

УДК 537.52:622.765

doi:10.20998/2413-4295.2023.04.14

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ЗБАГАЧЕННЯ РУД ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИМ МЕТОДОМ

О. М. РАЧКОВ*¹, Т. Д. ДЕНИСЮК², І. М. СТАРКОВ²

¹відділ високовольтних електротехнічних систем, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, Миколаїв, УКРАЇНА

²відділ імпульсних процесів перетворення енергії та методів і технологій обробки неметалевих матеріалів, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, Миколаїв, УКРАЇНА

*e-mail: syrus12@ukr.net

АНОТАЦІЯ Перспективною та доступною сировиною, порівнянню за вмістом золота та срібла з природними рудними родовищами, є лежалі хвости флотації руд. Нині накопичено мільярди тон хвостів збагачення руд, зміст цінних компонентів у яких часом перевищує їх у природних родовищах. Переробка хвостів збагачення руд з хвостосховищ для вилучення кольорових металів у більшості випадків вимагає складних схем збагачення і за техніко-економічними показниками та якістю концентратів вони неконкурентоспроможні порівняно з продуктами природної сировини. Експериментально досліджено електророзрядний спосіб дезінтеграції відходів збагачення руд для збільшення кількості доступних цільових компонентів, оснований на раціональній організації процесів дроблення та подрібнення стосовно завдань збагачення. Визначено величини тиску хвиль стиснення, які генерує електричний розряд, для розрахунку радіусу ефективного селективного впливу на досліджувані зразки відходів флотаційного збагачення мідно-цинкових руд. Встановлено необхідні умови для ефективної роботи технологічної частини обладнання: в обсязі дезінтегратора величина тиску, створюваного електророзрядом, не повинна бути меншою за межу міцності оброблюваного матеріалу на розтягування та водночас не повинна перевищувати міцність матеріалу дезінтегратора. Використання електророзрядного способу тонкого подрібнення рудної сировини забезпечує селективність дезінтеграції матеріалу за міжфазною межею «порожня порода - мінеральне включення», що дозволяє досягти значного збільшення кількості видобутих цінних металів при одночасному зниженні енерговитрат у 2 - 4 рази. Підвищення енергоефективності розглядається на прикладі відходів збагачення мідно-цинкових руд. Показано приріст кількості доступних цільових металів у відходах флотаційного збагачення мідно-цинкової руди після їх електророзрядної обробки. Приріст кількості міді, що видобувається з відходів збагачення мідно-цинкових руд, становив від 40 до 93 % мас., цинку, що видобувається – від 39 до 94 % мас., срібла, що видобувається – від 16 до 50 % мас.

Ключові слова: ресурсозбереження; електричний розряд; дезінтеграція мінералів; відходи збагачення руд.

ENERGY EFFICIENCY INCREASING OF ORE ENRICHMENT WASTES' PROCESSING BY ELECTRICAL DISCHARGE METHOD

О. RACHKOV*¹, Т. DENISYUK², І. STARKOV²

¹department of high-voltage electrical systems, Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, UKRAINE

²department of impulse processes of energy conversion and methods and technologies of processing non-metallic materials, Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT A promising and accessible raw material, comparable in terms of gold and silver content to natural ore deposits, is the lying tailings of ore flotation. Currently, billions of tons of ore tailings have been accumulated, the content of valuable components in which sometimes exceeds those in natural deposits. The processing of ore tailings from tailings for the extraction of non-ferrous metals in most cases requires complex beneficiation schemes, and in terms of technical and economic indicators and the quality of concentrates, they are uncompetitive compared to products of natural raw materials. An electric discharge method of disintegration of ore beneficiation waste to increase the number of available target components, based on the rational organization of crushing and grinding processes in relation to beneficiation tasks, was experimentally investigated. The pressure values of the compression waves generated by the electric discharge were determined to calculate the radius of effective selective influence on the studied waste samples of flotation beneficiation of copper-zinc ores. The necessary conditions for the effective operation of the technological part of the equipment are established: in the volume of the disintegrator, the pressure, created by the electric discharge, should not be less than the tensile strength of the processed material and at the same time should not exceed the strength of the disintegrator's material. The use of the electric discharge method ensures the selectivity of disintegration of the material along the interphase boundary "dead rock - mineral inclusion", this circumstance allows to achieve a significant increase in the amount of mined valuable metals and simultaneously reduction of energy consumption by 2 - 4 times. Increasing energy efficiency is considered by the way of example with copper-zinc ore concentration's waste. The increase in the number of target metals available in wastes of flotation concentration of copper-zinc ore after their electric discharge treatment

is shown. The increase in the amount of copper extracted from copper-zinc ore enrichment waste was from 40 to 93% by mass, extracted zinc - from 39 to 94% by mass, silver extracted - from 16 to 50% by mass.

Keywords: resource saving; electric discharge; disintegration of minerals; ore concentration waste.

