

© Р.О. Дичковський¹, І.О. Мірошников¹, А.Ю. Перерва²

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² ПАТ «Львівська вугільна компанія», Львівська обл., Сокальський р-н, село Сілець, Україна

ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНЕ ОТРИМАННЯ МОЛІБДЕНУ ТА КРИТИЧНОЇ СИРОВИНИ З ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ ВІДХОДІВ ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ

R. Dychkovskiy¹, <https://orcid.org/0000-0002-3143-8940>

I. Miroshnykov¹, <https://orcid.org/0009-0005-6451-3969>

A. Pererva², <https://orcid.org/0009-0009-0542-595X>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² PJSC "Lviv Coal Company", Lviv region, Sokal district, Silets village, Ukraine

HYDROMETALLURGICAL RECOVERY OF MOLYBDENUM AND CRITICAL RAW MATERIALS FROM TECHNOGENIC DEPOSITS OF COAL PREPARATION WASTE

Мета. Наукове обґрунтування та розробка гідрометалургійних підходів до вилучення молібдену та іншої критичної сировини з техногенних родовищ відходів вуглезбагачення з метою підвищення їх ресурсної цінності, зменшення екологічного навантаження та формування передумов для комплексної переробки.

Методика досліджень базується на послідовній комплексній підготовці зразків відходів вуглезбагачення з використанням аналітичних і експериментальних методів. Розроблено аналітичну основу гідрометалургійної технології вилучення молібдену та супутніх критичних елементів із варіюванням типу і концентрації реагентів, температури, тривалості процесу та співвідношення твердої і рідкої фаз. Ефективність процесів оцінювали за показниками вилучення та селективності цільових компонентів.

Результати дослідження. Встановлено, що застосування розробленої гідрометалургійної технології забезпечує ефективне вилучення молібдену та супутніх критичних елементів з техногенних відходів. Визначено вплив основних параметрів процесу на показники вилучення та селективності, що дозволяє обґрунтувати оптимальні умови переробки та підвищити ресурсну цінність відходів.

Наукова новизна полягає в розробці комплексного підходу до гідрометалургійного вилучення молібдену та супутніх критичних елементів із відходів вуглезбагачення техногенних родовищ, що поєднує поетапну підготовку зразків і варіювання ключових параметрів процесу. Встановлено закономірності впливу цих факторів на вилучення та селективність цільових компонентів, що дає змогу визначити оптимальні технологічні параметри переробки та підвищити ресурсну цінність відходів.

Практичне значення полягає у створенні науково обґрунтованої методики гідрометалургійної переробки відходів вуглезбагачення техногенних родовищ Західної України для ефективного вилучення молібдену та інших критичних елементів. Запропоновані підходи забезпечують підвищення ресурсної цінності техногенних відкладів, зменшення обсягів відходів та

негативного впливу на довкілля, а також створюють передумови для впровадження промислових технологій комплексної переробки відходів і формування замкнених циклів ресурсокористування в вугільній промисловості.

Ключові слова: відходи вуглезбагачення, техногенні родовища, критична сировина, молібден, гідрометалургія, ресурсоефективність.

Вступ. У сучасних умовах світова економіка стикається з проблемою дефіциту критичної сировини, необхідної для розвитку високотехнологічних галузей, енергетики та оборонної промисловості [1]. Молібден, як стратегічний метал, використовується у виробництві сталей, сплавів, каталітичних систем та енергетичного обладнання [2]. Зважаючи на обмеженість природних родовищ і зростання потреби у критичних елементах, підвищується значення альтернативних джерел, зокрема техногенних відходів [1–3].

