

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.7:622.341.1

<https://doi.org/10.31713/vt1202318>

Шевченко Г. О., д.т.н. (ІГТМ НАНУ, Дніпро, gashevchenko1@gmail.com), **Маланчук Є. З., д.т.н., професор** (e.z.malanчук@nuwm.edu.ua), **Корнієнко В. Я., д.т.н., професор** (НУВГП, Рівне, kvja@i.ua), **Чолишкіна В. В., к.т.н., с.н.с.** (chel.valenti@gmail.com), **Курілов В. С., м.н.с.** (ІГТМ НАНУ, Дніпро, paruycv@gmail.com)

СУЧАСНА ПРАКТИКА ЗБАГАЧЕННЯ МІДНИХ РУД СТОСОВНО ДО БАЗАЛЬТОВИХ МІДНИХ РОДОВИЩ ВОЛИНСЬКОГО ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

Багатокілометрові поклади міденосних базальтів Волині є найбільш значущим ресурсом для власного виробництва міді в Україні. Зараз мідь більше ніж на 90% імпортується, тому освоєння цих покладів дуже актуальне. Розробка технології переробки базальтових родовищ проводилась в ІГТМ НАНУ і НУВГП, де основна увага приділялася операціям рудопідготовки фізичними методами, питання саме збагачення досліджене недостатньо. Метою роботи є огляд і аналіз сучасних технологій збагачення мідних руд, близьких за складом до мідевмісних базальтів Волині, за умови їх промислового використання або поширених промислових іспитів, для визначення можливості і ефективності використання на базальтових родовищах. В цьому аспекті зроблено аналіз технологій флотації і вилуговування, враховуючи, що базальтові поклади Волині слід віднести до самородно-окислених мідних руд з незначною для промислової розробки сульфідною мінералізацією. На підставі проведеного аналізу доцільним видається опрацювання флотаційно-гідрометалургійної схеми збагачення з використанням автоклавного окислювального вилуговування флотоконцентрату. Зазначено, що флотація і вилуговування базальтів ускладнюються значним вмістом заліза і схильністю порід до шламуння. Переваги використання автоклавної технології полягають в можливості послідовного вилучення не тільки міді, а й інших цінних металів на одному обладнанні при малій витраті реагентів, нижчій собівартості і

меншій шкоді для екології в порівнянні з традиційним пірометалургійним збагаченням.

Ключові слова: мідь, базальт; збагачення; флотація; гідрометалургія.

Постановка проблеми. Відомо, що одним з основних джерел міді в Україні можуть бути базальтові поклади на західному схилі Українського кристалічного щита. Встановлено, що для чотирьох багатих рудоносних ділянок – Ратненської, Рафалівської, Кухотсько-Вольської і Шепетнівської вміст міді знаходиться в рамках промислових кондицій і становить близько 1,4% [1; 2]. Дослідженнями геологічних особливостей родовищ самородної міді на Волинському Поліссі займалися науковці: А. Є. Лукін, В. А. Шумлянський, В. Г. Мельничук, К. І. Деревська, В. М. Квасниця, І. В. Квасниця, Я. О. Косовський, В. І. Павлишин, В. О. Матеюк та інші. Відзначалося, що самородну мідь супроводжують окислені мідні мінерали, сульфідних різновидів виявлено мало, але вказувалося, що це потребує уточнення [1].

Останнє десятиліття неодноразово піднімалося питання про освоєння мідних родовищ Волині. На сьогодні отримані спецдозволи «На геологічне вивчення, включно з дослідно-промисловою розробкою» для трьох найбагатших ділянок: Жиричі у 2017 р., Заліси-Шменьки у 2021 р. і Південно-Рафалівський у 2016 р. [3]. Дані геолого-розвідки не публікуються, вони вважаються комерційною таємницею, також відсутня інформація про будь-які пошукові роботи щодо розробки технології збагачення, яка ляже в основу проєкту дослідно-промислової ділянки. Відомо лише, що на ділянках Жиричі і Заліси-Шменьки передбачається шахтний видобуток, а на Рафалівській – відкрита кар'єрна виробка породи [3]. Треба зазначити, що лише видобуток та продаж цінної базальтової сировини є короткостроковою акцією, але вона, на жаль, зачинить можливість отримати в Україні власну мідь з волинських базальтів. Сьогодні понад 90% міді Україна купує за кордоном, решта виробляється з мідного брухту. Пріоритетом у цій ситуації має бути розробка технології збагачення унікальної базальтової сировини, щоб завантажити власні металургійні потужності для виробництва міді.