Вступ

У районах розташування гірничодобувних та гірничопереробних підприємств одним із основних джерел забруднення різних компонентів природного середовища є сховища твердих мінеральних відходів. До теперішнього часу домінуючим шляхом поводження з відходами мінерально-сировинного комплексу є наземне складування, що веде до виникнення на територіях площею понад 4 млн. га несприятливих екологічних ситуацій. Це погіршення санітарно-гігієнічної обстановки, порушення та видозміна природних ландшафтів, втрата природних ресурсів та міграція шкідливих речовин до екосистем. З іншого боку, відвали гірничодобувних підприємств, хвостосховища збагачувальних фабрик, шлакозольні відвали паливно-енергетичного комплексу, шлаки і шлами металургійного виробництва за кількістю і якістю мінеральної сировини, що міститься в них, потенційно придатні для промислового використання в майбутньому і називаються тому техногенними родовищами. У міру розвитку науки і техніки з'явиться можливість використання техногенних родовищ, які зазвичай мають своєрідний мінеральний склад і є потенційним джерелом безлічі корисних копалин, зокрема кольорових, рідкісних та благородних металів [1,2].

Наприклад, стабільно високий попит на цінні благородні метали при виснаженні запасів легкозбагачувальних родовищ вже зараз викликає пошук альтернативних мінеральних джерел, таких як техногенні золото- та срібломісткі утворення. Обсяги таких утворень становлять мільярди тон, а ресурсний потенціал, наприклад, золота, що знаходиться в них, оцінюється у 5 тис. тон. Перспективною та доступною сировиною, порівнянною за вмістом золота та срібла разом з природними рудними родовищами, є лежалі хвости флотації мідно-цинкових колчеданних руд. Такі хвости відносяться до технологічно складного для ціанування виду ресурсів через високий вміст стійких асоціацій мінералів, що включають тонкодисперсне та іонне золото, а також є екологічно небезпечними об'єктами. Тому розробка методів ефективної переробки лежачих хвостів флотації мідно-цинкових колчеданних руд є актуальним науково-технічним завданням.

Мета роботи

Мета роботи – підвищення ефективності збагачення хвостів поліметалевих руд за рахунок застосування електророзрядної селективної дезінтеграції.

Виклад основного матеріалу

Традиційні технології видобутку та переробки металовмісних мінералів характеризуються нанесенням багатопланових збитків навколишньому середовищу при зберіганні хвостів видобутку та переробки мінералів. У сховищах лежалих хвостів флотації протікають фізико-хімічні процеси, продукти яких шкодять екосистемам. Відомі технології купного вилуговування відрізняються великою тривалістю процесу, в них задіяна значна кількість хімічно-активних токсичних речовин. Зменшення часу вилучення металів хімічним способом та відповідне скорочення терміну міграції шкідливих елементів до екосистем можливі за рахунок збільшення площі контакту екстрагенту та цільового металу. Відомі способи переробки руд, що включають попереднє розкриття мінералів і подальше гідрометалургійне вилучення цільових компонентів. До відомих способів розкриття мінералів, що збільшують доступність лужного розчину до вкраплених цільових металів, відносять тонкий і надтонкий помел, автоклавне окислення, бактеріальне окислення, а також випал [2-5]. Найбільш широко використовуваними для розкриття мінералів нині є технології механічного помелу - дезінтеграції. Важливо, що на збагачення корисних копалин витрачається понад 10% електроенергії, що виробляється у світі, причому близько її чверті припадає саме на операції дезінтеграції сировини. Аналіз енерговитрат за стадіями дезінтеграції показує, що вони порівняно низькі на стадіях середнього (вихідний розмір часток від 40 до 100 мм, енерговитрати від 0,3 до 0,5 кВт·г/т) та дрібного (вихідний розмір часток від 30 до 30 мм, енерговитрати от 0,8 до 1,2 кВт·г/т) дроблення та високі в процесах тонкого (вихідний розмір часток від 0,5 до 1 мм, енерговитрати від 18 до 30 кВт·г/т) та надтонкого (вихідний розмір часток від 0,07 до 0,1 мм, енерговитрати від 50 до 80 кВт·г/т) подрібнення.

Фізичною основою раціональної організації процесів дроблення та подрібнення стосовно завдань збагачення руд є принцип селективної дезінтеграції, що поєднує ряд вимог, які можна розділити на дві групи. Перша група складається з умов, яких необхідно дотримуватись у процесі руйнування шматка (частки) матеріалу, друга – після руйнування. Для першої групи – у процесі дезінтеграції напруги, що створюються в тілі, повинні мати високий градієнт і при цьому досягати максимуму в зоні поверхонь розділу мінеральних фаз. В результаті швидкого зменшення напруг з відстанню від зазначених зон цілісність фазових обсягів не буде порушена, а буде забезпечений міжкристалітний характер руйнування і, отже, селективність дезінтеграції. Якщо немає

технологічної можливості одразу забезпечити високу концентрацію руйнівних навантажень, слід вдатися до попереднього розміщення міжфазних меж, створюючи тим самим потрібну концентрацію у два етапи. Значення та розподіл навантажень в обсязі частинки повинні оптимально поєднуватися зі швидкістю деформування та тривалістю навантаження для мінімізації втрат у процесах, що супроводжують руйнування.

