

TRADITIONAL COMMINUTION TECHNOLOGIES IN THE PROCESSING OF COPPER ORES

Albena Haytova

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

ABSTRACT. The present study examines traditional technologies employed in the processing of copper ores, with a particular focus on mechanical comminution processes—crushing and grinding—as key stages within the mineral processing circuit. The principal technological equipment is analysed, namely semi-autogenous grinding (SAG) mills and ball mills, with emphasis placed on their operating principles, design characteristics, and performance parameters. Special attention is devoted to the energy efficiency and economic aspects of these processes, including specific energy consumption and operational costs.

The significance of this research is based on the increasing global demand for copper as a strategic industrial metal, widely utilised in electronics, energy systems, and infrastructure development. In this context, the optimisation of conventional technologies becomes critically important for enhancing efficiency and sustainability within the mineral resources industry.

The methodological framework is based on a review and analysis of specialised scientific literature and technical documentation provided by leading equipment manufacturers. The results obtained offer a systematised overview of current practices and outline potential opportunities for improving technological processes in copper ore processing.

Key words: copper ores; grinding; SAG mills; ball mills; energy efficiency.

ТРАДИЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА РАЗДРОБЯВАНЕ И СМИЛАНЕ ПРИ ПРЕРАБОТКАТА НА МЕДНИ РУДИ

Албена Хайтова

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

РЕЗЮМЕ. Настоящото изследване разглежда традиционните технологии в преработката на медни руди, с фокус върху процесите на механично раздробяване и смилане като ключови етапи в минералнообогатителния цикъл. Анализирани са основните технологични съоръжения – полуавтогенни (SAG) и топкови мелници, като се изясняват техните принципи на работа, конструктивни особености и експлоатационни характеристики. Особено внимание е отделено на енергийната ефективност и икономическите параметри на процесите, включително специфичен енергиен разход и оперативни разходи.

Значимостта на изследването се определя от нарастващото глобално търсене на мед като стратегически индустриален метал, широко използван в електрониката, енергетиката и инфраструктурните системи. В този контекст оптимизацията на традиционните технологии придобива съществено значение за повишаване на ефективността и устойчивостта в минерално-суровинната индустрия.

Методологичната рамка се основава на анализ на специализирана научна литература и техническа документация от водещи производители на оборудване. Получените резултати предоставят систематизиран преглед на съвременните практики и очертават възможности за подобрене на технологичните процеси в преработката на медни руди.

Ключови думи: медни руди; смилане; SAG мелници; топкови мелници; енергийна ефективност.

Въведение

През последните години потребността от мед в повечето ключови индустриални сектори нараства значително. Според данни на Международната агенция по енергетика, през 2023 г. общото глобално търсене на мед възлиза на 25,9 милиона тона. По прогнози на агенцията, до 2030 г. това търсене ще надхвърли 31 милиона тона, а до 2040 г. ще достигне над 36 милиона тона. Тези стойности ясно показват не само високите нива на потребление, но и ускорения темп на нарастване на търсенето (Petrova, 2023).

В същото време, още през 2023 г. се наблюдава недостиг на мед, тъй като предлагането е приблизително 21 милиона тона. Очакванията са темпът на нарастване на предлагането да бъде значително по-бавен в сравнение с темпа на търсенето. Според прогнозите, през 2040 г. предлагането от първични източници ще достигне едва около 25 милиона тона. Това ще доведе до дефицит от приблизително 11 милиона тона. Подобен недостиг ще окаже съществено влияние върху индустриите, в които медта е стратегически ресурс, като ще затрудни достъпа до суровината и ще доведе до повишаване на нейната пазарна цена. От своя страна това ще стимулира инвестициите в добива и преработката на мед, както и в разработването на по-ефективни методи за увеличаване на предлагането (Galabova et al., 2025).

Роля на минералнообогатителните процеси

Тъй като откриването на нови находища и разработването на нови рудници е дългосрочен процес, който често отнема десетилетия, основният фактор, който може да окаже по-бърз положителен ефект върху предлагането на мед, са минералнообогатителните процеси. Именно чрез тях може да се постигне по-ефективно извличане на ценния компонент от наличните рудни ресурси.

В този контекст, от една страна се разглеждат възможностите за внедряване на нови технологии, а от друга – усъвършенстването на вече утвърдените традиционни технологии (Dimov et al, 2020). Основните цели са повишаване на производствената ефективност, намаляване на енергийните и експлоатационните разходи, както и увеличаване на добива на висококачествен концентрат.