Проблемою вилучення міді з базальтових порід протягом останніх років займається ІГТМ НАН України разом із Національним

університетом водного господарства та природокористування (НУВГП, м. Рівне) [2; 4; 5]. Розробці наукових основ фізичних методів збагачення унікальних базальтових порід присвятили свої праці А. Ф. Булат, В. П. Надутий, З. Р. Маланчук, Є. З. Маланчук, В. Я. Корнієнко, Т. Ю. Гринюк, О. М. Прокопюк та інші вчені. Для стадії рудопідготовки досліджено фізичні методи переробки і такі операції, як класифікація, відсадження подрібненої породи, магнітна та електрична сепарація [2; 4; 5]. Встановлено, що ці операції дозволяють підвищити концентрацію міді, але отримані продукти вимагають подальшого збагачення. Остаточна технологія збагачення, яка б забезпечувала придатний для електрометалургії продукт, як-от флотаційний концентрат чи розчини вилуговування, поки що не відпрацьована і потребує ретельних досліджень. На початковому етапі слід розглянути світовий досвід збагачення мідних руд з точки зору перспективності використання на базальтових родовищах Волині.

Метою роботи є огляд і аналіз сучасних технологій збагачення мідних руд, близьких за складом до мідевмісних базальтів Волині, за умови, що технологія використовується на практиці або пройшла стадію промислових іспитів, для визначення можливості й ефективності її використання на базальтових мідних родовищах Волині.

Світові родовища самородної міді до середини та кінця ХХ століття виявилися повністю виробленими. Це, наприклад, багаті Туринські копальні, закриті в 1918 році, шахти Дегтярського рудоуправління, які були в експлуатації до 2010 року (Урал, РФ).

Найбільше в світі відоме базальтове родовище самородної міді розроблялося, починаючи з 1840 року, в США на півострові Кьюїно, оз. Верхнє, штат Мічиган. На цьому родовищі мідь видобувалася з рудних тіл у вигляді пластів або жил, які розташовані в потужній товщі базальтових лав, конгломератів і супроводжуючих їх пісковиків. Потужність рудних тіл – від 2 до 8 м, вміст міді від 11 до 22%. Станом на 1955 рік запаси, що залишилися в родовищі, оцінювалися в 3 млн т міді, а до того було видобуто 5 млн т міді.

Менше за запасами самородномідне родовище Корокоро (департамент Ла-Пас, Болівія) належить до мідистих пісковиків, воно було вироблено на початку 20 століття. Самородне родовище Маунт Сікер на острові Ванкувер у Канаді вироблено, а мідеплавильний завод у м. Крофтон зупинено у 1908 році. Також включення

самородної міді були виявлені в габро та польових шпатах поблизу Тоскани (Іспанія), у польових шпатах та піроксенах в Намібії та ПАР. Самородна мідь виявлена на крупному Удоканському родовищі мідистих пісковиків РФ, де вміст міді 1,24%, це родовище досі не освоєне.

На сьогодні найбільш близьким аналогом мідевісних базальтів Волині є стратиформні родовища мідистих пісковиків і сланців у мідному поясі Замбії, Заїра і Конго, а також родовища: Удоканське (РФ), Джекказганське (Казахстан), Мансфельд (Німеччина), Люблін-Серошовиці (Польща), Айнакське (Афганістан).

На світових родовищах самородних мідних руд технології збагачення, як правило, були гравітаційно-пірометалургійними і гравітаційно-флотаційними (Р. О. Берт). Але ці технології сьогодні практично втратили своє значення в зв'язку з виснаженням запасів багатих руд. При залученні в переробку бідних руд дедалі ширше почали застосовувати гідрометалургійні методи, зокрема комбіновані флотаційно-гідрометалургійні схеми.

Відомо, що самородні руди в усіх родовищах міді, як правило, супроводжуються окисленими рудами (С. С. Смірнов, В. М. Ізоїтко та ін.). Зважаючи на попередні дослідження українських вчених, самородна мідь на Волині також супроводжується окисленими мінералами. Існує ймовірність, що в базальтових масивах на значних глибинах, близько 500–700 м, містяться неокислені, первинні сульфідні різновиди. Однак базальти, завдяки відносно невеликій міцності, щільності і пластово-стовпчастій структурі, легко піддаються гідротермальним процесам, тому процеси окиснення, швидше за все, зачіпають і глибинні шари. Зважаючи на це, при розробці технології збагачення слід орієнтуватися на окислені мідні руди, а не на сульфідні.