Вуглезбагачувальні підприємства Західної України генерують значні обсяги відходів, що містять залишки цінних металів і критичної сировини. У цьому регіоні протягом часу працювало 12 вугледобувних підприємств, понад половина з яких нині закриті або знаходяться у стадії закриття [4]. Загалом вони накопичили понад 150 млн т відходів, з яких від 50 до 80 млн т знаходяться на балансі ПрАТ «Львівська вугільна компанія», а решта приблизно така ж кількість – на балансі шахтних об'єктів ДП «Львіввугілля» [4, 5]. Ці відходи, традиційно розглянуті як екологічна проблема, становлять потенційно цінний ресурс для повторного вилучення металів. Використання таких техногенних родовищ дозволяє одночасно зменшити негативний вплив на довкілля та підвищити економічну ефективність галузі [7]. Перетворення відходів на вторинну сировину відкриває можливості для гідрометалургійної переробки, зокрема вилучення молібдену та супутніх критичних елементів. Наявність великих обсягів накопичених відходів створює передумови для масштабного впровадження комплексних технологій переробки та замкненого циклу ресурсокористування [4–6, 7]. Таким чином, техногенні родовища Західної України можуть стати стратегічним джерелом критичної сировини для промисловості та сприяти сталому розвитку регіону.

Попередні дослідження показали, що відходи вуглезбагачення Західної України містять значні концентрації молібдену та ряду критичних елементів, що робить їх потенційно цінним ресурсом [5]. Водночас відсутні комплексні підходи до оптимізації гідрометалургійного вилучення цих елементів, враховуючи варіювання параметрів процесу (тип реагенту, концентрація, температура, тривалість, співвідношення твердої і рідкої фаз). Це створює необхідність наукового обґрунтування та розробки методики для максимального підвищення ефективності вилучення.

Гідрометалургія є одним із найбільш перспективних напрямів для вилучення металів із низькозбагачених руд та промислових відходів. Цей метод дозволяє ефективно виділяти молібден і супутні критичні елементи за контрольованих умов з високою селективністю та економічною доцільністю [8]. Завдяки регульованим параметрам процесу можливо оптимізувати вилучення цільових

компонентів та мінімізувати утворення шкідливих побічних продуктів [9]. Проте існуючі технології потребують адаптації до специфіки локальних відходів, які характеризуються різноманітним мінералогічним і хімічним складом, а також змінними фізико-хімічними властивостями [10]. Для забезпечення ефективності процесу необхідно враховувати взаємодію різних факторів, таких як тип реагентів, концентрація, температура, тривалість процесу та співвідношення твердої і рідкої фаз [8, 10, 11]. Таким чином, розробка адаптованих гідрометалургійних методів для конкретних відходів є ключовою передумовою для підвищення ефективності вилучення металів і використання техногенних ресурсів [10–13].

Розробка ефективної гідрометалургійної технології для переробки відходів вуглезбагачення дозволить підвищити ресурсну цінність техногенних родовищ, зменшити обсяги відходів та навантаження на довкілля, а також створить передумови для промислового впровадження комплексної переробки і формування замкнених циклів ресурсокористування. Реалізація таких підходів сприятиме сталому розвитку вугільної промисловості та підвищенню економічної ефективності використання техногенних матеріалів.

Дане дослідження є одним із результатів оцінки сучасного стану проблеми та попередньої ідентифікації потенційних об'єктів для гідрометалургійного вилучення молібдену та критичних елементів із відходів вуглезбагачення Західної України. Виконавці також планують проаналізувати промислові об'єкти, на яких ці технології можуть бути апробовані, а також створити цифрову базу відвалів і хвостосховищ із просторовим картографуванням та оцінкою їхнього потенціалу для подальших досліджень. Для цього аналітичні дослідження плануються проводити з використанням GIS-платформ, що дозволить системно оцінити розподіл і якість ресурсів у відходах. Автори сподіваються, що отримані дані створять підґрунтя для подовження роботи підприємств ДП «Львіввугілля» та ПрАТ «Львівська вугільна компанія» щодо комплексної переробки техногенних родовищ і утилізації відходів вуглезбагачення цього регіону. Таким чином, дослідження поєднує науковий аналіз існуючих технологій із практичною оцінкою ресурсного потенціалу, забезпечуючи комплексний підхід до сталого використання техногенних матеріалів.

Матеріали, методи та методика дослідження гуматів із відходів вуглезбагачення.

Для проведення дослідження були використані відходи вуглезбагачення техногенних родовищ Західної України, включаючи хвости збагачення, шлаки та зол. Ця сировина характеризується складним мінералогічним і хімічним складом, що включає молібденіт як основний мінерал молібдену та супутні метали і домішки [14]. Для забезпечення точності та відтворюваності результатів зразки проходили попередню підготовку, яка включала дроблення, подрібнення та гомогенізацію.