Для другої групи вимог - після руйнування повинні бути зведені до мінімуму дисипативні взаємодії, що виникають при терті частинок матеріалу, середовища та робочих органів машини. Для цього процес дезінтеграції має бути короткочасним, а готовий продукт повинен негайно видалятися з робочої зони.

Спосіб роздавлювання шматків матеріалу між робочими органами машин, на якому зараз заснована організація процесу руйнування у всіх машинах збагачення (щоккових і конусних дробарках, барабанних млинах, тощо), за своєю фізичною природою знаходиться в прямому протиріччі з ідеєю селективного руйнування.

Електричний розряд (ЕР) у рідині є одним із найперспективніших інструментів для реалізації технологічних процесів дезінтеграції твердих тіл. Електророзрядний метод включає широке коло можливостей, таких як спрямований розкол блоків, руйнування негабаритів, донних ґрунтів, дроблення та подрібнення неметалічних матеріалів з різними міцнісними характеристиками [6-9].

Цей інструмент має також можливість забезпечити селективність дезінтеграції рудної сировини в силу ряду природних для електричного розряду особливостей. На підготовчій стадії розвитку каналу електричного розряду до робочого середовища (наприклад, суспензія руда/рідина) прикладається електричне поле високої напруженості. Підвищення напруженості електричного поля відбувається поблизу неоднорідностей, що мають відмінні від пороудоутворюючої матриці електричні характеристики, як правило, це металеві включення, що цікавлять споживача [10].

На стадії розвитку електричного розряду в робочій камері за рахунок руху стінки каналу розряду виникають ударні хвилі та хвилі стиснення-розтягування. Залежно від розміру включення, довжини фронту падаючої хвилі, співвідношення акустичних характеристик матриці та металевих включень навколо неоднорідностей виникає концентрація напруг, що знеміцнюють межу включення – матриця. Важливу роль грають напруги, що розтягують, розривають шматки подібно до того, як це відбувається при вибуху хімічних вибухових речовин. Ударна хвиля породжує пружні хвилі, які поширюються в матеріалі, що руйнується, та взаємодіє з акустичними неоднорідностями - поверхнями зрощення різних мінералів, тріщинами, тощо. Концентрація напруг викликає проростання

магістральних тріщин в області цих неоднорідностей.

Відходи процесів збагачення руди («хвости») також складаються з частинок металів, що знаходяться у механічних зв'язках із породою. Одним із механізмів роз'єднання металу та породи є розрив таких зв'язків за рахунок різниці модулів пружності та високої анізотропності матеріалу в процесі імпульсного електророзрядного впливу тиском хвиль стиснення та розтягнення.

Таким чином, електричний розряд має перспективи для підвищення ефективності руйнування мінеральних середовищ, проте використання його керованості та вибіркості в даному випадку потребує наукового дослідження.

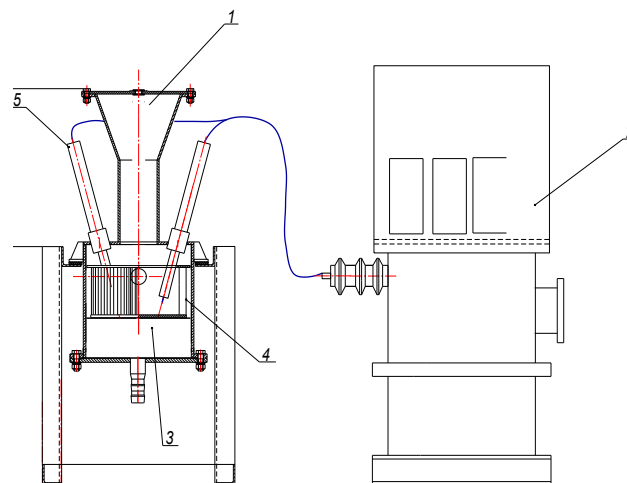
Методика експерименту

В експериментах використовували установку електророзрядної дезінтеграції, блок-схема якої представлена рис. 1.

Раніше проведені дослідження [11,12] дозволили встановити необхідні умови для ефективної роботи дезінтегратора, а саме - в обсязі дезінтегратора величина тиску, створюваного електророзрядом, не повинна бути меншою за межу міцності матеріалу на розтягування і не повинна перевищувати міцність матеріалу дезінтегратора

$$\sigma_0 < P_{вст} > \sigma_{розт}, \quad (1)$$

де σ_0 – межа міцності дезінтегратора, МПа; $P_{вст}$ – тиск хвилі стиснення, МПа; $\sigma_{розт}$ – межа міцності оброблюваного матеріалу на розтягування, МПа.