Досвід старих фабрик, що застосовували гравітаційну технологію окремо або разом із флотацією (Р. О. Берт), вказує на складність доопрацювання бідного концентрату з окислених різновидів. Зазвичай доводилося робити шихтування багатого самородного і бідного окисленого концентрату, щоб отримати продукт з якістю достатньою для металургії. Роздільне збагачення самородної складової гравітацією, а окисленої – флотацією, потребує громіздкого апаратурного оформлення і здорожує технологію. Внаслідок цього доцільно орієнтуватися на спільне збагачення

самородних і окислених мідних різновидів, одним із варіантів якого може бути флотація.

Флотації мідних руд присвятили свої праці відомі вчені: К. Сазерленд, А. М. Годен, В. А. Глембоцький, А. А. Абрамов, С. І. Митрофанів, В. А. Ігнаткіна та ін. Основна увага приділялася флотації саме сульфідних руд, які містять халькозин і халькопірит, бо такі руди є одним з головних джерел міді у світі. Для флотації окислених руд найбільш поширеним є спосіб сульфудизації змеленої сировини (Томпсон, Террі, Келлоу та ін., 1926–1942). При цьому окислені мінерали переходять у сульфати міді, які далі флотують як звичайну сульфідну руду. Сульфудизатором найчастіше є гідросульфід натрію NaHS , пропонувався також спосіб нагрівання руди з сіркою, сірководнем та інші способи [6].

Способи флотації окислених мідних руд відрізняються переважно за типом збирача. Чим більше окислена руда, тим довша повинна бути довжина ланцюжка збирача, наприклад, використовують довголанцюгові аміни з додаванням лужних сульфідів для активації [6]. Найбільш поширений в промисловості є спосіб сульфудизації і флотації сульфгідрильними збирачами у вигляді амілових, бутилових ксантогенатів. Також у промисловості використовують оксигідрильні збирачі – карбонові або жирні кислоти та їх мило (фабрика Катанга, Конго). Часто ефективність одних оксигідрильних збирачів недостатня [7], тоді після сульфудизації використовують суміш сульфгідрильних і оксигідрильних збирачів (фабрики у Замбії «Конкола», «Нчанга» та ін.). Відомим є той факт, що при сульфудизації і флотації окислених руд сульфгідрильними збирачами зазвичай вилучення становить до 70%, тоді як оксигідрильними збирачами – до 50% (С. І. Митрофанов, Е. В. Адамов, [6]). Для конкретної руди пропонується підбирати комбінацію збирачів різних типів [8].

Відомо, що спосіб металізації руди з наступною флотацією забезпечує найбільше вилучення [6]. Металізація виконується або обпалюванням руди при температурі $700\text{--}850^\circ\text{C}$ з вугіллям і NaCl , або проводиться відновлення поверхні окислених мінералів до металевий міді, наприклад формальдегідом. Встановлено, що обпал-флотаційне збагачення окислених руд рентабельне при вмісті міді в руді від 3% (А. М. Годен), а за іншими даними – від 1,5% (А. А. Абрамов).

Для технології флотації найбільш поширена двох-стадіальна схема, в якій проводиться змелення руди в 2 стадії і флотація після кожної стадії (С. І. Польшкін, Е. В. Адамов). Як правило, використовується додаткова контрольна флотація для перечищення відходів. Враховуючи слабку міцність як вміщуючих порід базальтів, так і окислених мідних мінералів, кількість стадій і режими змелення потребують відпрацювання, щоб запобігти значного шламоутворення. Для промислового використання флотації порід базальтових родовищ, як і будь-якого іншого типу окисленої мідної руди, потрібен індивідуальний підбір комбінації реагентів, пошук комплексних збирачів і опрацювання режиму.

Світовий досвід показує, що показники флотації окислених мідних руд нижчі за такі для сульфідних руд. Так, флотація окислених руд забезпечує вилучення міді до 70%, тоді як сульфідних 80–85% (А. М. Годен, Е. В. Адамов [6]). На флотацію негативно впливає наявність в суспензії шламів і алюмосилікатів породи, а також силікатів, фосфатів, хлоридів міді і залізовмісних компонентів. Наприклад, проблему флотації хризоколи та інших силікатів міді до цього часу не вирішено. Для базальтових порід, в яких вміст заліза становить до 12%, при флотації потрібна депресія заліза.

Доробка флотоконцентрату з окислених руд металургійними методами часто виявляється нерентабельною, бо вміст міді у флотоконцентраті нижче необхідного для металургії (20–25%, ДСТ 52998-2008), що робить процес плавки нерентабельним. Тому окислені флотоконцентрати доопрацьовують вилуговуванням [8–10]. Більшість підприємств, що включають до переробки окислені мідні мінерали, використовують гідрометалургійні методи.