Цел и задачи на изследването

Основната цел на настоящото изследване е да бъдат разгледани най-разпространените традиционни технологии в преработката на медни руди, с акцент върху процесите на механично раздробяване и смилане като основни етапи в минералнообогатителния цикъл.

За постигането на тази цел се поставят следните задачи: анализ на характеристиките на медните руди, изследване на основните технологични процеси при

тяхната преработка, разглеждане на принципите на работа на полуавтогенните (SAG) и топковите мелници, както и оценка на енергийната ефективност и икономическите аспекти на тези технологии.

Кратко описание на структурата на публикацията

Структурно, публикацията започва с обща характеристика на медните руди и техните основни особености. След това се разглеждат традиционните технологии в преработката, с акцент върху процесите на раздробяване и смилане като ключови етапи в технологичната схема.

В следващите раздели са представени основните технологични съоръжения, използвани в този процес, а именно полуавтогенните мелници (SAG) и топковите мелници, като се анализират техните конструктивни особености, принципи на работа и експлоатационни характеристики. Разгледани са също енергийната ефективност и икономическите аспекти на процесите, включително специфичният енергиен разход и оперативните разходи.

Публикацията завършва с обобщение на основните резултати, както и с анализ на предимствата, недостатъците и възможностите за оптимизация на традиционните технологии в преработката на медни руди.

Обща характеристика на медните руди

Видове медни руди (сулфидни, оксидни)

Рудите представляват природни образувания, съставени от ценен компонент и скална маса без полезни компоненти, като се различават от находищата по това, че рудата е онази част от находището, в която полезните компоненти са концентрирани в количества, позволяващи икономически ефективно им извличане. Когато съдържащият се ценен материал е в достатъчно високо количество, което да позволява икономически целесъобразно извличане, тази руда може да се превърне в минен проект. Медта най-често се среща под формата на сулфидни, оксидни или смесени руди.

Характерно за сулфидните руди, е че ценният материал е под формата на сулфиди. Те са по-разпространеният източник на мед в промишлени количества и се преработват със следната последователност: раздробяване, смилане, флотация, топене и електролитно рафиниране. При тях медта е свързана със сярата и желязо.

При оксидните руди, ценният материал е под формата на оксид, сулфат, силикат или карбонат. Те се преработват чрез хидрометалургични методи като електролиза, например. При оксидните медни руди, медта се среща в окислени минерали като куприт, малахит, азурит и хризокола. Тази разлика е съществена, защото сулфидните минерали обикновено се поддават добре на пенна флотация, докато оксидните минерали често имат по-сложно поведение при флотация и нерядко изискват излужване или комбинирани технологични схеми.

Особености при обогатяване

Спрямо вида на медната руда има особености и при обогатителните процеси. Когато става дума за сулфидни руди, обикновено се използва пенна флотация, където след като рудата е смляна тя се смесва с вода и реагенти, като медните минерали се закрепват за мехурчетата и се

отделят на повърхността. Празната порода остава като отпадък. Когато рудата е с оксиден характер, поради различната химична структура и често, по-ниска селективност на флотационните реагенти, обогатителният процес при оксидните руди е по-различен - прилага се директна флотация, сулфидизация преди флотация или хидрометалургични процеси.

Значение на степента на раздробяване

Друга ключова характеристика за ефективността на обогатяването е степента на раздробяване. Раздробяването цели да освободи ценния материал от празната порода. Ако тази първа стъпка не бъде изпълнена достатъчно качествено и частиците са по-големи от необходимото, то частички от медните материали могат да останат заедно с отпадъчните минерали при етапа на флотация, което води до загуба на метал в процеса, и следователно негативен финансов ефект.

Ако обаче смилането е прекомерно, то тогава се образуват фини частици, които също могат да влошат флотацията, да увеличат разхода на реагенти и да повишат енергийните разходи. Следователно, трябва да се намери оптимална степен на раздробяване която е баланс между добро освобождаване и високо извличане на мед, както и приемливи експлоатационни и финансови разходи. Смилането е един от най-енергоемките, но и най-важните етапи в преработката на мед, тъй като именно то осигурява условията за ефективно разделяне на ценните минерали от празната порода

Традиционни технологии в преработката

Основни етапи в технологичния процес

Целта при преработката на медна руда е да се отдели ценният минерал (мед) от празната порода, за да се получи меден концентрат с високо съдържание. Както споменахме вече, при сулфидните медни руди, като основен източник на мед, технологичната схема включва механична подготовка (раздробяване, смилане и класификация), флотационно обогатяване и металургична преработка.