1-технологічний вузол; 2 – енергетичний блок; 3- розрядна камера; 4 класифікатор; 5- електродна система

Рис. 1 – Лабораторна установка електророзрядної дезінтеграції

Тому розрахунок розмірів дезінтегратора та його конструкція повинні уточнюватися для кожного технологічного процесу.

Для деформації руйнування як критичну величину приймають тиск на фронті хвилі стиснення $P_{вст}$, який для зони циліндричної симетрії можна виразити співвідношенням [13]:

$$P_{вст} = \frac{\sqrt[4]{U_0^5 C}}{\sqrt{r^8 L^3 l_{pn}^5}}, \quad (2)$$

де U_0 – напруга розрядного контуру, кВ; C – ємність конденсаторних батарей, мкФ; r – відстань від осі каналу розряду до об'єкта, що руйнується, м; L – індуктивність розрядного контуру, мкГн; l_{pn} – довжина розрядного проміжку, м.

Для руйнування матеріалу необхідно, щоб виконувалася умова (1). Тоді (3) слід записати у вигляді:

$$P_{вст} = \frac{\sqrt[4]{U_0^5 C}}{\sqrt{r^8 L^3 l_{pn}^5}} \geq \sigma_{розт}. \quad (3)$$

При введенні коефіцієнта $k=1,3$, який визначений нами експериментально для досліджуваних руд та враховує перевищення тиску на фронті хвилі стиснення $P_{вст}$ над межею міцності руди на розтягування $\sigma_{розт}$, залежність (3) перетворюється на наступний вираз:

$$P_{вст} = \frac{\sqrt[4]{U_0^5 C}}{\sqrt{r^8 L^3 l_{pn}^5}} = k\sigma_{розт}. \quad (4)$$

Виходячи з умов максимальної швидкості виділення енергії у розрядному проміжку, ефективність перетворення енергії може забезпечуватися за рахунок збільшення довжини розрядного проміжку [14]:

$$l_{pn} = 1,35 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}. \quad (5)$$

В вирази вище входять параметри U_0 , L , C , l_{pn} , фіксованими в ході експерименту лишали $U_0=50$ кВ, $L = 8$ мкГн и $l_{pn}=0,05$ м, а змінювали C . Змінюючи величину ємності при відомих інших параметрах розряду, визначали діапазон тиску хвилі стиснення. Підставляючи значення величин тиску в каналі розряду, міцності на розтягування оброблюваних хвостів руд $\sigma_{розт}$, що була визначена згідно [15] та значення коефіцієнта k , отримали

розрахункові дані для проектування дезінтегратора з радіусом, при якому узгоджуються значення правої і лівої частин співвідношення (3), дані представлені на рис. 2.

Враховуючи те, що тиск у каналі розряду та хвилі стиснення повинні забезпечити роботу всіх деформаційних сил і, враховуючи обставину (1), граничним параметром для забезпечення комплексу цих умов прийmemo тиск на фронті хвилі стиснення величиною 28,03 МПа, що відповідає радіусу дезінтегратора 0,2 м при ємності батареї накопичувачів 1 мкФ. Збільшення тиску веде до небажаних наслідків щодо міцності конструкції дезінтегратора, а зниження тиску в хвилі стиснення є причиною утворення «мертвих» зон в обсязі дезінтегратора, що знижує ефективність його роботи. Готували суміш води та лежалих хвостів флотації мідно-цинкової руди Костянтинівського заводу «Укрцинк» із співвідношенням Т:Р = 1:3, об'єм робочої камери становив 50 дм³. Питому енергію обробки суміші варіювали кількістю імпульсів. Розуміючи, що метод дезінтеграції хвостів збагачення, який розробляється, повинен успішно конкурувати з традиційними механічними (питомі витрати на стадії надтонкого подрібнення 50...80 кВт·г/т [16]), максимально прийняли сумарну енергію електророзрядної обробки 20 кВт·г/т. Зразки лежалих хвостів флотації мідно-цинкової руди Костянтинівського заводу «Укрцинк» з умовними назвами А, Б, В мали наступні початкові характеристики (табл. 1).

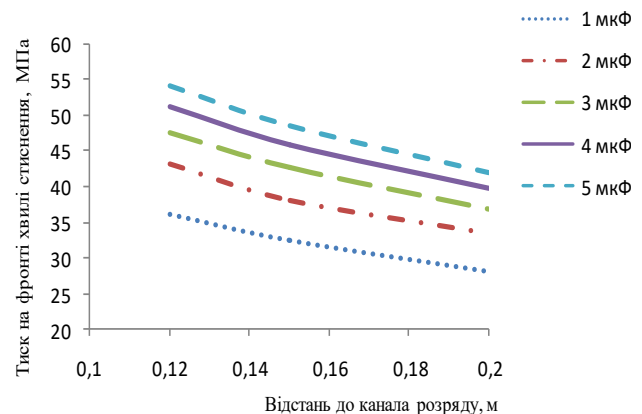


Рис. 2 – Розрахунковий тиск на фронті хвилі стиску залежно від відстані до каналу розряду для різних ємностей накопичувача

Вимірювання гранулометричного складу матеріалів до та після електророзрядної обробки проводилося методами седиментаційного аналізу згідно [17]. Після обробки зразків лежалих хвостів флотації електричним розрядом здійснювалось їх флотаційне збагачення в

лабораторії Костянтинівського заводу «Укринк» для визначення ефективності розкриття частинок породи та вилучення цільових продуктів (міді, цинку, срібла).