Методи вилуговування є найбільш придатними для окислених і вторинних мідних руд, що стверджується в багатьох роботах [6; 8–10]. Першим використаним в промисловості було кислотне вилуговування із застосуванням розведеної сірчаної кислоти (Д. Д. Сялліван, В. Я. Мостович, А. С. Черняк та ін.). Цей спосіб і досі остається основним.

Він забезпечує переведення міді у розчин, з якого потім відділяють тверду фазу. Рідку фазу концентрують і далі методами цементації, сорбції або екстракції з рідкої фази виділяється метал, після промивання його прямують на електроліз. В остаточному розчині коригують хімічний склад і пускають в обіг або скидають у відвал. Зазначимо, що вилуговування може здійснюватися,

наприклад, розчином азотної кислоти, або іншим окислювачем, але при цьому породи, що вміщують мідь, повинні бути хімічно стійкими по відношенню до обраного вилуговуючого агента.

Відомі різні види вилуговування: купне, чанове, автоклавне, підземне, біохімічне. Досліджувалися методи кислотного вилуговування з додавкою окислювачів (кисень, повітря та ін.), каталізаторів (нітрити, хлориди та ін.), а також способи нейтрального, содового, аміачного, бактеріального вилуговування.

Купне вилуговування на сьогодні використовується лише для масивних покладів окислених або змішаних руд, наприклад, на двох підприємствах в Чилі, руднику Бінгем Каньйон в США, одному заводі в Конго та підприємстві Asarel Medet AD в Болгарії. Подрібнену руду попередньо зволожують, потім зрошують розведеною сірчаною кислотою. Кількість зрошень становить до 300–600, паузи між зрошенням 2–5 діб, процес може тривати від місяця до півроку [11].

Також для великих родовищ застосовується чанове вилуговування з перемішуванням або перколяційне – чанове без перемішування. Воно здійснюється в атмосферних умовах, наприклад на заводі Glencore, м. Муфуліра в Замбії, на фабриці Богдад у США.

Для базальтових родовищ застосування купного, чанового, перколяційного вилуговування стримується віддаленістю продуктивних ділянок одна від одної, що потребує транспортних розв'язань, крім того, кліматичні умови не дозволяють вести ці процеси протягом цілого року.

Порівняно з кучним та чановим вилуговуванням автоклавне або агітаційне вилуговування має суттєві переваги: забезпечує значно вищу швидкість, характеризується більш високим вилученням металу, є менш руйнівним для екології.

Розробці і створенню автоклавних технологій присвячені роботи С. С. Набойченко, І. А. Каковського, Я. М. Шнеєрсона, С. В. Захар'яна, інституту «Уніпромід». Автоклавне вилуговування здійснюється при змішуванні тонкомеленої сировини з розведеною сірчаною кислотою і нагріванні пульпи, що знаходиться під тиском [12]. На основі обмінних реакцій відбувається утворення легкорозчинних сульфатів, потім мідь з розчинів витягується, наприклад, безпосередньо електролізом за схемою EW, або послідовно рідинною екстракцією та електролізом за схемою SX-EW.

Відомо, що сульфід міді реагують із сірчаною кислотою при атмосферному тиску і температурі 150° С, а повністю розкриваються при нагріванні до 300° С.

Водночас окислені мідні мінерали потребують менших витрат, бо практично всі оксиди, силікати, карбонати міді, такі як азурит, малахіт, тенорит, куприт, хризокола, брошантит, легко розчиняються в слабких розчинах сірчаної кислоти без нагрівання. Але нагрівання потрібне для розтину конгломератів $\text{Cu}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ [12].

Найбільш поширеним є кислотне автоклавне вилуговування. Але мінімум на 8 підприємствах використовується окисна автоклавна технологія, де в автоклав додатково подається кисень, рідше повітря. Це обумовлено тим, що самородна мідь і ковелін CuS входять у реакцію з H_2SO_4 в присутності кисню як сильного окислювача.

Серед промислових підприємств, що працюють по автоклавній технології, більшість використовує в якості живлення концентрат, на двох – руду, на одному – сплав. Найчастіше автоклавній переробці піддають концентрат з халькозинової руди, де основний мінерал Cu_2S , мінімум три підприємства переробляють концентрат з поліметалічної руди, яка має в складі окислені мідні мінерали.