Попередньо відходи були сегреговані за магнітними властивостями на три основні групи для підвищення ефективності подальшої переробки. Кожна група характеризується різним вмістом металів і дозволяє застосовувати оптимізовані

технологічні підходи для вилучення цінних компонентів. Така класифікація сприяє підвищенню селективності процесу та зменшенню витрат реагентів і енергії. Процес поділу і умовна схема класифікації наведені на рис. 1 [15].

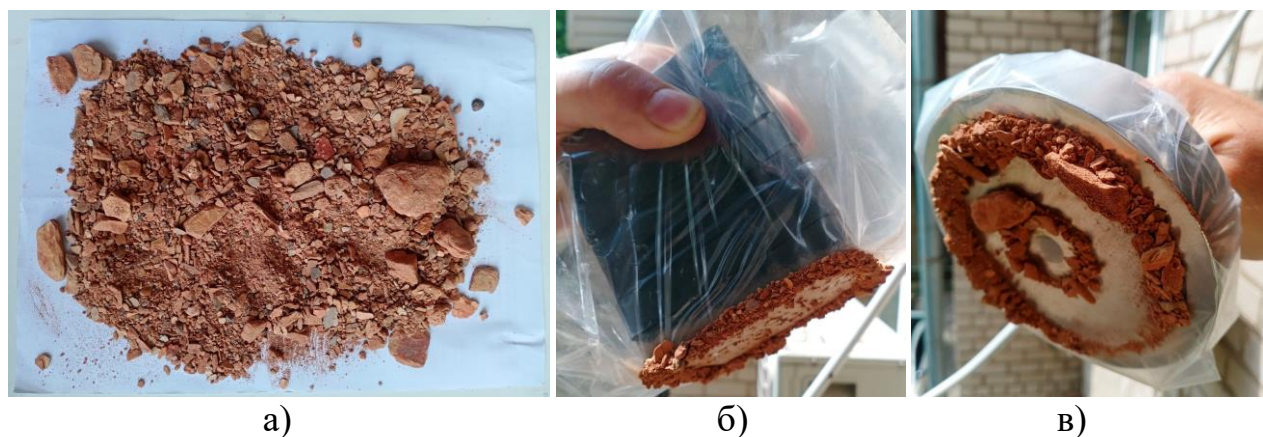


Рис. 1. Фотофіксація відбору проб відходів збагачення вугілля: (а) загальний вигляд зразка; (б) слабка магнітна сепарація за допомогою феритового магніту; (в) високоінтенсивна магнітна сепарація за допомогою неодимового магніту [15]

Перша група – неметалічна фракція – включає матеріали з мінімальним вмістом металів, що переважно складаються з породи та інших інертних компонентів. Друга група – слабо металічна фракція – містить матеріали з низьким вмістом цінних металів, які потребують спеціальних методів вилучення для ефективного відновлення. Третя група – сильно металічна фракція – характеризується високим вмістом молібдену та супутніх критичних елементів і є основним об'єктом для гідрометалургійного вилуговування. Така класифікація дозволяє оптимізувати технологічні підходи до кожної групи, підвищуючи загальну ефективність процесу та економічну доцільність переробки.

За основу гідрометалургійного вилуговування розглядається виділення молібдену за основу яких закладено два основні способи: лужне і кислотно-окиснювальне вилуговування. У лужному середовищі молібденіт реагує з лужними реагентами, утворюючи розчинні молібдат-іони, що забезпечує селективний перехід металу в рідку фазу, а більшість супутніх компонентів залишаються у твердому залишку [10, 16]. Кисотно-окиснювальне вилуговування здійснюється з використанням пероксиду водню в кислому середовищі, що сприяє руйнуванню сульфідної структури молібденіту і утворенню гідратованого оксиду молібдену, який є сприятливим для подальшого вилучення [8, 10, 17].

Ефективність вилуговування молібдену значною мірою залежить від термодинамічних умов. Підвищення температури сприяє прискоренню окисно-відновних реакцій та покращує селективність процесу, забезпечуючи спонтанність реакцій і оптимальний перехід молібдену у розчинну форму. Врахування зміни вільної енергії, ентальпії та ентропії дозволяє прогнозувати доцільність і повноту реакцій, а також визначати оптимальні температурні режими для різних типів сировини.