Раздробяване

Като първи етап на механичната подготовка на рудата, „раздробяването намалява размера на частиците на рудата от рудничния добив до такова ниво, че смилането да може да продължи, докато минералът и празната порода се получат като отделни частици“ (Finch, B. A., 2016). От това определение следва, че раздробяването не е самостоятелен процес, а служи за подготовка за следващите етапи за освобождаване.

Съществуват първично, вторично и третично раздробяване. За първичното обикновено се използват челюстни или гирационни трошачки, които обработват най-едрия материал. Вторичното и третичното раздробяване често се осъществяват с конусни трошачки, които осигуряват по-фин продукт и по-добър контрол върху разпределението на частиците спрямо големината им (гранулометричен състав).

Смилане

Смилането следва след раздробяването, като то е и най-енергоемкият етап от обогатителния процес.

Основната задача е да намали размера на частиците до степен, при която ценните минерали ще са освободени от минералите на празната порода. Това е нужно за ефикасното протичане на следващия процес, който обикновено е флотация.

Механизмът на смилане „протича в барабанни мелници, където рудата се подава в хоризонтална мелница, чийто цилиндричен корпус се върти от двигател, предизвиквайки въртене на заряда от руда и смилателна среда“ (Finch, B. A., 2016).

Смилането основно се извършва в полуавтогенни (SAG) и топкови мелници. При полуавтогенните мелници, самото смилане е резултат на взаимодействие между рудата и стоманени тела, обикновено стоманени топки. При сблъсъкът на едно с друго, рудата се разделя на по-малки частици. Процесът протича предимно във водна среда, тъй като мокрото смилане улеснява транспортирането на материала и създава условия за последваща класификация и флотация.

Смилането изисква значителни енергийни ресурси, които често са над 50% от общото енергийно потребление в обогатителната фабрика, поради което оптимизацията на този етап има съществено икономическо значение.

Класификация

При етапа на класификация частиците се разпределят спрямо техния размер и скорост на утаяване. Тя се извършва след смилането с цел отделяне на достатъчно фините частици, които могат да преминат към флотация, от по-едри, които трябва да бъдат върнати обратно в мелницата за допълнително смилане.

Най-често използваните съоръжения за класификация са хидроциклоните и спиралните класификатори, като хидроциклоните са по-разпространени благодарение на компактната си конструкция, висока производителност и добър контрол върху разделянето. Чрез класификацията се формира затворен цикъл на смилане, който води до по-висока ефективност и намаляване на ненужно повторно смилане.

Принципи на раздробяване и смилане

Принципът на раздробяване и смилане се основава на разрушаването на кристалната структура на минералите под въздействие на механични напрежения. „Повечето минерали са кристални материали, в които атомите са подредени в триизмерни решетки, а разрушаването настъпва при превишаване на якостта на междоатомните връзки“ (Finch, B. A., 2016). Физически, раздробяването се осъществява чрез прилагането на натиск, удар, срязване или триене.

Според Уилс и Финч, 2016: „При разрушаване чрез натиск продуктите се разделят в две отчетливи фракции – едри частици, получени при разрушаване от опъване, и фини частици, образувани при компресорно разрушаване близо до точките на натоварване“ (Finch, B. A., 2016). Това е важно при избора на подходящ тип трошачка или мелница

Роля на механичната подготовка

Механичната подготовка е основополагащ етап в преработката на медни руди, тъй като тя определя условията за ефективното протичане на всички последващи технологични операции. Основната ѝ задача е да осигури необходимата степен на освобождаване на медните

минерали от празната порода, така че разделителните процеси да могат да протекат с висока селективност и минимални загуби.

Недостатъчното раздробяване и смилане водят до наличие на сраснали зърна, при които ценният минерал остава заключен в празната порода. Това води до по-ниско извличане на мед и загуби на метал в хвостохранилището. От друга страна, прекомерното смилане също е неблагоприятно, тъй като води до образуване на твърде фини частици, които влошават флотационните показатели, увеличават разхода на реагенти и повишават енергийните разходи.