Відпрацьованими промисловими технологіями є низько- і високотемпературне вилуговування, автоклавні процеси з додаванням каталізаторів-окиснювачів, нітритів і хлоридів, тою чи іншою мірою знаходяться в стадії промислових випробувань. Стисло розглянемо найбільш відомі з них.

Автоклавну технологію з відносно низькою температурою (LT POX-технологія), для халькозинової руди використовували на заводі Mt Gordon, фірма Western, Австралія, завод закритий у 2004 р. Ця технологія включала кислотне вилуговування при температурі 90° С при тиску до 0,7–0,8 МПа з наступним електролізом розчину. Аналогічну технологію для переробки Fe-Cu-Co сплавів застосовують на працюючому з 2001 року заводі Chambishi Metals, фірма ERG-Eurasian Resources Group, Замбія.

Високотемпературне окиснення (HT POX-технологія) здійснюється при температурі 200–225° С при тиску 0,7–0,9 МПа. Її використовують на заводах: Kansanshi в Замбії (First Quantum Minerals, Канада), Morenci та Bagdad у США (Freeport-McMoRan). Наприклад, на руднику Morenci переробляється мідно-порфірова руда з вмістом міді 0,16%. Основні рудні мінерали: халькозин,

хризокола (водний силікат міді), малахіт, пірит і молібденіт. В технології Morenci використовується схема EW – пряма електроекстракція автоклавного розчину для отримання мідних катодів.

Автоклавні технології з добавкою каталізаторів – нітритів і хлоридів використовуються в промислових умовах для хімічного кондиціювання бідних флотоконцентратів. Так, кислотно-хлоридна технологія, або процес Platsol, застосовується на заводі NorthMet, фірма SGS Mineral Services, США для селективного вилучення Cu, Ni, Co із флотаційних концентратів, отриманих з поліметалічної сульфідної руди. Кисотно-нітритна технологія використовувалася на заводі Sunshine mining, США для змеленого до 10 мкм мідно-срібного концентрату [13].

Привертають увагу сучасні автоклавні технології без використання кислоти. Наприклад, з використанням розчину сульфату заліза III, в якому відносно легко вилуговується халькозин, на відміну від халькопірита. Цю особливість використовують на заводі Seron компанії MMG Limited в Лаосі, де технологія передбачає атмосферне вилуговування міді з подрібненої руди кислим розчином сульфату заліза III. Перевагою є можливість регенерації сульфату заліза.

Відома також безкислотна аміачна технологія. Вона пройшла стадію випробувань на заводі Arbiter фірми Anaconda Mining Company, штат Монтана, США (завод закритий у 1977 р.), а також на заводі Sherritt Gordon Mines, Ltd, Канада для сульфідного концентрату і кеку. Перевагами аміачного вилуговування вказують більш низький тиск кисню 34–35 кПа і можливість регенерації аміаку [12; 14].

Важливою операцією гідрометалургійних процесів є вилучення металу з розчинів вилуговування (Л. М. Гіндін, А. М. Розен, Ю. А. Золотов, [15]). Їх поділяють на методи сорбції – вилучення металу на твердих речовинах і методи екстракції – за допомогою розчинів.

Одним з перших був спосіб цементації міді на залізній стружці [12], його досі використовують на деяких фабриках при купному вилуговуванні. Зараз активно розвивається багато інших способів сорбції і екстракції (В. К. Бубнов, Е. К. Спірін та ін.). Відомі, наприклад, методи сорбції на іонообмінних смолах і органічних речовинах, що пройшли спеціальну обробку, методи екстракції

амінами (В. С. Шмідт), шляхом випалу з сублімацією хлоридів та інші. Матеріали-сорбенти виготовляє в Україні ВО «Придніпровський хімічний завод» у м. Кам'янське.

Сьогодні більше 30% підприємств використовують схему SX-EW – спочатку рідинна екстракція, потім електролітична [15]. Для рідинної екстракції як екстрагенти застосовують, наприклад, суміш карбонових кислот, рослинні масла, в промисловості найчастіше використовують комплексні реагенти: АБФ, LIX 64N (15-25% розчин в гасі), LIX 984N. Після екстракції розчин осаджують і осад промивають слабим розчином сірчаної кислоти (води). Отриманий реекстракт направляють у відділення електролізу, а залишок розчину доробляють і прямують в обіг як реагент вилуговування.

