHNOLOGIES FOR MINING AND PROCESSING OF RARE EARTH ELEMENTS

Yoan Hristov, Vessela Petrova, Yuli Radev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia
Corresponding author: Yoan Hristov, E-mail: yoan.hristov@mgu.bg

ABSTRACT. Rare earth elements are critically needed to produce high-tech products, such as electric cars, electronic equipment, renewable energy technologies, and means for the defence industry. However, their extraction and processing pose a serious challenge due to the complexity of the process itself, the high associated production costs, the difficult integration of new and cutting-edge technologies into the processes, the growing geopolitical risks, as well as local environmental protection laws. Optimising the extraction and processing processes of rare earth elements will help to guarantee and secure supply chains, which are essential for the continuity of the production process. The introduction of modern and advanced technologies has the potential to optimise costs, increase the efficiency of work processes, minimise the negative impact on the environment, and thus ensure the sustainability of mining. On a global scale, rare earth elements will become increasingly valuable, which implies serious investments by businesses in the development and implementation of new technologies in mining activities to ensure the sustainability of the industry itself.

Key words: technologies, mining, processing, rare earth elements (REEs).

ТЕХНОЛОГИИ ЗА ДОБИВ И ПРЕРАБОТКА НА РЕДКОЗЕМНИ ЕЛЕМЕНТИ

Йоан Христов, Весела Петрова, Юли Радев
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Редкоземните елементи са критично необходими за производството на високотехнологични продукти като електрически автомобили, електронно оборудване, технологии за възобновяема енергия и средства за отбранителната промишленост. Въпреки това техният добив и обработка представляват сериозно предизвикателство поради сложността на самия процес, високите свързани производствени разходи, трудното интегриране на нови и авангардни технологии в процесите, нарастващите геополитически рискове, както и местните закони за опазване на околната среда. Оптимизирането на процесите на добив и обработка на редкоземни елементи ще помогне за гарантиране и осигуряване на веригите за доставки, които са от съществено значение за непрекъснатостта на производствения процес. Въвеждането на съвременни и напреднали технологии има потенциал да оптимизира разходите, да повиши ефективността на работните процеси, да сведе до минимум отрицателното въздействие върху околната среда и по този начин да гарантира устойчивостта на минното дело. В световен мащаб редкоземните елементи ще стават все по-ценни, което предполага сериозни инвестиции от страна на бизнеса в разработването и внедряването на нови технологии в минните дейности, за да се гарантира устойчивостта на самата индустрия.

Ключови думи: технологии, добив, преработка, редкоземни елементи

Introduction

In the third decade of the 21st century, all industries, including mining, are facing serious economic, social, environmental, and climate challenges, which implies a transformation of conventional production processes based on innovation and integration of modern new technologies into the activity. In the face of the need for transformation, a rethink of long-term priorities is needed, and the introduction of innovation in industry would have an impact on increasing the flexibility and sustainability of activities and markets (Galabova, 2022). The mining industry has been and continues to be a key factor in the economy of each country, and today a successful energy transition is of particular importance, which should ensure the availability of critical mineral raw materials, among which rare earth elements constitute a significant part. The strategy of every mining company should include the integration of the basic principles of sustainable development, which includes a balanced combination of economic efficiency, social responsibility and environmental sustainability. Companies in the mineral and raw materials sector today have an increasingly important role in the sustainability of society. The lessons of the crisis that we must follow are that society requires much greater commitment and cohesion, as well as responsibility (Trifonova, B., 2022). In this regard, the application of new innovative technologies in the activity can lead to the optimisation of the consumption of natural resources, more effective management of energy and raw material flows, and a reduction in the carbon footprint of a given enterprise, thus ensuring the sustainability of production processes.

The mining industry, being a significant contributor to the challenges, related to escalating threats of irreversible climate change, biodiversity loss, inequality, poverty, and social conflicts, is actively undergoing a transformative process to align itself with the principles of innovation and sustainability. As Tomova & Kisyov (2023) stated, mining industries are the very first link of a long supply chain. The raw materials are feedstock materials for many industries and mining industry significantly contributes to technological development as such.

This article thoroughly examines the approaches being developed by the mining industry, encompassing the adoption of new technologies and enhanced social approaches aimed at improving its often-unfavourable public perception. According to Correia et al. (2024), “the widespread adoption of novel practices and technologies by the mining industry is a pivotal enabler of the energy transition, ensuring the availability of critical mineral raw materials while promoting sustainability.”

It is in this context that rare earth elements play a key role, as they are critical raw materials for both the production of high-tech products and for technological development in general. Entire strategic industries in the relevant countries depend on rare earth elements as an indispensable component of high-tech production processes. This includes the production of electric vehicles, devices powered by renewable energy sources, telecommunications equipment, battery power systems, medical machinery, defence technologies, and others.

The growing demand and key importance of rare earth elements for the transformation of industries in global economies requires that they be examined in more detail from the perspective of the implementation and use of new innovative technologies for their mining and processing.

Materials and methods

This study aims to conduct a systematic literature analysis of the currently existing modern technologies for the extraction and processing of rare earth elements, with the focus on the theoretical aspects and the summary of scientific and technical achievements in the field of mining.

This theoretical study used various materials such as scientific articles and technical reports, industry publications and reports, as well as official documents on technical, legislative, and environmental topics. The results achieved from field studies of the activities of mining, processing, and recycling of rare earth elements were of particular interest. Valuable practical information is also provided by materials from the business, related to efficiency, operating costs, integration of new technologies in the activity, and the impact on the environment because of their use. Regulatory documents, as well as the relevant standards for mining and processing of rare earth elements, were also considered.

The materials used in this study were selected based on criteria related to proximity to the topic of the study, the relevance of the data, the diverse geographical distribution in different regions of the world, the diversity of perspectives, and finally – the peer-reviewed nature of the publications.

The analysis focuses on the theoretical aspects and the generalisation of technological achievements in the field of mining, considering their scientific and technical characteristics. For this purpose, the following research methods have been applied: a comprehensive systematic search in authoritative scientific databases for relevant keywords such as "mining", "rare earth elements", "processing", "bioleaching", "sustainability", etc.; extraction of key information from the selected literature, followed by synthesis and analysis of the data to identify relevant trends, patterns, conclusions, and recommendations; comparative analysis of key parameters of the different technologies and methods for mining and processing of rare earth elements; critical assessment based on their viability, efficiency, and technological maturity.

Overview of rare earth elements

Rare earth elements (REEs) are part of the group of strategic raw materials and constitute a group of 17 chemically similar metallic elements that are widely used in the creation of high technology and modern industry. Although their name suggests that they are rather rare and difficult to find, these elements are relatively abundant in the Earth's crust, with their average concentration being approximately 169.1 parts per million (ppm). It is important to note that their economic viability is greatly influenced by their geographical concentration, as well as by the mineralogical form in which they occur.

Rare earth element deposits are unevenly distributed worldwide, with the world's richest countries in these natural resources being China, followed by Vietnam, Brazil, Russia, Australia, the United States, Greenland, Tanzania, Canada, and South Africa. China, Vietnam, Russia, and Brazil together hold 86.9% of the world's reserves (Shuai et al., 2024). At the same time, the leading position in world markets is once again taken by the "People's Republic of China", with the "Celestial Empire" producing between 70% and 90% of the total world supply of rare earth elements.

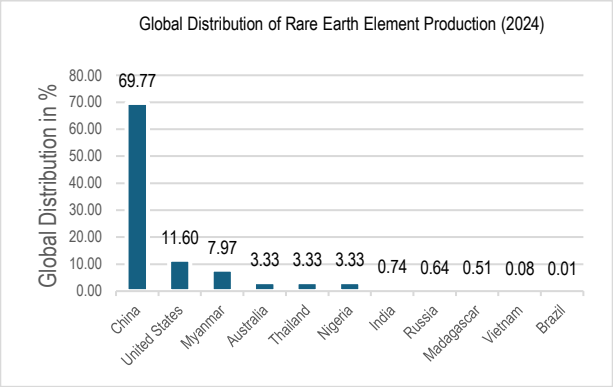


Figure 1. Global distribution of rare earth element production in 2024 (percentage share).
Source: Authors' compilation based on data from Statista.com.

As illustrated in Figure 1, China accounted for nearly 70% of global rare earth element production in 2024, followed by the United States (11.6%) and Myanmar (7.97%). The remaining production is distributed among smaller producers, such as Australia, Thailand, Nigeria, and others. This concentration of supply poses a critical geopolitical risk and highlights the fragility of global value chains in the REE sector.

This fact has largely been one of the main reasons for the geopolitical conflict between the USA and China this year, and in this regard, Canada and the EU have also taken measures to diversify supply chains and at least partially ensure their own domestic production (Chen et al., 2024). The reserves of rare earth elements worldwide amount to approximately 130 million tonnes. Of the total resource, the largest share of approximately one third falls on China – about 44 million tonnes. At the same time, the Chinese are leaders in the exploration and production of rare earth elements. In turn, the United States was the leading country in this market until 1998, when, for economic and environmental reasons, they stopped mining (Balaram, 2019).