Следователно механичната подготовка трябва да бъде оптимизирана така, че да се постигне баланс между достатъчно освобождаване на минералите и икономически ефективна експлоатация.

Място на смилането в технологичната схема

Смилането заема централно място в технологичната схема на минералното обогатяване. То представлява преходната връзка между предварителната механична подготовка и процесите на физико-химично разделяне. След раздробяването материалът все още не притежава необходимата степен на освобождаване, поради което директното му подаване към флотация би довело до ниско извличане и ниско качество на концентрата.

Именно смилането осигурява подготовката на подходящ гранулометричен състав за флотационния процес. Размерът на частиците оказва пряко влияние върху ефективността на закрепване на минералите към въздушните мехурчета, а оттам и върху качеството на получения концентрат.

В съвременните обогатителни фабрики смилането обикновено се осъществява в затворен цикъл с класификация, което позволява постоянен контрол върху размера на продукта и оптимизиране на енергийните разходи. Следователно смилането не е просто междинен процес, а основен фактор за постигане на висока производителност, ниски оперативни разходи и устойчиво използване на минералните ресурси

Основни параметри на процеса

Основните параметри при процесите на раздробяване и смилане са степента на раздробяване, гранулометричният състав, времето, което отнемат и енергийният им разход.

Степента на раздробяване – колко пъти е намален размерът на частиците и показател, свързан с ефективността на процеса.

Гранулометричният състав – определя разпределението на частиците по размер и има пряко влияние върху последващата флотация. Често се използва показателят P80, който показва размера, под който попадат 80% от частиците в продукта.

Времето за производителност зависи от капацитета на оборудването и характеристиките на рудата

Специфичният енергиен разход - показва количеството енергия, нужно за обработката на дадена единица маса материал.

Фактори, влияещи върху ефективността

Един от основните фактори, които влияят на ефективността на смилане, е степента на освобождаване на минералите. Както споменахме, и прекомерното

смилане, и недостатъчното смилане водят до влошаване на ефикасността и увеличаване на разходите. Елемент, който съдейства за постоянния контрол върху размера на продукта е да се използва затворен цикъл.

Други фактори са влажността на рудата, твърдостта ѝ, равномерността на подаване към машините, както и подходящия избор на оборудване. Ако рудата е по-твърда, енергийният разход е по-висок, следователно оборудването се износва по-бързо. Ако подаването на материал към машините е неравномерно, това може да доведе до нестабилна работа на мелниците. Съоръженията и техните характеристики също са ключови. Целта е да се постигне оптимизация на параметрите по отношение на размера на мелницата, вида и броя на машини, скоростта и режима на работа. Тази оптимизация ще доведе до по-ниски оперативни разходи, удължаване на живота на съоръженията и устойчиво използване на минералните запаси.

Основни технологични съоръжения

Полуавтогенни мелници (SAG)

Полуавтогенни мелници (SAG – Semi-Autogenous Grinding Mills) са ключово съоръжение при първичното смилане в преработката на медна руда. Съществуват и автогенни мелници (AG) където няма стоманени топки, а рудата сама изпълнява ролята на смилаща среда. Предимството на полуавтогенните пред автогенните мелници, е че има по-висока интензивност на смилане и по-добър контрол. „Най-високопроизводителните смилащи вериги в минната индустрия използват автогенно (AG) или полуавтогенно смилане (SAG)” (Finch, B. A., 2016).

SAG мелниците са разпространени не само при медни рудници, но и при златни и железни обогатителни процеси с високи количества и ниско съдържание на ценен метал.

Принцип на работа и конструктивни особености. Принципът ба работа на SAG мелниците е въртенето на цилиндричен барабан. При въртенето, материалът се повдига и след това пада, като по този начин се разрушава чрез удар, натиск и абразив. Както посочват Уилс и Финч, 2016, „AG/SAG мелниците могат да обработват руда с едрина до 200 mm и да постигнат продукт с размер 0.1 mm в един етап“ (Finch, B. A., 2016).

Конструкцията на SAG мелницата представлява голям барабан с хоризонтална ос, вход и изход, вътрешна облицовка, решетка (която „служи за задържане на смилащата среда и едрите късове руда, като позволява преминаването на фините частици и пулпата“ (Finch, B. A., 2016) и пулп-лифтери (които помагат транспортирането на материал към изхода).

Обемът на стоманените топки в SAG мелниците е между 4% и 15% от обема на самата мелница.