Потрібно відзначити, що вилучення міді з розчину на сорбент або в екстрагент дуже високе – до 98–99% [15], на відміну від вилучення міді із сировини в самий розчин, яке оцінюється в грамах на літр і становить 70–80%. Ці два вилучення є окремими характеристиками процесу вилуговування. Аналіз показників промислових технологій показує, що найнижче сумарне вилучення має купне вилуговування [11], найбільш високе – автоклавне з перемішуванням [12]. Кінцеве вилучення металу є розрахунковою величиною, яка визначається за балансом матеріальних потоків у технологічній схемі, згідно з операціями вилуговування, осадження, екстракції, промивання, фільтрації тощо.

У порівнянні з традиційним флотаційно-пірометалургічним збагаченням мідних руд до переваг автоклавних технологій відносять: значно більшу ефективність, низьку витрату реагентів, можливість на одному устаткуванні видобувати різні види металів, зменшення шкідливих екологічних наслідків [6; 10; 12].

Безумовною перевагою автоклавних процесів є те, що мідь з окислених мінералів, що містяться в базальтових породах, легко переходить у розчин навіть в атмосферних умовах. Однак для розчину залізо-мідних мінералів і переведення в розчин самородної міді потрібний додатковий окислювач. Підвищення концентрації сірчаної кислоти не вирішує цю проблему, бо, починаючи з певної концентрації, процес вилуговування стабілізується [10–12].

Стосовно базальтових порід розглянуті технології флотації і вилуговування мають кілька складнощів, на які слід звернути увагу. По-перше, обидві технології ускладнює те, що базальтові породи комплексні, зокрема, містять досить багато заліза, 9–12% [2]. Це

потребує додаткових реагентів та розгалуження технологічних схем. По-друге, як окислені мідні мінерали, так і вміщуючі породи (базальт) є досить слабкими і дають багато шламів при подрібненні, які негативно впливають на показники як флотації, так і вилюговування.

Висновки. Базальтові мідні родовища Волині є найкрупнішим ресурсом для власного виробництва міді в Україні. Триває геологічна дорозвідка цих родовищ, але попередніми дослідженнями достовірно встановлено, що їх слід віднести до унікальних самородно-окислених мідних руд з комплексною металевою фракцією, яка містить до 1–1,4% міді, 9–15% заліза, більше 1% титану, дорогоцінні метали [1; 2].

Дослідження технології переробки базальтових покладів з метою видобування міді виконувались для стадії рудопідготовки, розробка власне технології збагачення залишається актуальним завданням. При цьому увагу слід приділити збагаченню окисленої компоненти, оскільки кількість сульфідних мінералів у базальтах Волині незначна для промислової розробки, а масова частка окислених мідних мінералів порівняна або дещо вища за самородну складову. Враховуючи це, розглянуто світовий досвід збагачення самородно-окислених мідних руд.

На сьогодні найбільш близьким аналогом базальтів Волині є стратиформні родовища пісковиків і сланців у мідному поясі Замбії і Заїру, а також мідисті пісковики в Конго, Казахстані, РФ, Польщі, Афганістані. Переробка цих родовищ виконується з використанням флотації і гідрометалургії як окремо, так і в різних комбінаціях.

Розглянуто промисловий досвід збагачення окислених мідних руд за кількома технологіями: роздільним збагаченням самородної і окисленої компоненти, металізації руди з наступною флотацією, флотації із застосуванням різних типів збирачів. Зважаючи на досвід флотації окислених мідних руд, для порід базальтових родовищ здається перспективною сульфідизація і флотація сульфідрильними збирачами при депресії заліза. Щоб отримати концентрат якістю 20–25% міді, придатний для металургії, типова схема включає дві стадії флотації з контрольним перечищенням відходів флотацією.

Світовий досвід показує, що показники флотації окислених мідних руд нижчі за такі для сульфідних руд. Часто доробка бідного окисленого флотоконцентрату металургійними методами

виявляється нерентабельною, більшість підприємств використовує для доробки гідрометалургійні методи.

На підставі аналізу сучасних промислових технологій вилуговування, для базальтових родовищ відзначена перспективність використання автоклавної окислювальної технології з наступною рідинною екстракцією. Позитивним фактором автоклавного розтину базальтів є те, що, крім самородної компоненти, мідь представлена у вигляді карбонатних і оксидних мінералів легкокорозивних у слабо-кислотному середовищі в атмосферних умовах.

Відзначено, що для флотації і вилуговування негативним фактором є відносно високий вміст у породах заліза і значне шламоутворення при подрібненні. Дослідження комбінованої флотаційно-автоклавної технології представляється перспективним для отримання високого вилучення і якості продукту для електролізу і виробництва мідних катодів.