Таблиця 1 – Характеристики зразків хвостів флотації мідно-цинкової руди

Зразок	Фракційний склад, % мас.				Масовий вміст компонентів, % мас.		
	менше 70 мкм	70...90 мкм	90...110 мкм	більш 110 мкм	Cu	Zn	Ag
А	60,2	5,5	12,3	22,0	0,214	0,024	0,0013
Б	59,5	9,9	7,6	23,0	0,033	0,024	0,0014
В	17,4	9,9	29,5	43,2	1,72	0,750	0,0030

Обговорення результатів

Гранулометричний склад зразків оброблюваного матеріалу у вихідному стані суттєво неоднорідний, проте, вирішуючи завдання підвищення ефективності збагачення хвостів, ми мали на меті отримання фракції з розміром менше 70 мкм. Саме така фракція лежалих хвостів флотації мідно-цинкових руд найкраща згідно [18,19] для успішного розкриття зерен цільових компонентів у них. На рис. 3, 4 і 5 представлено зміну гранулометричного складу зразків А, Б та В результаті обробки водно-рудної суспензії електророзрядними імпульсами з питомою енергією 10, 15 і 20 кВт·г/т.

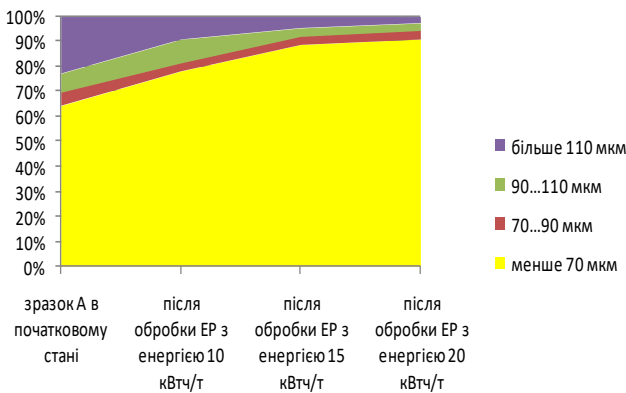


Рис. 3 - Зміна гранулометричного складу зразка А в ході електророзрядної обробки

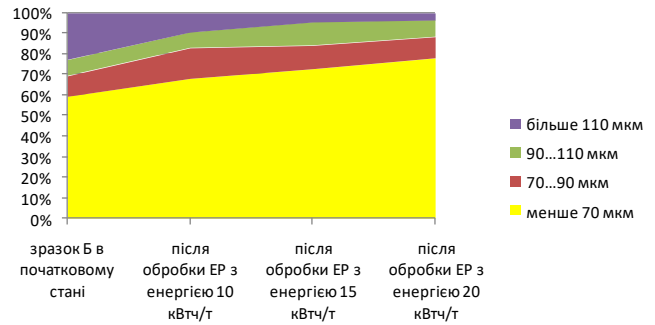


Рис. 4 - Зміна гранулометричного складу зразка Б в ході електророзрядної обробки

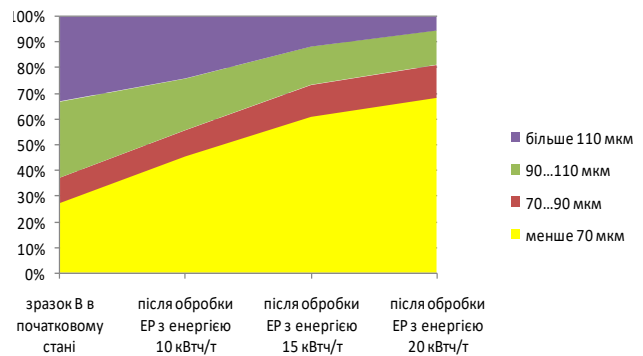


Рис. 5 - Зміна гранулометричного складу зразка В в ході електророзрядної обробки

Очевидною є раніше заявлена ефективність електричного розряду як інструменту для дезінтеграції мінеральних середовищ. Спостерігається подрібнення всіх початкових фракцій матеріалу. Приріст маси фракції менше за 70 мкм, що нас цікавить, після обробки з питомою енергією 20 кВт·г/т у зразку А склав 41% мас., у зразку Б - 31 % мас., а для зразка В маса фракції менше 70 мкм збільшилася на 149 % мас. Таким чином, електророзрядна дезінтеграція матеріалу сприяє одержанню одноріднішого за розмірами частинок матеріалу.