Предимства и недостатъци. Предимствата на SAG мелницата са висока производителност, възможност за преработка на по-едра руда, по-проста технологична схема следователно по-малък брой технологични стадии, и често, по-нисък капиталов разход.

Високата първоначална капиталова инвестиция е един пример за недостатък. Друг минус на SAG мелницата, особено сравнено с топковите мелници, е че твърдостта и гранулометричния състав на подаваната руда влияят силно на производителността на мелницата. Това води до постоянна нужда от наблюдение и адаптация на режима на работа.

Топкови мелници

Принцип на работа и Конструкция. Топковите мелници се използват за фино смилане в обогатителната промишленост и обикновено се използват след SAG мелниците. Те използват стоманени или керамични топки за а осигурят смилаща среда, от където и идва името им. Целта им е да намалят размера на рудата до такъв, нужен за ефективна флотация.

Конструкцията на топковите мелница е изградена от цилиндричен барабан с вътрешна облицовка, входна и изходна система, задвижващ механизъм и определено количество топки. При въртенето на барабана топките се задвижват и чрез удар и абразив разрушават рудата. Тук отново се предпочитат мокро смилане за да се получи пулпа, с добра подготовка за класификация или флотация.

Режими на работа. По отношение на режима на работа, той се определя от скоростта на въртене на барабана. Ако тя е твърде ниска, то топките ще се „въргалат“ и няма да смилат рудата. Ако пък е твърде висока ще се получи центрофуга и смилането ще се повлияе негативно. Според Уилс и Финч, 2016, „Обикновено работната скорост е 70–80% от критичната скорост“ (Finch, B. A., 2016)

Сравнение със SAG мелници. Една от разликите между топковите мелници и SAG мелниците, е че топковите подsigуряват по-добър контрол върху финалния гранулометричен състав. От друга страна, топковите мелници са с по-ниска производителност и изискват повече смилаща среда. За да се извлекат ползите и от двете обикновено се комбинират, като се използва SAG мелница за първично смилане и след това топкови за вторично смилане.

Енергийна ефективност и икономически аспекти

Смилането отнема най-много енергия в минералообогатителния процес и следователно има голям ефект върху стойността на крайния продукт. Енергийният разход се измерва в киловат час за тон, което показва колко енергия е изгубена за преработката на тон материал. За оценка на необходимата енергия за постигане на степен на смилане се използва индекса на Бонд¹, като приложението му е още в избора на размер и мощност на мелниците, както и при икономическата оценка на проекта. „Специфичната енергия, необходима за определен производствен капацитет, се оценява чрез индекса на Бонд“ (Finch, B. A., 2016).

¹ Bond, F.C. (1961). *Crushing and Grinding Calculations*.

Фактори, влияещи върху консумацията на енергия

Има много фактори, които влияят на консумацията на енергия. По-високата твърдост, например, води до повече нужна енергия. Нестабилното подаване на материал също води до загуба на енергия. Влажността, гранулометричния състав, вида мелница и количеството смилаща среда също имат ефект върху използваната енергия.

Оперативни разходи

Оперативните разходи се състоят от електроенергията, износването на облицовката, ремонт, поддръжка и разход по топките. Колкото е по-голяма мелницата, толкова е по-голям разхода от износването на облицовката и смилащата среда. Изборът на правилен режим на работа също е важен за по-ниски разходи за енергия, по-рядка смяна на облицовката и висока ефективност. От всичко това можем да заключим, че близкото наблюдение и надзор над процеса на смилане има пряко позитивно икономическо значение.

Възможности за оптимизация

Тези разходи не могат да бъдат премахнати, но могат да бъдат оптимизирани. Използването на затворен цикъл с класификация, правилния брой топки в барабана на мелницата, правилния избор на облицовка, както и автоматизирането на управлението са примери за начини за оптимизация.

Анализ и обсъждане

В настоящата публикация са разгледани част от традиционните технологии в преработката на медни руди. Показано е, че механичната преработка е ключова при извличането на мед, като основните процеси са раздробяване. Смилане и класификация. Особено важно е смилането, като етап на подготовка за последващата стъпка на флотация. То пряко влияе върху качеството на концентрата. Комбинирането на полуавтогенните и топковите мелници е широко-разпространено.