Важливим кінцевим елементом є технології встановлення кінетики та масообміну процесу вилуговування. На швидкість вилуговування впливають масообмінні процеси, зокрема дифузія реагентів до поверхні мінеральних частинок та відведення продуктів реакцій у рідку фазу [10, 18]. Обмеження масообміну призводить до накопичення продуктів на поверхні зерен і сповільнює реакції. Оптимізація інтенсивності масообміну, а також контроль розміру частинок і гідродинамічних умов дозволяють забезпечити максимальну швидкість вилуговування та високу ефективність процесу [8, 19].

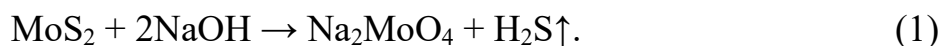
Після вилуговування молібден концентрують і виділяють із продуктивних розчинів методами осадження, сорбції або рідинної екстракції. Одним із поширених підходів є осадження кальцієвого молібдату, яке дозволяє ефективно виділити молібден із водної фази. Також можливе підкислення розчину для утворення гідратованого оксиду молібдену, що після термічної обробки перетворюється на чистий кристалічний MoO_3 , придатний для промислового використання [8, 20].

Завершальним етапом формування технології гідрометалургійного вилучення молібдену є комплексність інтеграції термодинамічних і масообмінних факторів для прогнозування ступеня конверсії металу та оптимізації технологічних параметрів. Використання такої моделі дозволяє зменшити енергетичні витрати, підвищити повноту вилучення молібдену та мінімізувати утворення побічних продуктів. Це забезпечує керованість процесу та створює основу для ефективної переробки як природних, так і техногенних молібденовмісних ресурсів, зокрема відходів вуглезбагачення.

Результати дослідження та їх обговорення (дискусія). Гідрометалургійне вилучення молібдену ґрунтується на керованих хімічних і фізико-хімічних перетвореннях молібденовмісних мінералів у розчинну форму з подальшим концентруванням і отриманням товарних сполук. Ефективність цього процесу визначається сукупністю термодинамічних, кінетичних і масообмінних факторів, а також вибором реагентів і режимів вилуговування. У цьому контексті особливої уваги потребує науково обґрунтований аналіз лужних і кислотно-окиснювальних схем вилуговування молібденіту, що створює основу для оптимізації технологічних параметрів і підвищення повноти вилучення металу на наступних стадіях гідрометалургійної переробки.

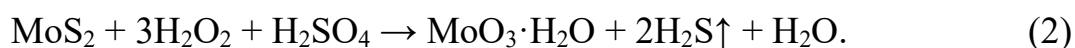
Наукова основа гідрометалургійного вилучення молібдену при розробці техногенних родовищ.

Відповідно до прийнятої методики досліджень процес гідрометалургійного вилучення молібдену полягає у переведенні молібденовмісних мінеральних фаз із твердої у розчинну форму з подальшим концентруванням та одержанням товарних молібденовмісних сполук. Згідно з концептуальними положеннями, сформульованими в підпункті 2 даного дослідження, початкова стадія процесу передбачає проведення хімічного вилуговування, у ході якого основний мінерал молібдену (молібденіт, MoS_2 взаємодіє з лужними або кислотними реагентами. Загальновідомо, що за умов лужного середовища відбувається утворення розчинного молібдату натрію відповідно до реакції лужного вилуговування [8, 10, 18]:



Реалізація цієї реакції забезпечує вибіркоче переведення молібдену у розчинну форму завдяки формуванню хімічно стабільних молібдат-іонів, які надійно зберігають свою стійкість у водному середовищі. Водночас переважна частина супутніх мінеральних компонентів рудної або техногенної сировини не залучається до реакції та залишається у твердій фазі, що істотно підвищує селективність вилуговування. Така спрямована дія процесу дозволяє обмежити розчинення небажаних домішок, зменшити навантаження на стадії очищення продуктивних розчинів і підвищити технологічну керованість системи. Як наслідок, створюються передумови для зростання повноти вилучення молібдену за одночасного скорочення енергетичних і реагентних витрат.