Rare earth elements are extremely valuable for world economies, as they are indispensable and applicable in many different fields, such as electronics, optics, aerospace, biomedicine, energy chemistry or catalysis, and energy-related technologies. This wide applicability is largely due to the unique properties of rare earth elements – magnetism, luminescence, and electromechanics. From the point of view of importance as commercial resources, the main minerals containing rare earth elements are bastnaesite, monazite and xenotime. They are sources of valuable light rare elements for modern high-tech industries, which are used to produce powerful magnets, catalysts, and some electronic components, while xenotime contains a large number of rare elements, which are used mainly in the development of optical systems and in the development of some nuclear technologies. Deposits associated with carbonatites, a type of igneous rock, are of economic and strategic importance due to their high content of rare earth elements. To use rare earth elements in a sustainable and economically efficient way as a basic resource for the development of modern and advanced technologies, it is

important to understand their mineralogical and geological characteristics (Chen et al., 2024).

This year, and in the recent past, rare earth supply chains have particularly been threatened by increasing geopolitical risks. At the same time, however, global supply chains are vulnerable due to the complex nature of rare earth mining and processing, related to geological specificity, technological labour intensity of mining and processing, limited technological capacities, as well as economic and regulatory uncertainty in the sector. At the same time, global demand is escalating, which requires finding more efficient mining methods, which are often associated with the integration of new and reliable technologies. To date, research efforts are focused on geologically discovering new rare earth deposits, improving the efficiency of their recycling, and, possibly, identifying substitutes, through which to minimise the risks associated with global supplies and the negative impact of their use on the environment. In this way, the aim is to ensure the long-term stability of industries, especially the ones directly dependent on these critical raw materials to produce goods.

Sustainable extraction technologies

The global demand for electric vehicles, renewable energy, and advanced technologies are driving the extraction and processing of rare earth elements. However, traditional methods inflict substantial environmental damage, including soil pollution, generation of radioactive waste, and overconsumption of water. According to Tomova (2023), many efforts have been made in the past few decades by the extractive industries to prevent, reduce, and minimise, as far as possible, the negative impacts because of the management of extractive waste and the extraction activities. To reduce the impact of these mining technologies, unsustainable extraction technologies and waste management methods are optimised through industrial innovation. This set of approaches aims to improve environmental outcomes through waste reduction, cleaner extraction processes, and circular economy practices. The case of rare earth elements will frame this discourse on the paradigm shift for the development, implementation, and prospective advanced sustainable technologies for extraction and processing aimed at reengineering systematic approaches classification.

Advances in bioleaching

Bioleaching has emerged as a practical and eco-friendly method for recovering metal from electronic waste, or "e-waste," to address resource depletion and environmental concerns. Unlike conventional pyrometallurgical and hydrometallurgical processes, bioleaching uses microorganisms to produce organic or inorganic acids and cyanides, facilitating metal solubilisation through processes such as acidolysis, redoxolysis, and complexolysis. Because it is cost-effective, energy-efficient, and operates in a temperate climate, this technique is a good alternative to urban mining (Baniasadi et al., 2019).

By encouraging metal solubilisation, bioleaching uses microorganisms to extract rare earth elements (REEs) from ores or industrial waste. *Pseudomonas putida* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* are two examples of acidophilic bacteria that have shown promise in leaching rare earth elements (REEs) from monazite and bastnaesite ores (Brierley and Kuhn, 2010; Macaskie et al., 2017; Mowafy, 2020). Bioleaching uses microorganisms in a process that includes the usage of chemolithoautotrophs like *Acidithiobacillus ferrooxidans*, fungi such as *Aspergillus niger*, and cyanogenic bacteria like *Chromobacterium violaceum*. From copper, nickel, cobalt, and gold, these organisms bioleach metals from e-waste, like spent batteries and printed circuit boards (PCBs). These organisms are especially helpful in the recovery of gold because they can produce cyanide, which forms stable complexes with gold (Baniasadi et al., 2019). Copper can also be bioleached from the waste obtained from ground circuit boards with very high efficiency. In many of the experiments carried out, the yield obtained is over 90% (Toshev, 2022). Catalytic bioleaching, which uses catalysts like metal ions (like Cu2+ and Ag2+) and carbon-based materials (like graphene and biochar) to improve reaction kinetics and metal recovery rates, is one example of bioleaching advancements. To maximise microbial performance and resistance to the toxic nature of e-waste, genetic engineering and omics techniques are also being investigated. For instance, it has been shown that modified strains of *C. violaceum* produce more cyanide and recover gold better (Tay et al., 2013).

According to C. L. Brierley (2010), “Bioleaching lends itself economically and technically to the processing of small deposits that cannot support high capital costs, remote deposits where making and shipping concentrates may not be a viable option, low-grade ores that cannot be cost-effectively treated by existing technologies, and complex ores. Bioleaching also offers opportunities as an auxiliary process for on-site generation of acid for adjunct operations, such as base metal oxide heap leaching."

Bioleaching has many benefits over traditional acid-based leaching, such as a smaller environmental impact, less energy consumption, and less chemical use. The selectivity of the process is limited by the similar chemical behavior of REEs, which presents a technical challenge, and the kinetics of microbial processes are frequently slower. Despite its benefits, bioleaching has drawbacks, including sluggish dissolution kinetics, e-waste's toxicity to microbes, and precipitation problems like jarosite formation. For bioleaching to be scaled up to industrial levels, these constraints must be addressed by microbial adaptation, catalyst application, and process optimisation (Baniasadi et al., 2019).

Genetic engineering, synthetic biology, and bioreactor configuration are three advanced approaches to improving the efficiency and stability of microbial populations. Merging bioleaching with traditional methods promises to improve the yields of recovery while reducing the environmental footprint, thereby guaranteeing the sustainable recovery of base metals. Additional research will be required to address the scalability of such technologies to industrial processes to ensure cost-effectiveness, as well as regulatory compliance to prepare for large-scale use.

Bioleaching's potential for sustainable metal recovery from e-waste is still being studied, with an emphasis on enhancing its environmental impact, scalability, and efficiency. Baniasadi et al. (2019) assert that "bioleaching is a sustainable method for metal recovery from e-waste and development of urban mining, which can help to save the non-renewable energy consumed in mining industry and provide mitigation of greenhouse gas emission." Bioleaching will become a more appealing alternative to conventional methods in the circular economy as future research attempts to increase metal recovery rates by refining microbial strains and process parameters.

Green Solvents: Ionic Liquids and Deep Eutectic Solvents

When it comes to REE extraction, green chemistry techniques – specifically, the use of ionic liquids (ILs) and deep eutectic solvents (DESs) – have shown a lot of promise in replacing traditional organic solvents. Recyclability, chemical tunability, and low volatility are characteristics of these solvents. A practical option for selective REE recovery from complex matrices is provided by DESs which are both economical and biodegradable (Charton et al., 2024). Recent research has shown that ILs and DESs can successfully extract neodymium, dysprosium, and europium with high separation factors at moderate temperatures and pH levels that are close to neutral (Ayora et al., 2019). The mild nature of these solvents in processing is at the heart of their environmental advantages, reducing the need for strict pH control and the likelihood of producing hazardous byproducts. In addition, scientists can work to alter both the selectivity and metal loading properties, which would allow them to address practical extraction challenges by purposefully altering the chemical structures of the ionic liquids themselves (Pereira et al., 2022).

The composition of DESs is a major advantage; these solvents are made from affordable, biodegradable ingredients and can be customised to recover specific REEs from waste streams and complex secondary resources (Charton et al., 2024). According to recent research, the modular nature of DESs enables fine adjustment of hydrogen bond donors and acceptors, enabling highly selective extraction systems while controlling operational costs (Ayora et al., 2019; Abbott et al., 2020). DESs are promising for widespread industrial use because of their flexibility, which improves the efficiency and purity that can be achieved.

However, there are still obstacles to real industrial integration. These obstacles are related to the toxicity of some ionic liquids and deep eutectic solvents, their long-term physical and chemical stability, and the lack of a clear understanding of their real life cycle sustainability (Pereira et al., 2022; Charton et al., 2024). However, green solvents are positioned as key for the future development of sustainable mining and recycling of strategic raw materials, which is largely due to the significant progress in the development of green chemistry, as well as the ever-increasing political pressure for responsible mining and production of rare earth elements.

Membrane Separation Technologies

Supported liquid membranes (SLMs) and nanofiltration (NF) are two membrane-based methods that are becoming more popular as substitutes for conventional solvent extraction procedures. With the use of these techniques, REEs can be transported selectively across membranes with little energy and chemical reagents. Although these systems are still in the early stages of development for widespread use, recent pilot projects have shown that they are feasible for treating industrial wastewater and recovering electronic waste from leachates (Elbashier et al., 2021; Ren et al., 2021). Specifically, thin-film nanocomposite membranes and hollow fibber-supported SLMs have shown excellent permeability and selectivity, enabling targeted separation of REEs even in challenging aqueous conditions. According to recent reviews, the environmental impact of REE recovery processes, as well as waste volumes, can be decreased by incorporating membrane technologies into circular economy frameworks (Kaczorowska, 2023). These cutting-edge technologies provide a scalable and modular solution that can be tailored to different industrial applications and waste streams. Membrane-based separation is anticipated to be essential to the long-term recovery of vital raw materials with further development.