1. Мідь Волині. *Наукові праці Інституту фундаментальних досліджень* : зб. наук. пр. К. : Логос, 2006. С. 171–178.
2. Шевченко Г. О., Маланчук Є. З., Корнієнко В. Я., Чолишкіна В. В., Курілов В. С. Обґрунтування промислових кондицій вмісту міді і цінних металів у відвалах базальтових кар'єрів Волині. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки* : зб. наук. пр. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 1(97). С. 161–176.
3. Вполювати волинську мідь. URL: kscnet.ru/ivs/conferences/symposium_4/abstr...17.pdf. (дата звернення: 20.01.2023).
4. Спосіб підготовки мідевмісних базальтів до комплексного збагачення : пат. 42265 UA Україна: МПК E21C 41/00. № 200901225 ; заявл. 05.05.2009 ; надрук. 25.06.2009, Бюл. № 2.
5. Надутый В. П., Челышкина В. В., Маланчук Е. З. Моделирование выхода концентрата электросепарации медьсодержащих базальтовых пород. *Геотехническая механика* : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепр, 2016. Вып. 126. С. 43–50.
6. Абрамов А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Книга 1: *Рудоподготовка и Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn руды*. М. : Изд. МГУ, 2005. Том 3. 575 с.
7. Kim Hyung-Seok, Kim Wan-Tae, Han In-Kyu, Kim Sang-Bae. Flotation Characteristics of Malachite by Various Collectors. *J. Korean Inst. of Resources Recycling*. 2010. Vol. 19. No. 4. Pp. 58–64.
8. Tong Deng, Jiayong Chen. Treatment of Oxidized Copper Ores with Emphasis on Refractory Ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1991. Vol. 7. No 3–4. URL: doi.org/10.1080/08827509108952671. (дата звернення: 10.01.2023).
9. Iwasaki I., Prasad M. S. Processing techniques for difficult-to-treat ores by combining chemical metallurgy and mineral processing. *Mineral processing and extractive metallurgy review*. 1989. Vol. 4.

Рр. 241–276. **10.** Комбинированные процессы переработки руд цветных металлов / С. И. Митрофанов, А. В. Курочкина, А. Д. Майоров и др. Москва : Недра, 1984. 216 с. **11.** Heap Leaching Technology-Current State, Innovations, and Future Directions: A Review / Yousef Ghorbani, Jean-Paul Franzidis, Jochen Petersen. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. No 2. Pp. 73–119. URL: doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990 (дата звернення: 10.01.2023). **12.** Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов / С. С. Набойченко, Л. П. Ни, Я. М. Шнеерсон, Л. В. Чугаев. Екатеринбург : ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. 940 с. **13.** Anderson C. G. Industrial NSC-hydrometallurgical precious metals recycle. *SOJ Materials Science & Engineering*. 2013. Vol. 1(1). No 18. URL: dx.doi.org/ 10.15226/sojmse.2013.00105 (дата звернення: 10.01.2023). **14.** Исследование аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата, содержащего серебро и рений / Г. В. Петров, А. Я. Бодуэн, Б. С. Иванов, М. А. Серебряков. *Цветные металлы*. 2016. № 10. С. 23–28. **15.** Гиндин Л. М. Экстракционные процессы и их применение. М. : Наука, 1984. 144 с.

REFERENCES:

1. Mid Volyni. *Naukovi pratsi Instytutu fundamentalnykh doslidzen* : zb. nauk. pr. K. : Lohos, 2006. S. 171–178. **2.** Shevchenko H. O., Malanchuk Ye. Z., Korniienko V. Ya., Cholyskhina V. V., Kurilov V. S. Obgruntuvannia promyslovykh kondytsii vmistu midu i tsinnykh metaliv u vidvalakh bazaltovykh karieriv Volyni. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. pr. Rivne : NUVHP, 2022. Vyp. 1(97). S. 161–176. **3.** Vpoliuvaty volynsku mid. URL: kscnet.ru>ivs/conferences/symposium_4/abstr...17.pdf (data zvernennia: 20.01.2023). **4.** Sposib pidgotovky midevemisnykh bazaltiv do kompleksnoho zbahachennia : pat. 42265 UA Ukraina: MPK E21C 41/00. № 200901225 ; zaiavl. 05.05.2009 ; nadruk. 25.06.2009, Biul. № 2. **5.** Nadutyiy V. P., Chelyishkina V. V., Malanchuk E. Z. Modelirovanie vyihoda kontsentrata elektroseparatsii medsoderjaschih bazaltovyih porod. *Geotekhnicheskaya mehanika* : mejved. sb. nauch. tr. / IGTM NAN Ukrainyi. Dnepr, 2016. Vyip. 126. S. 43–50. **6.** Abramov A. A. Tehnologiya pererabotki i obogascheniya rud tsvetnyih metallov. Kniga 1: *Rudopodgotovka i Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn rudyi*. M. : Izd. MGU, 2005. Tom 3. 575 s. **7.** Kim Hyung-Seok, Kim Wan-Tae, Han In-Kyu, Kim Sang-Bae. Flotation Characteristics of Malachite by Various Collectors. *J. Korean.Inst. of Resources Recycling*. 2010. Vol. 19. No. 4. Pp. 58–64. **8.** Tong Deng, Jiayong Chen. Treatment of Oxidized Copper Ores with Emphasis on Refractory Ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1991. Vol. 7. No 3–4. URL: doi.org 10.1080/08827509108952671. (data zvernennia: 10.01.2023). **9.** Iwasaki I., Prasad M. S. Processing techniques for difficult-to-treat ores by