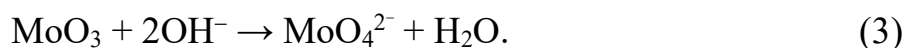
За умов кислотно-окиснювального вилуговування молібденіт зазнає інтенсивного окиснення під дією пероксиду водню в кислому середовищі за участю сірчаної кислоти, що призводить до руйнування сульфідної кристалічної ґратки мінералу та формує принципово інший механізм переходу молібдену у реакційноздатний стан:



У рівнянні (2) стехіометричний коефіцієнт $3\text{H}_2\text{O}_2$ відображає участь трьох молів пероксиду водню, який у даному процесі виконує функцію активного окиснювального агента. Саме така кількість пероксиду є принципово необхідною для повного окиснення атомів молібдену й сірки у структурі молібденіту з утворенням термодинамічно стабільних продуктів реакції. Пероксид водню виступає джерелом реакційноздатного кисню, забезпечуючи перехід молібдену у вищий ступінь окиснення та ініціюючи деструкцію сульфідної кристалічної ґратки мінералу, що суттєво підвищує ефективність процесу вилуговування.

Унаслідок перебігу окисно-відновних перетворень молібден набуває вищого ступеня окиснення з формуванням гідратованого оксиду, який характеризується підвищеною хімічною активністю. Такий стан молібдену є оптимальним для подальших гідрометалургійних операцій – розчинення, екстракції або цілеспрямованого перетворення у товарні молібденовмісні сполуки на наступних стадіях переробки.

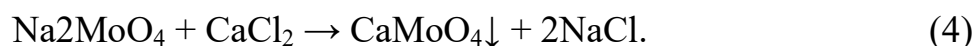
Перебіг і результативність зазначених реакцій істотно визначаються термодинамічними та температурними умовами процесу, що підкреслює роль термоенергетичного регулювання. Підвищення температури призводить до інтенсифікації окисно-відновних реакцій і зменшення значення вільної енергії Гіббса ($\Delta G < 0$), що з термодинамічної точки зору обґрунтовує доцільність активізації процесу вилуговування [21]. Крім того, температурний фактор впливає на рівновагу реакцій розчинення та гідролізу, зокрема на утворення молібдат-іонів у водному середовищі:



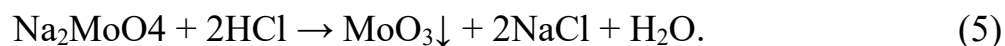
Подальший розвиток гідрометалургійного процесу значною мірою визначається інтенсивністю масообмінних явищ, які забезпечують надходження реа-

гентів до поверхні мінеральних частинок і своєчасне відведення продуктів реакцій у рідку фазу. Сформовані в ході вилуговування молібдат-іони (MoO_4^{2-}) переходять у розчин, де встановлюється динамічна рівновага між швидкістю їх утворення та швидкістю подальших хімічних перетворень. За умов обмеженого масопереносу продукти реакції накопичуються на поверхні зерен, утворюючи дифузійні бар'єри, що призводить до уповільнення кінетики вилуговування та зниження загальної ефективності процесу.

На завершальній стадії гідрометалургійної переробки здійснюється концентрування та цілеспрямоване виділення молібдену з продуктивних розчинів із використанням методів осадження, сорбції або рідинної екстракції. Вибір оптимального способу визначається хімічним складом розчину, рівнем концентрації молібдену, наявністю супутніх елементів і вимогами до чистоти кінцевого продукту. Одним із найбільш поширених і технологічно обґрунтованих підходів є осадження молібдену у формі малорозчинного кальцієвого молібдату, що забезпечує ефективне вилучення металу з водної фази [8, 21]. Така схема вирізняється простотою реалізації, стабільністю перебігу процесу та можливістю подальшої переробки осаду з одержанням товарних молібденовмісних сполук, зокрема за реакцією осадження кальцієвого молібдату:



Альтернативним шляхом виділення молібдену є його осадження у формі триоксиду молібдену шляхом підкислення продуктивного розчину. Зниження значення рН зумовлює різке зменшення розчинності молібдат-іонів і ініціює формування твердої фази [8]. За цих умов молібден виходить із розчинного стану у вигляді гідратованого оксиду, який у подальшому, після термічної обробки, трансформується у кристалічний триоксид молібдену (MoO_3). Такий технологічний підхід дозволяє одержувати продукт з високим ступенем чистоти та набув широкого практичного застосування на завершальних етапах гідрометалургійної переробки молібденовмісної сировини:



Сукупна дія розглянутих хімічних перетворень визначає інтегральну технологічну ефективність гідрометалургійного вилучення молібдену, формуючи передумови для його вибіркового переходу в розчин і подальшого цілеспрямованого виділення у товарній формі. Кінетичні та термодинамічні параметри перебігу цих реакцій безпосередньо зумовлюють ступінь повноти вилучення молібдену та стабільність процесу в широкому діапазоні температурних і концентраційних режимів. Обґрунтований добір реагентів, оптимізація їх стехіометричних співвідношень і контроль параметрів реакційного середовища дозволяють істотно зменшити питомі енергетичні витрати та обмежити утворення побічних продуктів. У підсумку комплексний аналіз реакційної системи формує надійну наукову основу для вдосконалення й оптимізації гідрометалургійних технологій вилучення та переробки молібденовмісної сировини.

Термічна та термодинамічна складова при розробці технології вилучення молібдену із техногенних родовищ.

Для науково обґрунтованого прогнозування повноти вилучення молібдену в гідрометалургійних процесах ключове значення мають термодинамічні характеристики системи. Зокрема, широко використовуються показники зміни вільної енергії Гіббса (ΔG), ентальпії (ΔH) та ентропії (ΔS), взаємозв'язок між якими формалізується відповідним термодинамічним рівнянням [21]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (6)$$

де: ΔH – тепло, що поглинається або виділяється (Дж/моль); T – температура, К; ΔS – зміна ентропії (Дж/(моль·К)).

Значення вільної енергії Гіббса слугує ключовим критерієм оцінки термодинамічної доцільності перебігу хімічних реакцій: за умов $\Delta G < 0$ процес має спонтанний характер і може реалізовуватися без додаткового енергетичного впливу. Температура процесу T , виражена в абсолютній шкалі, істотно впливає на співвідношення ентальпійної та ентропійної складових, тим самим визначаючи напрямок і глибину хімічних перетворень. У цьому контексті аналіз зміни термодинамічних потенціалів формує науково обґрунтовану основу для вибору раціональних режимів вилуговування молібденовмісної сировини.

Кількісна характеристика результативності процесу здійснюється через ступінь конверсії молібдену α , яка відображає частку металу, переведеного з вихідної сировини у розчинну або товарну форму. Даний показник визначається як відношення кількості вилученого молібдену до його початкового вмісту в перероблюваній сировині та слугує універсальним критерієм порівняльної оцінки ефективності різних технологічних схем. Даний показник визначається як відношення кількості вилученого молібдену до його початкового вмісту в перероблюваній сировині. Формально ступінь конверсії α можна записати рівнянням:

$$\alpha = n_{\text{Мо,вилучений}}/n_{\text{Мо,початковий}} \quad (7)$$

де: n – кількість молів молібдену, відповідно, у вихідній та вилученій сировині.

Важливим чинником у цьому процесі є масообмін, зокрема дифузія реагентів до поверхні мінеральних частинок і своєчасне видалення продуктів реакції у розчин. Щоби кількісно оцінити ці явища та прогнозувати швидкість вилуговування, застосовують класичне рівняння переносу маси [8, 22, 23], яке пов'язує зміну концентрації молібдену в розчині з різницею між насиченою концентрацією на поверхні мінералу та поточною концентрацією у рідкій фазі. Формально це можна записати як:

$$dC/dt = k_a(C_s - C), \quad (8)$$

де: C – концентрація молібдену в розчині, C_s – насичена концентрація на поверхні мінералу, а k_a – коефіцієнт масообміну, який враховує інтенсивність дифузійних процесів, температуру та гранулометричний склад сировини.