Sustainable Recycling of REEs

Urban mining, or the extraction of rare earth elements from electronic waste, or "e-waste," is a crucial component of a sustainable REE supply chain. Electric car motors, permanent magnets in hard drives, and phosphors in fluorescent lights are examples of rich secondary sources. In hydrometallurgical processes, acid leaching is usually followed by solvent extraction or precipitation. *Hitachi* and *Umicore* have developed industrial-scale techniques for recovering rare earth elements from magnets, significantly reducing environmental impacts compared to primary mining (Tanaka et al., 2013). Furthermore, although they are usually only employed at the pilot or lab scale, electrochemical methods for recovering rare earth elements from solutions are growing in popularity because of their potential for high purity and low energy consumption (Kim et al., 2021).

Rare earth elements can now be extracted more efficiently from e-waste without dissolving excessive impurities, thanks to the development of electrochemical separation and selective leaching. In this regard, the combination of biosorption and bioelectrochemical systems is a low-energy solution that works effectively for the treatment of dilute or complex waste (Brown et al., 2023). Combining bioleaching and electrowinning methods can improve recovery rates, while reducing the need for additional chemicals and waste. Furthermore, the use of ionic liquid-based solvents shows both excellent selectivity and reusability. The latter makes it a significantly more environmentally friendly method for the extraction of rare earth elements from urban mine streams (Botelho Junior et al., 2023). These new ideas point to a move toward greener and more circular ways to recover important critical materials. As tech keeps getting better, urban mining is set to play a key role in managing resources sustainably in the rare earth sector.

Substitution Technologies for Rare Earth Elements

The creation of functional substitutes has become a supplementary tactic to extraction and recycling in light of the ongoing difficulties in obtaining rare earth elements in a sustainable manner. The goal of substitution technologies is to substitute more plentiful, less hazardous, and more commercially feasible materials for rare earth elements in vital applications, especially in magnets, phosphors, and catalysts.

Magnet Substitution. A significant amount of the world's consumption of rare earth elements comes from permanent magnets, particularly neodymium–iron–boron (NdFeB) magnets. They are crucial components of consumer electronics, wind turbines, and electric motors due to their remarkable magnetic performance. However, with varying degrees of success, researchers have looked into alternatives.

Manganese–aluminum (Mn–Al) alloys and iron–nitride compounds (such as $Fe_{16}N_2$) have demonstrated potential as rare-earth-free magnetic materials. Although these systems are more prevalent and safer for the environment, they usually have a lower magnetic energy product than NdFeB (Coey, 2012). Because cobalt is a crucial component in and of itself, cobalt-iron alloys are limited by high material costs and supply chain risks, despite their effectiveness. The creation of nanostructured composite magnets, which combine soft and hard magnetic phases to replicate the behavior of REE-based magnets, is one

noteworthy development (Skomski & Coey, 2016). New developments in exchange-spring magnets have demonstrated encouraging outcomes in terms of increasing coercivity and decreasing dependence on rare earth elements. Furthermore, the tuneable magnetic properties and potential for competitive performance without critical materials of high-entropy alloys are being investigated.

Phosphor Substitution in Lighting and Displays. Fluorescent lights and display technologies frequently use rare earth phosphors, like terbium and europium. Alternatively, semiconductor nanoparticles with tuneable luminescence, known as quantum dots (QDs), have drawn interest due to their high efficiency and colour purity. Quantum dots derived from carbon-based nanomaterials or indium phosphide are good alternatives devoid of hazardous heavy metals and rare earth elements (Song et al., 2015). However, because of their toxicity, cadmium-based QDs are still being closely monitored by regulators.

A rare-earth-free alternative is provided by organic light-emitting diodes (OLEDs), particularly for display applications. OLED technology completely removes the need for REE-based phosphors, but it is still very expensive.

Catalyst Substitution. Cerium and lanthanum are frequently used in petroleum cracking and automotive catalysts. Alternatives with advantageous and thermal stability characteristics have been researched, including spinel materials and perovskite-type oxides (such as $LaMnO_3$ and $SrFeO_3$). These substances lessen dependency on rare elements while providing similar catalytic performance (Royer et al., 2014). In certain industrial formulations, transition-metal oxides (such as manganese, cobalt, and nickel) are already utilised for partial substitution in three-way catalytic converters. Nonetheless, attaining comparable performance to rare-earth-based catalysts while reducing costs continues to be a significant obstacle for broader implementation.

Challenges and Future Outlook. Many high-performance applications still find it technically difficult to totally replace rare earth elements even with major developments. One of the key difficulties is matching the durability, thermal stability, and efficiency of REE-based materials. The need for new manufacturing infrastructure and material standardisation also often restricts industrial-scale adoption.

Figure 2 illustrates the global reserves of rare earth elements between 2010 and 2024. Global rare earths reserves peaked in 2013, when reserves amounted to 140 million metric tons. Despite increasing industrial demand, total reserves have shown only limited growth, with a notable decline in 2024 to 90 million metric tonnes. This trend underscores the urgency of diversifying sourcing strategies and investing in advanced technologies for resource recovery and substitution.

The research on hybrid solutions – such as functional layering of alternative materials or partial substitution – keeps growing, though. Ongoing creativity in material design and circular economy strategies could help the rare earth industry to move toward a more robust and environmentally responsible future. Innovative recycling combined with advances in alternative materials could one day allow a closed-loop system that reduces primary extraction.

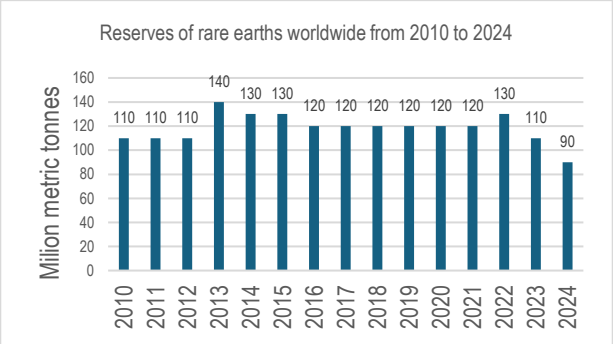


Figure 2. Total global reserves of rare earth elements, 2010–2024 (in million metric tonnes).
Source: Compiled by the authors using data from Statista.com.

Conclusion

Rare earth elements (REEs) are in high demand worldwide because of their critical roles in the production of electric vehicles, defence systems, electronics, and clean energy technologies. However, the conventional REE supply chain is becoming less and less sustainable due to energy-intensive mining, environmental deterioration, and geopolitical dependencies. This study looked at three main approaches to deal with these issues: sustainable extraction, recycling, and substitution.

Secondary source recycling, especially e-waste, has already shown industrial viability, but infrastructure improvements for collection and sorting are still crucial. Despite present efficiency and scalability constraints, bioleaching and green solvents provide environmentally friendly substitutes for traditional extraction. Although substitution technologies are promising, particularly in the areas of magnets, phosphors, and catalysts, they still face performance and cost obstacles to wider use.

For a more environmentally friendly and circular economy-friendly extraction of rare earth raw materials, new technological methods are being developed in the field of membrane separation, ionic liquids, deep eutectic solvents, and genetically modified microbial processes. Of particular importance here is the so-called urban mining, which combines hydrometallurgical, electrochemical and biotechnological techniques, with the help of which high yields are ensured. At the same time, sustainable mining and recycling initiatives can be supported by the implementation of techniques for the substitution of rare earth elements. Although these measures have only a private application, they can still limit the huge demand.

Integrating these various strategies into unified, scalable, and internationally coordinated systems is essential to the future of REE supply. Aligning material flows with environmental and geopolitical sustainability will require investment in hybrid technologies (like partial substitution and modular recycling platforms), regulatory frameworks, and life-cycle analysis. For a truly green technological future, striking this balance is now a technical, financial, and environmental requirement rather than merely a theoretical objective.

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

Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Rasheed, R. K., & Tambyrajah, V. (2020). Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: Versatile alternatives to ionic liquids, *Green Chemistry, 22*(5), 1778–1790.

Ayora, C., Domènech, C., & Martínez, M. (2019). Deep eutectic solvents in rare-earth element processing. *Green Chemistry, 21*(3), 478–495.

Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers, 10*, 1285–1303. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005

Baniasadi, M., Vakilchap, F., Bahaloo-Horeh, N., Mousavi, S. M., & Farnaud, S. (2019). Advances in bioleaching as a sustainable method for metal recovery from e-waste: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 76*, 75–90. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.047

Botelho Junior, A., Tenório, J., Espinosa, D. (2023). Separation of Critical Metals by Membrane Technology under a Circular Economy Framework: *A Review of the State-of-the-Art. Processes 11*, 1256. https://doi.org/10.3390/pr11041256

Brierley, C. L. (2010). Biohydrometallurgical prospects. *Hydrometallurgy, 104,* 324–328. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.03.021

Brierley, J. A. & Kuhn, M. C. (2010). Fluoride toxicity in a chalcocite bioleach heap process. *Hydrometallurgy, 104*, 410–413. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.013

Brown, R. M., Mirkouei, A., Reed, D., Thompson, V. (2023). Current nature-based biological practices for rare earth elements extraction and recovery: Bioleaching and biosorption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 173*, 113099. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113099

Charton, S., Hlawitschka, M., Luo, G., Buffo, A. et al. (2024). Solvent extraction pathways to sustainable industrial processes: new solvents, modelling, and design method. Frontiers in Chemical Engineering. https:// frontiersin.org/articles/10.3389/fceng.2024.1539379/full

Chen, P., Ilton, E .S., Wang, Z., Rosso, K. M. & Zhang, X. (2024). Global rare earth element resources: A concise review. *Applied Geochemistry, 175*, 106158. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106158

Coey, J. M. D. (2012). Permanent magnets: Plugging the gap. *Scripta Materialia, 67*(6), 524–529. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.03.035

Correia, V., Hartlieb, P. & Falck, E. (2024). The future of mining. In: Geoethics for the Future. Elsevier, 269–284. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15654-0.00015-3

Elbashier, E., Mussa, A., Hafiz, M., Hawari, A. H. (2021). Recovery of rare earth elements from waste streams using membrane processes: An overview. *Hydrometallurgy 204*, 105706. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105706

Galabova, B. (2022). The impact of innovations on modern economic and industrial development. In: WayScience, First International Scientific and Practical Internet Conference, Scientific Research and Innovation, Dnipro, Ukraine

Kaczorowska, M. A. (2023). The Latest Achievements of Liquid Membranes for Rare Earth Elements Recovery from Aqueous Solutions – A Mini Review. *Membranes, 13*, 839. https://doi.org/10.3390/membranes13100839

Kim, K., Candeago, R., Rim, G., Raymond, D., Park, A., Su, X. (2021). Electrochemical approaches for selective recovery of critical elements in hydrometallurgical processes of complex feedstocks. *iScience 24*, 102374. https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102374

Macaskie, L. E., Moriyama, S., Mikheenko, I., Singh, S., & Murray, A. J. (2017). Biotechnology Processes for Scalable, Selective Rare Earth Element Recovery. In: Orjuela, J.E.A. (ed.) Rare Earth Element. InTech. https://doi.org/10.5772/intechopen.68429

Mowafy, A. M. (2020). Biological leaching of rare earth elements. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 36*, 61. https://doi.org/10.1007/s11274-020-02838-x

Pereira, J. F. B., Rebelo, L. P. N., & Lopes, J. N. C. (2022). Tuning the extraction properties of ionic liquids for rare earth separations*, Separation and Purification Technology, 280*, 119915.

Ren, X., Chen, D. & Zhou, D. (2021). Application of membrane separation in the recovery of rare earth elements from leachate. *Separation and Purification Technology, 274*, 119034.

Royer, S., Duprez, D., Can, F. et al. (2014). Perovskites as substitutes of noble metals for heterogeneous catalysis: dream or reality. *Chemical Reviews, 114*(19), 10292–10368. https://doi.org/10.1021/cr500032a

Shuai, Z., Zhu, Y., Gao, P. & Han, Y. (2024). Rare earth elements resources and beneficiation*Minerals Engineering, 218*, 109011. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109011

Skomski, R. & Coey, J. M. D. (2016). Nanostructured magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 459*, 256–270. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.001

Song, E. H., Kim, H. S. & Lee, J. Y. (2015). Recent progress in rare-earth-free phosphors and their application in lighting. *Advanced Optical Materials, 3*(4), 443–452. https://doi.org/10.1002/adom.201400445

Tanaka, M., Oki, T., Koyama, K., Narita, H., & Oishi, T. (2013). Recovery of rare earths from scrap. In: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Vol. 43*, Elsevier, 159–211.

Tay, S. B., Natarajan, G., Rahim, M. N. B. A., Tan, H. T., Chung, M. C. M., Ting, Y. P., & Yew, W. S. (2013). Enhancing gold recovery from electronic waste via lixiviant metabolic engineering in *Chromobacterium violaceum*. *Scientific Reports, 3*, 2236. https://doi.org/10.1038/srep02236

Tomova, M. (2023). Geophysical techniques for monitoring of integrated mine waste storage facility: Case study of Southeastern Bulgaria. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26, 341-347.

Tomova, M., & Kisyov, A. (2023). Geophysical techniques for determination of areas with increased water saturation in integrated mine waste storage facility. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 26, 13-18.

Toshev, S. A. (2022). Izkustveni nanomashini za monitoring i izvlichane na zamarsiteli v okolnata sreda: Avtoreferat na disertatsionen trud za prisazhdane na obrazovatelna i nauchna stepen "doktor" (in Bulgarian). Sofia: University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Faculty of Geology and Prospecting, Department of Environmental Engineering. Scientific advisor: Prof. Dr. A. Lukanov.

Trifonova, B. (2022). The company culture in support of the enterprises from the mineral and raw mineral industry during a crisis, Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Vol. 65/2022, p. 186-189.

ON THE PROBLEM OF MARKETING ASPECTS OF THE LEARNING PROCESS IN "PHYSICAL EDUCATION AND SPORTS" FOR STUDENTS

Vanya Tzolova

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

ABSTRACT: Research with a marketing orientation of the educational process in physical education and sports in universities is extremely useful, because in its content, it offers information about the interests and needs of students as consumers of the educational product: the lesson (training sessions). In this regard, our **aim** was to reveal some marketing aspects of this learning process that can serve as an effective tool for its improvement. In order to realise this goal, we carried out a literature analysis, which we complemented with our own teaching and research expertise.
The analysis in the study enabled us to highlight some areas with a marketing focus in the learning process, in which in-depth research should be systematically carried out. The main ones are related to: the content and methodology of the lessons; the pedagogical means and approaches applied by the teachers; the effectiveness in fulfilling the purpose, tasks, and functions of the learning process; the preferences for the types of sports and for the organisational forms of the lessons, etc. Basically, these are characteristics that are extremely important for the good quality of the educational process.

Key words: marketing aspects, physical education and sport, learning process, students.

ПО ПРОБЛЕМА ЗА МАРКЕТИНГОВИТЕ АСПЕКТИ НА УЧЕБНИЯ ПРОЦЕС ПО „ФИЗИЧЕСКО ВЪЗПИТАНИЕ И СПОРТ“ ПРИ СТУДЕНТИТЕ

Ваня Цолова

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

РЕЗЮМЕ: Изследванията с маркетингова насоченост на учебния процес по физическо възпитание и спорт във висшите училища са изключително полезни, тъй като в съдържанието си носят информация за интересите и потребностите на студентите като потребители на образователния продукт – урока (тренировъчното занятие). В тази връзка **целта,** която си поставихме, бе да разкрием някои маркетингови аспекти на този учебен процес, които могат да послужат като ефективен инструмент за усъвършенстването му. За реализиране на целта извършихме анализ на литературни източници, който допълнихме със собствената ни преподавателска и изследователска експертиза.
Анализът в изследването ни даде възможност да изведем някои направления с маркетингова насоченост в учебния процес, в които трябва да се извършват системно задълбочени изследвания. Основните от тях са свързани със: съдържанието и методиката на уроците; педагогическите средства и подходи, прилагани от преподавателите; ефективността при изпълнение на целта, задачите и функциите на учебния процес; предпочитанията за видовете спорт и за организационните форми на уроците и пр. В основата си това са характеристики, които са изключително важни за доброто качество на образователния процес.

Ключови думи: маркетингови аспекти, физическо възпитание и спорт, учебен процес, студенти.

Въведение

Физическото възпитание и спортът във висшите училища се явява подсистема на цялостната система за физическо възпитание и спорт в България, от една страна, а от друга е съществен елемент в системата на образованието. Съвременният анализ показва, че днес тази подсистема е съпътствана от множество проблеми. Наред с липсата на ефективна държавна политика, лоша материална база, намален (недостатъчен) обем от задължителни часове по физическо възпитание и пр. все по-значим през последните години става и проблемът за недобрата ефективност на учебния процес по предмета. Ето защо днес има голяма необходимост от провеждането на целенасочени изследвания, които да разкрият резерви в тази посока и да създадат възможности за вземането на ефективни решения.