Аналіз отриманих результатів показує, що мінімальна енергія, яка мусить витратитися на дезінтеграцію електророзрядним способом хвостів мідно-цинкових руд з початковими параметрами, описаними вище, повинна становити не менше 15 кВт·г/т. Після електророзрядної дезінтеграції хвостів руд проводилося їхнє збагачення методом пінної флотації. Результати представлені в табл. 2 – 4, спостерігається приріст кількості доступних основних металів у відходах збагачення руди. Флотаційний поділ супроводжується збільшенням кількості металів у пінному продукті. В непрямий спосіб підтверджується ефективність електророзрядної селективної дезінтеграції відходів збагачення руд за міжфазною межею порожня порода – мінеральне включення.

Таблиця 2 – Результати збагачення зразка А методом пінної флотації

Параметр	Вихідний продукт	Флотований після ЕР обробки продукт		Приріст, % мас.
		Камерний	Пінний	
Вага проби, г	60	18,87	41,13	-
Вміст міді, % мас./г	0,214/ 0,1284	0,1187	0,1810	40
Вміст цинку, % мас./г	0,024/ 0,0144	0,0141	0,0196	39
Вміст срібла, % мас./г	0,0013/ 0,00078	0	0,00096	23

Таблиця 3 – Результати збагачення зразка Б методом пінної флотації

Параметр	Вихідний продукт	Флотований після ЕР обробки продукт		Приріст, % мас.
		Камерний	Пінний	
Вага проби, г	60	16,97	43,03	-
Вміст міді, % мас./г	0,033/ 0,0198	0,0163	0,0276	39
Вміст цинку, % мас./г	0,024/ 0,0144	0,0123	0,0280	94
Вміст срібла, % мас./г	0,0014/ 0,00084	0	0,00098	16

Таблиця 4 – Результати збагачення зразка В методом пінної флотації

Параметр	Вихідний продукт	Флотований після ЕР обробки продукт		Приріст, % мас.
		Камерний	Пінний	
Вага проби, г	60	20,08	39,92	-
Вміст міді, % мас./г	1,72/ 1,032	1,034	2,002	93
Вміст цинку, % мас./г	0,75/ 0,45	0,23	0,65	44
Вміст срібла, % мас./г	0,003/ 0,0018	0	0,0027	50

Висновки

Експериментально досліджено електророзрядний спосіб дезінтеграції відходів збагачення рудної сировини, визначено величини тиску хвиль стиснення, які генерує електричний розряд, для розрахунку радіусу ефективного селективного впливу на досліджувані зразки відходів флотаційного збагачення мідно-цинкових руд.

Електророзрядний спосіб тонкого подрібнення рудної сировини показав значну енергоефективність, порівняно з механічним енерговитрати знижуються у 2...4 рази.

Показано приріст кількості доступних цільових металів у відходах флотаційного збагачення мідно-цинкової руди після їх електророзрядної обробки. Приріст кількості міді, що видобувається з відходів збагачення мідно-цинкових руд, становив від 40 до 93 % мас., цинку, що видобувається – від 39 до 94 % мас., срібла, що видобувається – від 16 до 50 % мас.

Подальші дослідження необхідно направити в область створення універсальної методики селективної електророзрядної дезінтеграції відходів збагачення рудної сировини, що враховує широкий діапазон характеристик її міцності.

Список літератури

- Lokesh P. Padhye, Tahereh Jasemizad, Shiv Bolan, Olga V. Tsyusko, Jason M. Unrine, Basanta Kumar Biswal, Rajasekhar Balasubramanian, Yingyu Zhang, Tao Zhang, Jian Zhao, Yang Li, Jörg Rinklebe, Hailong Wang, Kadambot H.M. Siddique, Nanthi Bolan. Silver contamination and its toxicity and risk management in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 871. P. 161-196. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161926.
- Peng Wang, Fang-Jie Zhao, Steve P. McGrath. *Pollution and risks of trace elements in the soil environment: Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)*. 2023. Vol. 3. P. 288-295. doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00153-1.
- Thejas H. K., Nabil Hossiney. A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in development of sustainable eco-friendly bricks. *Materials today: Proceeding*. 2022. Vol. 61, part 2. P. 327-33; doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.522.
- Yannian Zhang, Zhijun Li, Xiaowei Gu, Moncef L. Nehdi, Afshin Marani, Lei Zhang. Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 72. P. 106585. doi: 10.1016/j.jobe.2023.106585.
- Dmytro Yelatontsev, Anatoliy Mukhachev. Processing of lithium ores: Industrial technologies and case studies – A review. *Hydrometallurgy*. 2021. Vol. 201. P. 105578. doi: 10.1016/j.hydromet.2021.105578.
- Xiaodong Wang, Jiayu Du, Qiang Li. Experimental study on crushing of concrete columns by high voltage pulse