Це рівняння дозволяє прогнозувати кінетику вилуговування та оптимізувати тривалість технологічного процесу, підвищуючи його ефективність та економічну доцільність. Відповідно, коефіцієнт масообміну k_a відображає, наскільки активно реагенти проникають до поверхні мінеральних частинок і як швидко продукти реакції відводяться у розчин [8, 21]. Його значення залежить від умов руху рідини, температури та розміру частинок сировини. Інтегруючи відповідне рівняння, можна отримати аналітичну залежність концентрації молібдену від часу t , що дозволяє прогнозувати хід вилуговування в реальних умовах:

$$C(t) = C_s(1 - e^{-k_a t}) \quad (9)$$

Завдяки такому підходу технологи отримують можливість точно визначати оптимальну тривалість процесу, ефективно контролювати витрати реагентів і енергії, а також підвищувати продуктивність вилучення молібдену з різних типів сировини. Це робить технологію не лише більш економічною, а й екологічно безпечною. Крім того, залежність концентрації молібдену від часу дозволяє оцінювати швидкість протікання процесу та визначати його оптимальну тривалість: з часом концентрація в розчині поступово наближається до насиченого значення, що відповідає вичерпанню потенціалу масообміну. Такий підхід допомагає обґрунтувати техніко-економічні параметри процесу, уникнути зайвих витрат часу та енергії, а математичний опис масообміну дає надійний інструмент для кількісної оцінки ефективності гідрометалургійних операцій.

Об'єднання термодинамічних і масообмінних моделей дозволяє створити узагальнену схему, яка описує зміну ступеня конверсії молібдену у часі при заданих технологічних умовах. У цій моделі швидкість зростання конверсії визначається одночасно коефіцієнтом масообміну та функцією термодинамічної сприятливості процесу, що залежить від температури та величини ΔG , забезпечуючи науково обґрунтований прогноз ефективності вилуговування:

$$da/dt = k_a (1 - \alpha) f(T, \Delta G), \quad (10)$$

де: $f(T, \Delta G)$ – функція термодинамічної сприятливості процесу, яка залежить від температури і ΔG .

Такий підхід дозволяє бачити процес вилуговування молібдену не як абстрактну хімію, а як керований технологічний ланцюг. Коли ступінь конверсії α наближається до одиниці, процес працює на максимум ефективності: реагенти використовуються раціонально, енергія витрачається економно, а ресурси – максимально задіяні. Завдяки інтеграції параметрів температури та масообміну технологи можуть точно визначати оптимальну тривалість процесу, передбачати поведінку розчину і запобігати зайвим витратам, що робить виробництво не тільки ефективним, а й екологічно безпечним.

Інтегрована модель та технологічна схема вилучення молібдену.

Інтегрована термодинамічно-масообмінна модель, яка поєднує закономірності термодинаміки з процесами масопереносу, дає можливість створити універсальне рівняння для прогнозування ступеня конверсії молібдену за будь-яких технологічних умов. Вона показує, як температура, енергетична сприятли-

вість реакцій і швидкість масообміну впливають на перехід молібдену у розчинну форму, дозволяючи комплексно врахувати і кінетичні, і енергетичні обмеження. Такий підхід не лише забезпечує точний контроль над процесом, а й дає науково обґрунтовану основу для оптимізації режимів вилуговування, мінімізації витрат і підвищення виходу металу. Схематичне уявлення цієї моделі наведено на рис. 2, де наочно показано, як природні і техногенні ресурси перетворюються на цінний продукт з максимальною ефективністю.