Прегледът на специализираната литература и на практическия опит показва, че през последните две десетилетия се правят множество изследвания в областта на физическото възпитание във висшите училища (Иванов, 1996; Цолов и Дашева, 1998; Иванов, 2006; Божкова, 2007; Давидов и Давидова, 2008; Цолов, 2008; Цонкова и Петров, 2008; Цанкова, 2009; Иванова и Иванов, 2010; Василева, 2016; Маринов, 2020; Ставрева и кол. 2020; Харалампиева, 2020 и др.). Приоритетно обаче те са насочени към подобряване на учебното съдържание, методиката и контрола при провеждане на уроците със студентите с цел оптимизиране на натоварването и ефекта от него. Други изследвания са насочени към експериментиране на различни методики за повишаване на двигателно-функционалния и здравен ефект от заниманията, а трети – към диагностика и контрол на двигателната активност на студентите.

Голямата разнопосочност на изследванията показва, че до днес няма напълно изяснена визия конкретно към кои направления от учебния процес по физическо възпитание приоритетно да се насочат усилията с цел по-ефективното му усъвършенстване.

Проблемът в известна степен се дължи на факта, че се подценяват или не се разбират напълно някои маркетингови аспекти на този учебен процес и конкретно на урока (тренировъчното занятието) по физическо възпитание като образователен продукт. А това е продукт, към който потребителите (в конкретния случай студентите) имат определени интереси и потребности.

Изхождайки от теорията на образователния маркетинг, продукт на образователните институции (висшите училища) се явява образователната услуга. Основните потребители на този продукт са студентите, специализантите и курсистите. Качеството на тази образователна услуга (вкл. на цялостния процес на обучение) е важен критерий за „стойността“ на образователната институция, тъй като то е

в пряка зависимост от степента на потребителската удовлетвореност (Харалампиева, 2020).

Ето защо **целта,** която си поставихме, бе да разкрием някои маркетингови аспекти на учебния процес по „Физическо възпитание и спорт“, които могат да послужат като ефективен инструмент за усъвършенстването му. За реализиране на целта извършихме анализ на литературни източници, допълнен със собствената ни преподавателска и изследователска експертиза.

Анализ на проблема

Когато става въпрос за усъвършенстване на учебния процес по физическо възпитание и спорт (ФВС) във висшите училища ,винаги трябва да се изхожда от няколко момента (аспекта), които имат определени маркетингови характеристики. Основните от тях се изразяват в отговора на следните въпроси: 1. *Какви са целта и задачите на учебния процес по ФВС в съвременните условия?*, 2. *Какви са формите на организация и провеждане на този процес?*, 3. *Какви функции реализира урокът (тренировъчното занятието) по учебната дисциплина „Физическо възпитание и спорт“ като вид образователен продукт?,* 4. *Какви са интересите и потребностите на студентите за участие в учебния процес по ФВС?* и 5. *Какви проучвания с маркетингова насоченост са необходими за усъвършенстване на учебния процес по предмета?*

По първия въпрос Б. Цолов и Й. Иванов (1998) може би най-пълно формулират целта на учебния процес по физическо възпитание във ВУ. Те я посочват по следния начин: „даване на студентите на необходимите знания за ефективното използване на физическите упражнения и спорта в бита им, формиране у тях на практически умения и навици за занимания с физически упражнения и спорт, съдействане за подобряване на психофизическата работоспособност и общата им двигателна култура, укрепване на тяхното здравословно състояние, подготвяне за бъдещо изпълнение на трудово-професионалната им дейност и социализация в обществото“. В този смисъл е и изложеното от Д. Давидов и Т. Давидова (2008), които посочват, че целта и задачите на учебния процес по физическо възпитание са свързани с укрепване на здравето на студентите, изграждане на жизненоважни двигателни навици и развитие на физически качества и способности, изграждане на хигиенни навици, получаване на знания в областта на спорта, възпитаване на морално-волеви качества.

Тези и някои от посочените по-напред автори конкретизират по-детайлно отделните задачи в три направления:

- *Образователни задачи* - изразяват се в даване на теоретични знания за използването на физическите упражнения и спорта от студентите, формиране на практически умения и навици за спортуване, повишаване на двигателната култура и др.
- *Оздравителни задачи* - изразяват се във физическото развитие на студентите, подобряване на функционалните им възможности, укрепване на здравето, запазване на висока работоспособност и пр.
- *Възпитателни задачи* - изразяват се в развитие на морално-волеви качества, формиране на духовни и естетически ценности и за социализация.

Към тях Ж. Цанкова (2009) добавя още едно направление задачи, наречено от нея „*Професионално-приложно“,* т.е. формиране у студентите на специални знания, двигателни навици и двигателни качества, които да им осигуряват физическа годност за предстоящата професионална дейност.

От казаното става ясно, че физическото възпитание и спортът във висшите училища като учебен предмет има ясно изразен социален характер, т.е. преследва социални цели и задачи, произтичащи от потребностите на студентите в настоящата им учебна и в бъдещата им трудово-професионална дейност.

По втория въпрос: „*Какви са формите на организация и провеждането на този процес?*“, е подходящо предварително да уточним, че спортната активност на студентите във висшите училища се проявява в две направления: 1. Физическо възпитание и спорт в редовния учебен процес и 2. Физическо възпитание и спорт в свободното време. Като изхожда от това, Н. Делева (2010) посочва, че формите на реализиране на тази спортна активност в образователната система (в т.ч. и при студентите) могат да бъдат най-различни (фиг. 1, модифициран вариант по Делева, 2010).



Фиг. 1. Направления и форми (вид маркетингови продукти) на спортната активност на студентите

В българската образователна практика физическото възпитание и спортът като съществена част от задължителния учебен процес във висшите училища се провежда в три основни организационни форми, към които студентите изразяват определени предпочитания (Цолов и Иванов, 1998; Цолова и Иванов, 2013):

1. *Изборно-задължителната форма.* Представлява задължително участие на студента в свободно избран вид спорт. В повечето ВУ днес хорариумът е от по два часа (1 занятие) седмично за I и II курс, а в други училища – по 4 часа (2 занятия) седмично за I и II курс. Най-често тази форма е с приоритетна насоченост за развитие на общата физическа подготовка на студентите, както и за повишаване на функционалния и приложния ефект от физическите упражнения.

2. *Спортното усъвършенстване (изборно-самостоятелна форма).* Това е самостоятелен избор на студента за участие в учебно-тренировъчния процес по вид спорт. За тези, които имат задължителна форма на обучение (I-II курс), тя е изборно-задължителна, а за останалите – факултативна и най-често отразява начина на организация на физическото възпитание с отборите за участие в състезания.

3. *Факултативната форма.* Тази форма в повечето университети е за студентите от III до V курс, които желаят да участват в занятията по физическо възпитание. Най-често тези студенти влизат в задължителните часове по спорт със студентите от I и II курс, както и в отборите.

Става ясно, че съществуват най-малко два основни въпроса (подвъпроса), които имат изразена маркетингова насоченост и които се нуждаят от отговори, а именно: А) Кои са предпочитаните форми от студентите за участие в учебния процес по физическо възпитание в редовния учебен процес? и Б) Кои са предпочитаните от тях спортове? Отговорите на тези два въпроса са от изключителна важност за ефективно организиране и провеждане на учебния процес в съответствие с интересите и потребностите на студентите.

Третият важен въпрос е *Какви функции реализира урокът (тренировъчното занятие) по учебната дисциплина „Физическо възпитание и спорт“ като вид образователен продукт?*

В резултат на свое изследване М. Бъчваров, Й. Иванов и Б. Цолов (2005) подчертават, че потребността за спортуване произтича от факта, че в своето съдържание то включва занятия с физически упражнения не само за състезаване, но и за подобряване на здравето и физическата дееспособност, за красота, морална удовлетвореност и социализация. Същите автори разглеждат процеса по физическо възпитание в образователната система, вкл. във висшите училища, като съвкупност от три основни компонента - градивна, възпитателна и образователна (фиг. 2, по Бъчваров, Иванов, Цолов, 2005). При реализацията на образователната компонента във висшите училища, посочват те, съществуват празноти, които принизяват учебния предмет по отношение даването на нови знания.

Като изхожда от тези три компонента, след допитване до 480 студенти, К. Василева (2016) извежда 14 основни социални функции (фиг. 3, по Василева, 2016). Изключително важно е те да се имат предвид, когато се търсят начини за усъвършенстване на учебния процес.