- discharge. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol.16. P. 90–100. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01090.
7. Bo Zhang, Pengfei Zhao, Guanghui Yan, Zhenxing Zhang, Guangqing Zhu, Junwei Guo. A novel crushing pretreatment: Inhibitory effect for micro-fine grinding products of China copper ore based on high voltage pulse. *Powder Technology*. 2020. Vol. 359. P. 8-16. doi: 10.1016/j.powtec.2019.10.043.
 8. Seyed Mohammad Razavian, Bahram Rezai, Mehdi Irannajad. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses. *Advanced Powder Technology*. 2014. Vol. 25, Issue 6. P. 1672-1678. doi: 10.1016/j.appt.2014.06.010.
 9. Malyushevskaya A. P., Malyushevskii P. P. Optimization of the process of fine electric discharge dispersion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2020. Vol. 56(3). P. 400-406. doi: 10.3103/S1068375520030114.
 10. Malyushevskaya A. P., Malyushevskii P. P. Revisiting the mechanism of electrodischarge stimulation of fluid inflow into wells. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 50(6). P. 518-524. doi: 10.3103/S1068375514060076.
 11. Rizun A. R., Denisyuk T. D., Kononov V. Yu., Rachkov A. N. Electric discharge decomposition of metallurgical grade silicon. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2012. Vol. 48(4). P. 389-391. doi: 10.3103/S1068375512040151.
 12. Rizun A. R., Holen Yu. V., Denisyuk T. D. Technological process and equipment for electric-discharge local softening of soils having different strength and structure. *Science and Innovation*. 2010. Vol. 10 (5). P. 17-21. doi: 10.15407/scine10.05.017.
 13. Barbashova G. A. Determination of the characteristics of the discharge channel and ambient liquid by the prescribed channel radius. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013. Vol. 49 (6). P. 500-503. doi: 10.3103/S1068375513060045.
 14. Vovchenko O. I., Demydenko L. Yu., Blashchenko O. D., Starkov I. M. Improving the efficiency of high-voltage electric discharge installations which use exothermal dispersed media. *Technical Electrodynamics*. 2019. 5. P. 77-82. doi: 10.15407/techned2019.05.077.
 15. Kosenkov V. M., Rizun A. R. Characterization of the pulse destruction of black coal using the Kolsky method. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. Vol. 47. Issue 2. P. 189-195. doi: 10.3103/S1068375511020104.
 16. de Bakker J. Energy Use of Fine Grinding in Mineral Processing. *Metallurgical and Materials Transactions E*. 2014. P. 8–19. doi: 10.1007/s40553-013-0001-6.
 17. Chang-hong Li, Yue-qi Shi, Peng Liu, Ning Guo. Analysis of the Sedimentation Characteristics of Ultrafine Tailings Based on an Orthogonal Experiment. *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 5137092. doi: 10.1155/2019/5137092.
 18. David Sutherland. Estimation of mineral grain size using automated mineralogy. *Minerals Engineering*. 2007. Vol. 20, Issue 5. P. 452-460. doi: 10.1016/j.mineng.2006.12.011.
 19. Miettinen T., Ralston J., and Fornasiero D. The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23. 5. P. 420–437. doi: 10.1016/j.mineng.2009.12.006.
 - Rajasekhar Balasubramanian, Yingyu Zhang, Tao Zhang, Jian Zhao, Yang Li, Jörg Rinklebe, Hailong Wang, Kadambot H.M. Siddique, Nanthi Bolan. Silver contamination and its toxicity and risk management in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 871, pp. 161-196, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161926.
 2. Peng Wang, Fang-Jie Zhao, Steve pp. McGrath. *Pollution and risks of trace elements in the soil environment: Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)*, 2023, Vol. 3, pp. 288-295, doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00153-1.
 3. Thejas H. K., Nabil Hossiney. A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in development of sustainable eco-friendly bricks. *Materials today: Proceeding*, 2022, Vol. 61, part 2, pp. 327-33, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.522.
 4. Yannian Zhang, Zhijun Li, Xiaowei Gu, Moncef L. Nehdi, Afshin Marani, Lei Zhang. Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete. *Journal of Building Engineering*, 2023, Vol. 72, pp. 106585, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.106585.
 5. Dmytro Yelatontsev, Anatoliy Mukhachev. Processing of lithium ores: Industrial technologies and case studies – A review. *Hydrometallurgy*, 2021, Vol. 201, pp. 105578, doi: 10.1016/j.hydromet.2021.105578.
 6. Xiaodong Wang, Jiaxu Du, Qiang Li. Experimental study on crushing of concrete columns by high voltage pulse discharge. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, Vol.16, pp. 90–100, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01090.
 7. Bo Zhang, Pengfei Zhao, Guanghui Yan, Zhenxing Zhang, Guangqing Zhu, Junwei Guo. A novel crushing pretreatment: Inhibitory effect for micro-fine grinding products of China copper ore based on high voltage pulse. *Powder Technology*, 2020, Vol. 359, pp. 8-16, doi: 10.1016/j.powtec.2019.10.043.
 8. Seyed Mohammad Razavian, Bahram Rezai, Mehdi Irannajad. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses. *Advanced Powder Technology*, 2014, Vol. 25, Issue 6, pp. 1672-1678, doi: 10.1016/j.appt.2014.06.010.
 9. Malyushevskaya A. P., Malyushevskii P. P. Optimization of the process of fine electric discharge dispersion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2020, Vol. 56(3), pp. 400-406, doi: 10.3103/S1068375520030114.
 10. Malyushevskaya A. P., Malyushevskii P. P. Revisiting the mechanism of electrodischarge stimulation of fluid inflow into wells. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, Vol. 50(6), pp. 518-524, doi: 10.3103/S1068375514060076.
 11. Rizun A. R., Denisyuk T. D., Kononov, V. Yu., Rachkov A. N. Electric discharge decomposition of metallurgical grade silicon. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, Vol. 48(4), pp. 389-391, doi: 10.3103/S1068375512040151.
 12. Rizun A. R., Holen Yu. V., Denisyuk T. D. Technological process and equipment for electric-discharge local softening of soils having different strength and structure. *Science and Innovation*, 2010, Vol. 10 (5), pp. 17-21, doi: 10.15407/scine10.05.017.
 13. Barbashova G. A. Determination of the characteristics of the discharge channel and ambient liquid by the prescribed channel radius. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2013, Vol. 49 (6), pp. 500-503. doi: 10.3103/S1068375513060045.