Изкарани са основните предимства и недостатъци на тези технологии. Тяхната висока ефективност, широко приложение и възможността да преработват високи количества са примери за предимствата. SAG мелниците позволяват висока производителност и по-опростена технологична схема, докато топковите мелници осигуряват по-добър контрол върху крайния гранулометричен състав. Недостатъците са високата енергийна консумация, износването на оборудването и необходимостта от постоянен контрол върху процеса.

Тенденцията е към оптимизация на тези доказани технологии, като това се изразява в използването на затворени цикли с класификация и други, които от своя страна намаляват енергийния и финансов разход, и увеличават продуктивността,

Заключение

Основните изводи от публикацията са че раздробяването, смилането и класификацията са основни етапи при преработката на мед, които определят

ефективността на последващото флотационно обогатяване. При сулфидните медни руди тези процеси са особено важни, тъй като позволяват освобождаване на ценните минерали и получаване на концентрат с високо съдържание на мед. Оптимизацията на тези процеси е от висока важност, тъй като смилането е най-енергоемкият етап в преработката и следователно правилния избор на съоръжения, начин на работа и други изброени могат да доведат до съществено намаляване на енергийния разход и следователно икономическата ефективност.

Балансът между достатъчно освобождаване на минералите и избягване на прекомерно смилане е ключов за добрите технологични резултати.

Перспективите за бъдещо развитие са свързани с повишаване на ефективността. В моментните условия на растящо търсене на мед и ограничено предлагане, подобряването на обогатителните процеси ще има все по-важна роля. Увеличаване на ефективността може да се окаже ключово за потенциално повишаване на предлагането.

Благодарности: Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г и финансирана от МОН.

Литература

- Bahrami A, A. M. (2020). A process mineralogy approach to study the efficiency of milling of molybdenite circuit processing. Sci Rep. Извлечено от <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78337-8>
- Bond, F. C. (н.д.). Crushing & Grinding calculations Part I. От F. C. Bond, Mineral Comminution Circuit (стр. 378-548). British Chemical Engineering. Извлечено от <https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2015/11/Bond-F-C-1961-Crushing-and-Grinding-Calculations.pdf>
- Boylston, A. (н.д.). How to ensure energy efficiency in mining 1/4: Comminution circuit design. Retrieved from Metco: <https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/how-to-ensure-energy-efficiency-in-mining-part-one/>
- Britannica Editors, c. (2018). Encyclopedia Britannica. Retrieved from Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/chalcocite>
- Britannica Editors, c. (2025). Encyclopedia Britannica. Извлечено от Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/chalcocopyrite>
- Butts, A. T. (2023). Encyclopedia Britannica. Извлечено от Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/copper-processing>
- Dimov, E., Bakardjieva, R., & Stratiev, N. (2020). The mining industry and the recycling of raw materials as an important element of the Bulgarian economy. *Journal of Mining and Geological Sciences*, 63, 289-292.
- Finch, B. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*. Oxford.
- Flanagan, D. M. (2026). Copper Statistics and Information. National Minerals Information Center.

- G.R. Ballantyne, M. P. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*, стр. 109-114.
- Galabova, B., Trifonova, B., & Petrova, V. (2025). Integration of green competencies in entrepreneurial practices for sustainable development of the industry. *The Eurasia Proceedings of Educational and Social Sciences (EPESS)*, 43, 102-114.
- IEA. (2024). Мед. Париж: Международната агенция по енергетика.
- Jena, S. S. (2022). Sustainable Use of Copper Resources: Beneficiation of Low-Grade Copper Ores. *Minerals*, 12(5), Article 545. Минесота: Университет Минесота. Извлечено от <https://doi.org/10.3390/min12050545>
- Jianhua Chen, Z. X. (2020). Chapter 2 - Electronic properties of sulfide minerals and floatability. *Electronic Structure and Surfaces of Sulfide Minerals*, стр. 13-81.
- Marc Allen, T. D. (2021). MINING ENERGY CONSUMPTION 2021. Извлечено от CEEC The Future: <https://www.ceecthefuture.org/resources/mining-energy-consumption-2021>
- Morrell, S. (2008). A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilisation efficiency. *Minerals Engineering*, 224-233.
- Napier-Munn, T. (2020). Mineral Comminution Circuits. JKMRC.
- Petrova, V. (2023). Exploring the opportunities for sustainable management of critical raw materials in the circular economy. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 26, 664-671
- Qicheng Feng, W. Y. (2022). Flotation of copper oxide minerals: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, стр. 1351-1364.
- Yan, A. G. (2016). Mineral Processing Design and Operations.