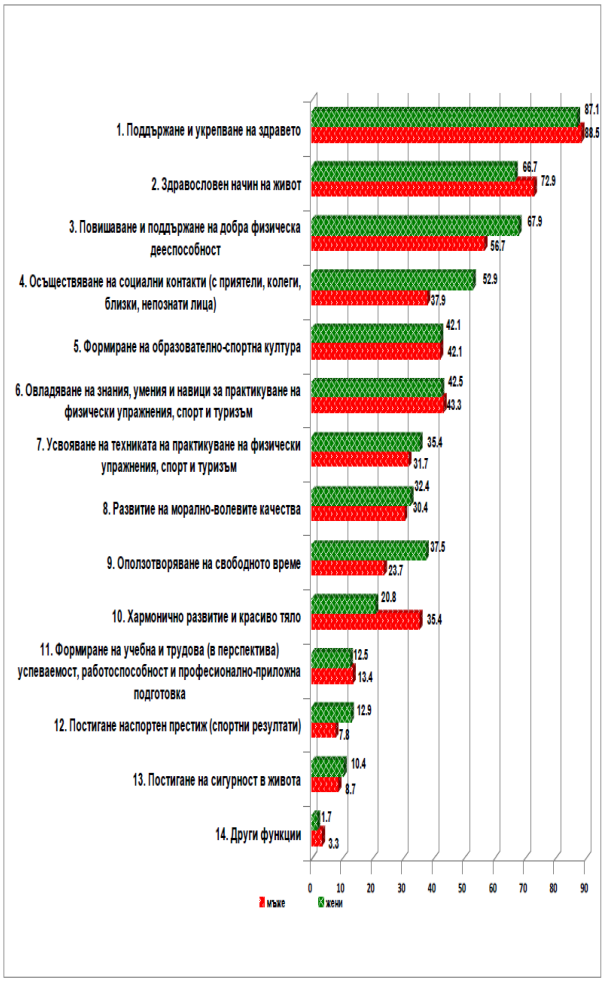
Фиг. 2. Основни компоненти на физическото възпитание като учебна дисциплина

Реално изложените във фиг. 3 социални функции са проекции на осъзнатите потребности на студентите. Това от маркетингова гледна точка изисква учебният процес по физическо възпитание и спорт да е съобразен възможно най-много с тези потребности на обучаваните, което пък от своя страна означава, че те трябва да бъдат изучавани на принципа на обратната връзка. Нещо, което към този момент в съвременните условия на реализиране на учебния процес или силно се подценява, или не се извършва.

Впрочем логично продължение на този въпрос е следващият: *Какви са интересите и потребностите на студентите за участие в учебния процес по ФВС?* Той има тясна маркетингова насоченост, тъй като по същество изисква отговори за интересите и потребностите на студентите за потребяване на образователния продукт, в случая на урока (тренировъчното занятие) по физическо възпитание и спорт.

Пръв М. Бъчваров (2000), а впоследствие и други автори (Иванов, 2006; Цолов, 2008; Делева, 2010 и др.) посочват, спортуването е специфичен вид потребност, която може да бъде разглеждана в шест основни целеви области:

- Здраве, красота и естетична наслада.
- Забава и социални контакти.
- Психофизическа дееспособност и работоспособност.
- Професионални потребности и високи спортни резултати.
- Образование и възпитание.
- Морални, икономически и изследователски подбуди.



Фиг. 3. Структура (относителен дял) на основните социални функции на физическото възпитание, посочени от студентите

В този смисъл физическото възпитание във ВУ, като социална сфера на приложение на спорта, има за задача също да удовлетворява определени социални (в т.ч. образователни, културни, здравни, възпитателни, спортни и др.) потребности на студентите, които е необходимо да се изучават детайлно.

Логично тук възниква петият въпрос: *Какви проучвания с маркетингова насоченост са необходими за усъвършенстване на учебния процес по предмета?* Това е многоаспектен въпрос, който, зададен по този начин, предполага известно двусмислие. По същество обаче той изисква отговор в какви направления на учебния процес днес е необходимо да се правят проучвания, резултатите от които ефективно да послужат за усъвършенстването му. Върху основата на специализирана литература и нашия опит можем да изведем следните направления, свързани с изследване на интересите и потребностите на студентите като потребители на образователния продукт - урока (тренировъчното занятие):

- потребности относно хорариума от часове по физическо възпитание и спорт в процеса на следването;
- потребности относно съдържанието и методиката на уроците (тренировъчните занятия);
- потребности относно педагогическите средства и подходи, прилагани от преподавателите в уроците;
- потребности относно ефективно реализиране на целта, задачите и функциите на учебния процес;
- потребности относно материалната база и условията на провеждане на уроците (тренировъчните занятия);
- потребности относно литературата и учебни помагала в учебния процес;
- потребности относно лекционни уроци с образователна насоченост за спорта като средство за здраве, противодействие на негативните явления, социализация и пр.;
- потребности относно предпочитанията на студентите за видовете спорт;
- потребности относно избора на организационните форми за участие в учебния процес и др.

Заключение

Изследванията с маркетингова насоченост на учебния процес по физическо възпитание и спорт във висшите училища могат да бъдат изключително полезни за усъвършенстването му, тъй като в съдържанието си носят информация за интересите и потребностите на студентите като потребители на образователния продукт – урока (тренировъчното занятие). Освен това, такъв вид изследвания могат да дават полезна информация за: съдържанието и методиката на уроците (тренировъчните занятия); педагогическите средства и подходи, прилагани от преподавателите в тях; ефективността при изпълнение на целта, задачите и функциите на учебния процес; предпочитанията за видовете спорт и за организационните форми за участие в уроците и пр. В основата си това са характеристики, които са изключително важни за доброто качество на образователния процес. Ето защо в съвременните условия на висшето образование такъв вид изследвания не само, че не трябва да се подценяват, но трябва да се извършват задълбочено и системно.

Литература

Божкова, А. (2007). Усъвършенстване на учебно-тренировъчния процес по волейбол в неспециализирани по спорт висши училища. Докт. дисертация, София.

Бъчваров, М. (2000). Спортология. изд. НСА.

Бъчваров, М., Цолов, Б., Иванов, Й. (2005). Спортологични потребности на българското общество. *Сп. „Спорт и наука“, бр. 1,* 93-101.

Бъчваров, М., Иванов, Й., Цолов, Б. (2005). Спортология на образователната компонента на физическото възпитание. *Сп. „Спорт и наука“, бр. 5-6.*

Василева, К. (2016). Модел за оптимизиране на социалните функции на физическото възпитание и спорта във висшите училища. Докт. дисертация, Велико Търново.

Давидов, Д., Давидова, Т. (2008). Туризмът – средство за повишаване на психофизическата подготовка на студенти. *Сб. докл. „Формиране на адекватна психофизическа готовност на учениците за преодоляване на екстремални ситуации*“, Разград, 117-123.

Делева, Н. (2010). Маркетинг на спортните занимания в условията на българското училище. Докт. дисертация, София.

Иванов, Ив. (1996). Физическо възпитание във ВУЗ. Теория и методика. Изд. УАСГ-УИК.

Иванов, Й., Цолов, Б. (1998). Резерви за ефективизиране на учебния процес по физическо възпитание във ВУЗ (по материали от МГУ „Св. Иван Рилски“). *Сб. докл. „Личност, мотивация, спорт“, бр.4*, 135-139.

Иванов, Й. (2006). Образователната компонента в процеса по физическо възпитание във висшите училища. Изд. „Болид инс“.

Иванов, Й., Цолов, Б. (2010). По проблема за образователната компонента на училищното физическо възпитание. *Сп. „Спорт и наука“, извънр. бр. 1,* 118-123.

Иванова, А., Иванов, А. (2010). Двигателната активност на студентите и здравословният начин на живот. *Сп. „Спорт и наука“, извънр. бр. 4, част II,* 355-362.

Ставрева, И., Иванов, Й., Цолова, В., Ставрев, С., Костова, Н., Йорданов, Е., Първанова, М. (2020). 65 години спорт в МГУ „Св. Иван Рилски“ – спортологичен анализ, модели и иновации (завършване на работата по проект № ХД 019/2020). *Сп. „Известия на ДЧЕС“, том XX/2020*, 89-118.

Цанкова, Ж. (2009). Влияние на специализирана методика върху ефективността на обучението по баскетбол във висшите училища на Р. България. Докт. дисертация.

Цолов, Б., Иванов, Й. (1998). Управление на учебно-тренировъчния процес по футбол във ВУЗ. Изд. „Информаинтелект“.

Цолов Б., Дашева, Д. (1998). Проучване на отношението на студентите към заниманията с физически упражнения и спорт в свободното време. *Сп. „Спорт и наука“, бр. 4,* 48-51.

Цолов, Б. (2008). Основи на маркетинга в спорта. Изд. „Болидинс“.

Цонкова, Д., Петров, Л. (2008). Агресивността на учениците през погледа на спортния педагог. *Сб. докл. „Формиране на адекватна психофизическа готовност на учениците за преодоляване на екстремални ситуации”,* Разград, 40-46.

Цолова, В., Иванов, Й. (2013). Физическо възпитание във висшите училища – нов методичен подход. Изд. „Авангард прима“.

Цолова, В. (2017). Физическо възпитание във висшите училища. Теория и научно-приложни изследвания. Изд. НСА ПРЕС.

Харалампиева, Ал. (2020). Повишаване на квалификацията на учителите по физическо възпитание в условията на ЦСДК при НСА „В. Левски“. *Сп. „Спорт и наука“, бр. 1-2*, 157-165.