References (transliterated)

1. Lokesh P. Padhye, Tahereh Jasemizad, Shiv Bolan, Olga V. Tsyusko, Jason M. Unrine, Basanta Kumar Biswal,

14. Vovchenko O. I., Demydenko L. Yu., Blashchenko O. D., Starkov I. M. Improving the efficiency of high-voltage electric discharge installations which use exothermal dispersed media. *Technical Electrodynamics*, 2019, 5, pp. 77-82, doi: 10.15407/techned2019.05.077.
15. Kosenkov V. M., Rizun A. R. Characterization of the pulse destruction of black coal using the Kolsky method. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2011, Vol. 47, Issue 2, pp. 189 – 195, doi: 10.3103/S1068375511020104.
16. de Bakker J. Energy Use of Fine Grinding in Mineral Processing. *Metallurgical and Materials Transactions E*, 2014, pp. 8–19, doi: 10.1007/s40553-013-0001-6.
17. Chang-hong Li, Yue-qi Shi, Peng Liu, Ning Guo. Analysis of the Sedimentation Characteristics of Ultrafine Tailings Based on an Orthogonal Experiment. Hindawi. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 2019, pp. 5137092, doi: 10.1155/2019/5137092.
18. David Sutherland. Estimation of mineral grain size using automated mineralogy. *Minerals Engineering*, 2007, Vol. 20, Issue 5, pp. 452-460, doi: 10.1016/j.mineng.2006.12.011.
19. Miettinen T., Ralston J., and Fornasiero D. The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*, 2010, Vol. 23, 5, pp. 420–437, doi: 10.1016/j.mineng.2009.12.006.

Відомості про авторів (About authors)

Рачков Олексій Миколайович – молодший науковий співробітник, відділ високовольтних електротехнічних систем, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, Миколаїв, Україна, ORCID 0009-0002-4940-4818; e-mail: syrus12@ukr.net.

Oleksiy Rachkov – junior researcher, department of high-voltage electrical systems, Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine, ORCID 0009-0002-4940-4818; e-mail: syrus12@ukr.net.

Денисюк Тетяна Дмитрівна – молодший науковий співробітник, відділ імпульсних процесів перетворення енергії та методів і технологій обробки неметалевих матеріалів, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, Миколаїв, Україна, ORCID 0009-0009-7551-4923; e-mail: t.d.denisjuk@gmail.com.

Tetyana Denisyuk – junior researcher, department of impulse processes of energy conversion and methods and technologies of processing non-metallic materials Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine, ORCID 0009-0009-7551-4923; e-mail: t.d.denisjuk@gmail.com.

Старков Ігор Миколайович – молодший науковий співробітник, відділ імпульсних процесів перетворення енергії та методів і технологій обробки неметалевих матеріалів, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, Миколаїв, Україна, ORCID 0000-0002-9740-3468; e-mail: igorstark21@gmail.com.

Igor Starkov – junior researcher, department of impulse processes of energy conversion and methods and technologies of processing non-metallic materials Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine, ORCID 0000-0002-9740-3468; e-mail: igorstark21@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Рачков О. М., Денисюк Т. Д., Старков І. М. Підвищення енергоефективності переробки відходів збагачення руд електророзрядним методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 4 (18). С. 98-105. doi:10.20998/2413-4295.2023.04.14.

Please cite this article as:

Rachkov O., Denisyuk T., Starkov I. Energy efficiency increasing of ore enrichment wastes' processing by electrical discharge method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 4(18), pp. 98-105, doi:10.20998/2413-4295.2023.04.14.

Надійшла (received) 11.11.2023

Прийнята (accepted) 14.12.2023