combining chemical metallurgy and mineral processing. *Mineral processing and extractive metallurgy review*. 1989. Vol. 4. Pp. 241–276.

10. Kombinirovannyye protsessyi pererabotki rud tsvetnyih metallov / S. I. Mitrofanov, A. V. Kurochkina, A. D. Mayorov i dr. Moskva : Nedra, 1984. 216 s.

11. Heap Leaching Technology-Current State, Innovations, and Future Directions: A Review / Yousef Ghorbani, Jean-Paul Franzidis, Jochen Petersen. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. No 2. Pp. 73–119. URL: doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990 (data zvernennia: 10.01.2023).

12. Avtoklavnaya gidrometallurgiya tsvetnyih metallov / S. S. Naboychenko, L. P. Ni, YA. M. SHneerson, L. V. CHugaev. Ekaterinburg : GOU UGTU-UPI, 2002. 940 s.

13. Anderson C. G. Industrial NSC-hydrometallurgical precious metals recycle. *SOJ Materials Science & Engineering*. 2013. Vol. 1(1). No 18. URL: dx.doi.org/10.15226/sojmse.2013.00105 (data zvernennia: 10.01.2023).

14. Issledovanie ammiachnogo avtoklavnogo vyischelachivaniya nekonditsionnogo mednogo kontsentrata, soderjaschego serebro i reniy / G. V. Petrov, A. Ya. Boduen, B. S. Ivanov, M. A. Serebryakov. *Tsvetnyie metallyi*. 2016. № 10. S. 23–28.

15. Gindin L. M. Ekstraktsionnyie protsessyi i ih primenenie. M. : Nauka, 1984. 144 s.

Shevchenko H. O., Doctor of Engineering (IGTM, NASU, Dnipro, Ukraine), **Malanchuk Ye. Z., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Korniienko V. Ya., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Cholyshkina V. V., Candidate of Economics (Ph.D.), Senior Research Fellow** (IGTM, NASU, Dnipro, Ukraine), **Kurilov V. S., Junior Research Fellow** (IGTM, NASU, Dnipro, Ukraine)

MODERN PRACTICE OF COPPER ORES DRESSING IN APPLICATION TO BASALT COPPER DEPOSITS OF VOLHYNIAN POLISIA OF UKRAINE

The multi-kilometer deposits of copper-bearing basalts of Volhynia are the most significant resource for Ukraine's own copper production. Now copper is imported by more than 90%, so the development of these deposits is very important. The development of technology for processing basalt deposits was carried out at IGTM NASU and NUWEE, where the main attention was paid to physical methods of ore preparation, the issue of enrichment has not been

sufficiently investigated. The aim of the work is to review and analyze modern technologies for the enrichment of copper ores, which are close in composition to the copper-containing basalts of Volhynia, under the condition of their industrial use or extended industrial tests, to determine the possibility and effectiveness of use in basalt deposits. In this aspect, the analysis of flotation and leaching technologies is made, taking into account that the basalt deposits of Volhynia should be attributed to naturally oxidized copper ores with insignificant sulfide mineralization for industrial development. Based on the analysis carried out, it seems appropriate to work out a flotation-hydrometallurgical enrichment scheme using autoclave oxidative leaching of the flotation concentrate. It is noted that both flotation and leaching of basalts are complicated by a significant iron content and the tendency of rocks to sludge formation. The advantages of using autoclave technology are the possibility of sequential extraction of not only copper, but also other valuable metals on the same equipment with low reagent consumption, lower cost and less damage to the environment compared to traditional pyrometallurgical enrichment.

***Keywords:* copper; basalt; enrichment; flotation; hydrometallurgy.**