CYBERNETIC KNOWLEDGE IN THE ACTIVITY OF THE PHYSICAL EDUCATION AND SPORTS TEACHER

Vanya Tzolova

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

ABSTRACT: As an information process, management requires certain cybernetic knowledge from the subject of management, which serves as a basis and is in an integrative relationship with all other knowledge directly specialised for the implementation of the specific activity. This fully applies to the university lecturer in the course unit in "Physical Education and Sports", who, both within the individual lesson and in the overall learning process, is the subject of management in relation to the learners (object of management).
Therefore, the **aim** we set ourselves was to consider the teaching of physical education and sports as a management process through the constructive-analytical approach and analysis, and on this basis to derive some basic components of cybernetic knowledge needed by the lecturer in their activity.
In the analytical part of the report, special attention is paid to the management functions, principles, and methods in the activity of the PE teacher.

Keywords: cybernetics, physical education and sports, management functions, principles, methods.

КИБЕРНЕТИЧНОТО ЗНАНИЕ В ДЕЙНОСТТА НА ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ПО ФИЗИЧЕСКО ВЪЗПИТАНИЕ И СПОРТ

Ваня Цолова

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

РЕЗЮМЕ: Управлението като информационен процес изисква определени кибернетични знания от субекта на управление, които служат като основа и са в интегративна връзка с всички други знания, пряко специализирани за изпълнението на конкретната дейност. Това в пълна степен се отнася и за преподавателя по дисциплината „Физическо възпитание и спорт“, който както в рамките на отделния урок, така и в цялостния учебен процес се явява субект на управление по отношение на обучаемите (обект на управление).
Ето защо **целта**, която си поставихме, бе чрез конструктивно-аналитичния подход и анализ да разгледаме обучението по физическо възпитание и спорт като процес на управление и на тази основа да изведем някои основни компоненти на кибернетичното знание, необходими на преподавателя в неговата дейност.
Специално внимание в аналитичната част на доклада е отделено на управленските функции, принципи и методи в дейността на преподавателя.

Ключови думи: кибернетика, физическо възпитание и спорт, управленски функции, принципи, методи.

Въведение

Кибернетиката е наука, предоставяща инструментариум от общи методи, принципи и подходи за управлението на сложните системи – технически, биологични и социални. В този смисъл тя се явява методологична основа, върху която се изгражда всеки управленски процес. Неслучайно още в древността един от най-големите учени, математици и философи на своето време Платон използва гръцката дума κυβερνητική, което в преносен смисъл означава „човек на кормилото на властта“. С различни аспекти на кибернетичното знание през последните два-три века усилено са се занимавали множество учени от различни области – философи, математици, икономисти, биолози, физици и др. Така през 1948 г. американският математик Норберт Винер написва книгата „Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine“ („Кибернетика, или контрол и връзка в животното и машината“), с което обуславя социалната роля на информацията и дава съвременно разбиране за науката кибернетика.

В съвременния свят управлението в нито една социална област не би било ефективно, ако не използва инструментариума на кибернетиката. И това все повече проличава днес с развитието на изкуствения интелект.

Управлението като информационен процес – приемане, преработване, предаване на информация и обратна връзка – изисква, на първо място, определени методологични кибернетични знания от субекта на управление, които служат като основа и са в интегративна връзка с всички други знания, пряко специализирани за изпълнението на конкретната дейност (Калайков, 1986, 1992; Бъчваров и кол, 2005; Иванов, 2006; Цолов, 2009). Това в пълна степен се отнася и за преподавателя по учебната дисциплина „Физическо възпитание и спорт“, който както в рамките на отделното занятие, така и в цялостния учебен процес се явява субект на управление по отношение на обучаемите като обект на управление (Иванов, 1996; Цолова и Иванов, 2013).

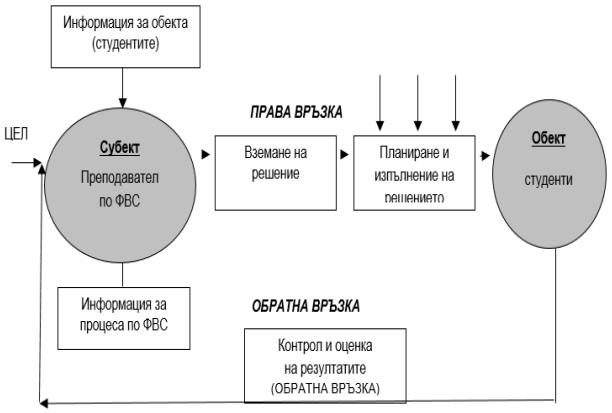
Ето защо **целта**, която си поставихме, бе чрез конструктивно-аналитичния подход и анализ да разгледаме обучението по физическо възпитание и спорт като процес на управление и на тази основа да изведем някои основни компоненти на кибернетичното знание, необходими на преподавателя в неговата дейност.

Учебният процес по физическо възпитание и спорт като процес на управление

Проф. М. Бъчваров е един от първите не само в България, но и в международен план, който тясно специализирано разглежда спорта като интегративна наука, която съчетава в себе си знания от редица други науки. В своята книга „Спортология“ Бъчваров (2000) посочва, че интердисциплинарността на спортната наука като специфично знание включва в себе си четири групи знания – социално-психологично и педагогично, медико-биологично, биомеханично и управленско. По-късно Б. Цолов (2008) в своята монография „Основи на маркетинга

в спорта“ систематизира управленското знание в осем компонента, един от които е именно кибернетичното.

В монографията „Физическо възпитание във висшите училища. Теория и научно-приложни изследвания“ (2017) направихме систематологична характеристика на физическото възпитание и спорта във висшите училища. Бе разгледано подробно на оперативно ниво управлението на учебния процес и бе посочено, че субект на управление е преподавателят (фиг. 1, по Иванов и Цолов, 1998). На това катедрено ниво управлението на физическото възпитание представлява кибернетичен процес, отразяващ информационните връзки между субекта и обекта, в конкретния случай между преподавателя и студентите.

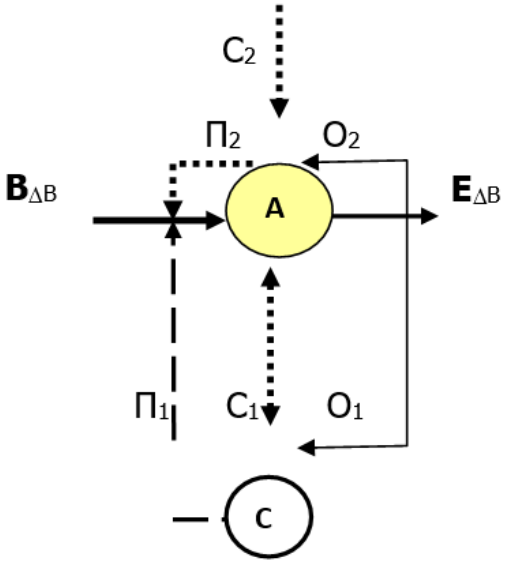


Фиг. 1. Управлението на физическото възпитание като информационен процес на катедрено ниво

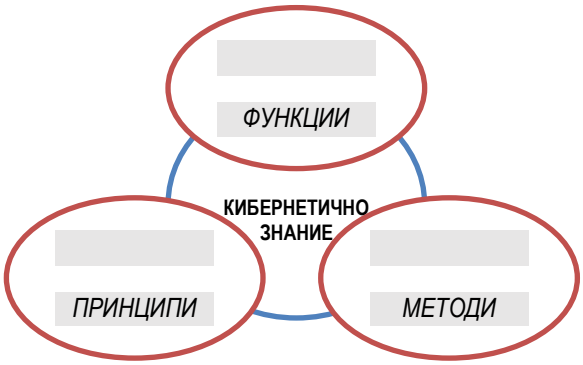
В тази връзка през 1987 г. М. Бъчваров (Бъчваров и кол., 2018) посочва, че в процеса по физическо възпитание се прилагат различни психофизически, възпитателни и образователни въздействия във времето ($\mathbf{B}_{\Delta B}$) върху обучаваните (**А**, фиг. 2, по Бъчваров, 1987). Първоначално той самостоятелно, а впоследствие в съавторство в книгата „Спортологични основи & Спортологичен анализ на физическото възпитание“ (2018) разглежда комуникацията в управленския процес между преподавателя (**С**) и студентите (**А**) като управленски цикъл, в който голямо значение за резултата (отражения - $\mathbf{E}_{\Delta B}$) имат обратните връзки - ($\mathbf{O_1}$ и $\mathbf{O_2}$) към управляващата система ($\mathbf{П_1}$) – преподавателя, и управляваната система ($\mathbf{П_2}$) – студентите. Така става ясно, че студентите не са само управлявана система, но и в определени случаи са самоуправляваща се система. Тяхното отношение към обучителния процес влияе върху решенията на преподавателя за планирането, програмирането и провеждането му. От друга страна, външната среда ($\mathbf{C_2}$), както и условията на провеждане на този процес влияят върху преподавателя.

Необходимо кибернетично знание на преподавателя

На това ниво, както и на всяко друго управленският процес се осъществява чрез т.нар***. управленски функции при спазването на определени принципи и използването на различни методи*** (фиг. 3). За правилната организация и ефективност на този процес по физическо възпитание със студентите е необходимо да се осъществи анализ на нивото на физическото им състояние при постъпването във висшето училище, както и на тяхното развитие в курса на обучение.



Фиг. 2 Обучението като кибернетичен процес



Фиг. 3 Основни компоненти на кибернетичното знание, необходими в дейността на преподавателя по физическо възпитание и спорт

От казаното дотук става ясно, че преподавателят по физическо възпитание и спорт като субект на управление както в отделния урок, така и в цялостния учебен процес трябва, на първо място, да познава основните **управленски функции**, както и технологията на приложението им. Всяка една от тези управленски функции има изключителна важност за ефективността на управленския процес.

Например *технологията на целеполагането* както във всяка област, така и в образователния процес включва йерархична структура на целите, позната като „дърво на целите“. Тази структура се изгражда принципно на три нива – главна цел, подцели и оперативни цели. Главната цел произтича от основната цел на физическото възпитание и спорта в образователната система, която намира комплексен израз във формиране у обучаваните на знания, умения и навици за занимания с физически упражнения и спорт, за подобряване на психофизическата им работоспособност и общата им двигателна култура, за укрепване на тяхното здраве, за подготвяне за изпълнение на трудово-професионалната им дейност и за социализация (Иванов и Цолов, 1998). Тази главна цел на

цялостния процес по физическо възпитание се реализира върху основата на подцели, а те се реализират чрез изпълнението на конкретните цели във всеки урок.

Прогнозирането като функция носи индиректна информация, подпомагаща вземането на ефективни решения за реализиране на целите на учебния процес по физическо възпитание. *Моделирането* е от изключителна важност както за избистряне и коригиране на поставените цели, така и за вземането на правилни решения относно средствата, методите и принципите, чрез които се реализират най-ефективно както цялостният образователен процес, така и отделният урок.

Вземането на решение е фундаментална функция с основно значение за ефективността на процеса по физическо възпитание и реализиране на неговата главна цел, подцели и оперативни цели. Технологията на решението изисква: събиране, систематизиране и анализ на целенасочена, обективна, ценна и своевременна информация; разработване на варианти на решение и вземането на самото решение; организиране на изпълнението му; обратна връзка (контрол на ефективността му).

Планирането и програмирането са други две функции, чрез които се обвързва във времето последователността от действия и стъпки за изпълнение на вече взетото решение (решения) за реализиране на целта както на отделния урок, така и на цялостния учебен процес. От управленска гледна точка в практиката се използват най-общо три основни подхода за планиране: планиране върху основата на крайните цели, върху основата на достигнатото равнище и върху основата на наличните ресурси. Най-честият и популярен вид план, използван от преподавателя, е т. нар. план-конспект. С него се планира провеждането на конкретен урок, в т.ч. планират се целите и задачите, използваните средства, дозировката (времетраенето) на изпълнението им и методическите указания към тях.

В процеса на изпълнение на вече взетото решение от изключително значение са функциите *организация, координиране и регулиране***.** Чрез *организацията* се създават всички необходими условия за реализиране на преподавателската дейност, а чрез *координиране и регулиране* се съгласуват условията и взаимодействията между преподавател и обучаеми и се противодейства на евентуалните отклонения от целта, преследвана в учебния процес по физическо възпитание.

Обратната връзка в преподавателския процес се реализира чрез функцията *контрол*. Както подчертава М. Бъчваров (1989), в спортната практика контролът е „процес, включващ измерване, оценка и анализ на определени спортнопедагогически, физиологични и психологични характеристики по време на тренировка, контролно или състезателно усилие, за да се оптимизира и управлява подготовката … или да се организира спортното развитие“. Към това определение, характеризиращо контрола в урока по физическо възпитание от позициите на тренировъчните въздействия, трябва да добавим, че преподавателят е необходимо да осъществява контрол и относно активността, успеваемостта и дисциплината на обучаемите в образователния процес.

Вторият компонент на кибернетичното знание, изключително необходим в дейността на преподавателя по спорт, отразява **кибернетичните принципи**. Основните от тях са принципите на Я. Ленер (1970): *обратната връзка, причинната връзка, черната кутия, хомеостазата, адаптацията, йерархичността, моделирането, необходимото разнообразие, непълното знание, обучението и самообучението* и др. По същество това са правила, доказани от практиката, които е необходимо преподавателят да спазва в своята управленска (педагогическа) дейност, за да може тя да бъде ефективна и да реализира успешно поставените цели. Разбира се, към тези принципи могат да се прибавят и редица други, които имат по-тясна спортнопедагогическа насоченост. Ще си позволим да посочим само някои от тях, изведени от проф. М. Бъчваров (2000), които той нарича принципи на преподаване. Това са т.нар. от него принципи на: *предварителната подготовка, организираност на урока, разширено интердисциплинно знание, адекватност на преподаването, позитивизъм, моторна плътност и разнообразие, проблемност*. Към тях могат да се добавят дидактическите както и някои специфични принципи на физическото възпитание – *непрекъснатост на процеса по физическо възпитание, редуване на работа с почивка, постепенно увеличаване на натоварването, цикличност на тренировъчните въздействия* и др.

Третият компонент на кибернетичното знание е свързан с **методите**, които трябва да познава и използва в управлението и провеждането на своята дейност, преподавателят. Проблемът е всеобхватен, тъй като както отделният урок, така и цялостният процес по физическо възпитание е управленски процес, което означава, че към добре познатите методи на управление, характерни за всяка дейност трябва да се добавят и специфичните методи за обучение (провеждане на уроците) и социалнопсихологическите методи за възпитание.

Многообразието на специфичните *методи за обучение в уроците* включва следните:

- Словесни (обяснение, описание, лекция, беседа и др.)
- Нагледни (лична демонстрация, видеопоказ, компютърна анимация и др.)
- Практически, които могат да се квалифицират в няколко групи: според начина на организация (игрови, състезателен, фронтален, кръгов и др.); начина на обучение (цялостен, разчленен, смесен); начина на натоварване (равномерен, повторен, променлив); начина на контрол (тестов, препитване).

Сред *социалнопсихологическите методи за възпитание* на обучаемите едни от най-използваните са: личен пример, убеждение, стимулиране на самостоятелност, взискателност, самоувереност, стимулиране с решаване на казуси на критично мислене, на емоционална интелигентност и др.

Специфичните *методи за управление* на обучаемата група в хода на занятието включват: инструкция, делегиране на отговорности, работа в екип, контрол и оценка на дейността и др. Към тях могат да се добавят и някои от т.нар. общонаучни методи (анализ, наблюдение, експеримент, допитване и др.).

Заключение

Изследването не изчерпва изцяло съдържанието на кибернетичното знание, необходимо за ефективно изпълнение на дейността от преподавателя по физическо

възпитание и спорт. То извежда обаче три основни (базови) компонента, които са от изключителна важност за преподавателската дейност. И те са свързани със знания за същността и технологията на управленските функции, за същността и спазването на кибернетичните принципи и за прилагането на разнообразни методи в управленския процес, осъществяван от преподавателя.

Литература

Бъчваров М. (1989). Контролът в подготовката на лекоатлета. ЕЦНПКФКС, С.

Бъчваров, М. (2000). Спортология. изд. НСА.

Бъчваров, М., Й. Иванов, Й., Б. Цолов, Б. (2005). Спортология на образователната компонента на физическото възпитание. *Сп. „Спорт и наука“, бр. 5-6.*

Бъчваров, М., Костов, К., Петров, Л., Малчев, М. (2018). Спортологични основи & Спортологичен анализ на физическото възпитание. Ай анд Би, ВТ.

Иванов, Ив. (1996). Физическо възпитание във ВУЗ. Теория и методика. Изд. УАСГ-УИК.

Иванов, Й., Цолов, Б. (1998). Резерви за ефективизиране на учебния процес по физическо възпитание във ВУЗ по материали от МГУ „Св. Иван Рилски“). *Сб. докл. „Личност, мотивация, спорт“, бр.4*, 135-139.

Иванов, Й. (2006). Образователната компонента в процеса по физическо възпитание във висшите училища. Изд. „Болид инс“.

Калайков, Й. (1986). Обща теория на управлението. Учебно помагало за студенти. НСА – ИПБ, С.

Калайков, Й. (1992). Теория и практика на мениджмънта в спорта. НСА – ИПБ, С.

Ленер, А. Я. (1970). Принципи на кибернетиката. ДИ „Техника“, С.

Цолов, Б. (2008). Основи на маркетинга в спорта. Изд. „Болидинс“, С.

Цолов, Б. (2009). Мениджмънт на спорта. Лекционен курс за студентите в НСА „Васил Левски“. БИНС, С.

Цолова, В., Иванов, Й. (2013). Физическо възпитание във висшите училища – нов методичен подход. Изд. „Авангард прима“, С.

Цолова, В. (2017). Физическо възпитание във висшите училища. Теория и научно-приложни изследвания. Изд. НСА ПРЕС.



UNIVERSITY OF
MINING AND GEOLOGY
"ST. IVAN RILSKI"

www.mgu.bg