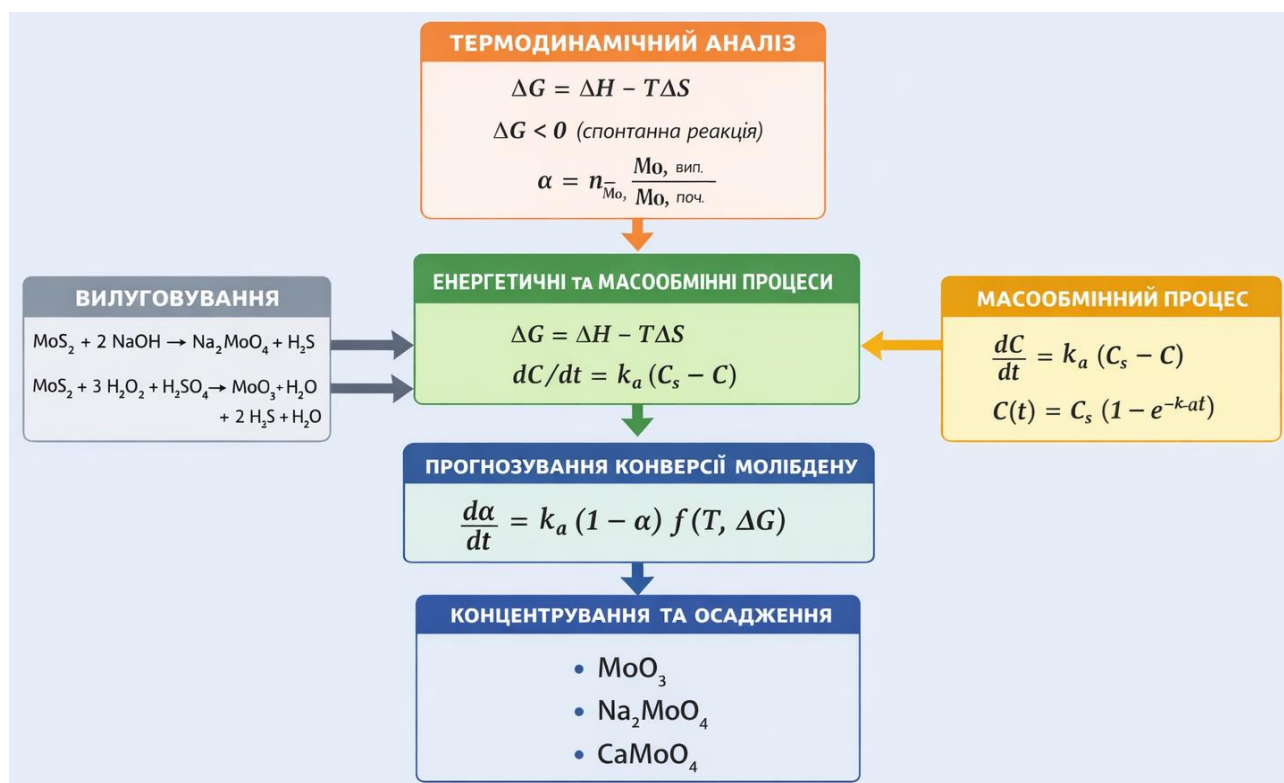


Рис. 2. Інтегрована модель технології комплексного відпрацювання молібденових руд природного та техногенного походження

Схема наочно демонструє поетапний шлях, яким молібден перетворюється з природних руд та техногенних ресурсів, таких як хвости збагачення, зола та шлаки на цінний товарний продукт. Процес включає видобуток та підготовку сировини, дроблення й подрібнення, збагачення через флотацію або хімічне вилуговування, гідрометалургійне вилучення молібдену, осадження та отримання кінцевих продуктів (MoS_2 , MoO_3 , Na_2MoO_4 , CaMoO_4), а також рекультивацію і екологічну нейтралізацію відходів. Поєднання термодинамічних, масообмінних і кінетичних моделей дає змогу прогнозувати повноту вилучення металу, оптимізувати витрати енергії та реагентів, а також контролювати швидкість перетворень у реакційних зонах. Використання сучасних обчислювальних та аналітичних методів дозволяє об'єднати природні й техногенні ресурси в єдиний переробний ланцюг, мінімізуючи негативний вплив на довкілля та підвищуючи ефективність технології.

Практична цінність розробленої моделі полягає у можливості обґрунтовано вибирати оптимальні температурні режими для вилучення молібдену з різних типів сировини, включно з природними рудами та техногенними утвореннями. Модель дозволяє контролювати тривалість процесу, оцінювати ефективність використання хімічних реагентів і прогнозувати вихід кінцевого продукту. Це сприяє не тільки підвищенню повноти вилучення молібдену, а й зменшенню обсягів утворених відходів при роботі з техногенними родовищами, знижуючи навантаження на довкілля. Універсальність підходу робить його придатним як для природних молібденових руд, так і для переробки промислових відходів, включаючи хвости збагачення, шлаки та інші техногенні матеріали.

Проведені дослідження є основою для розробки технологічної схеми гідрометалургійного отримання молібдену із техногенних родовищ. Дана схема (рис. 3) демонструє поетапний процес вилучення молібдену з відходів вуглезбагачення, що дозволяє перетворювати промислові залишки на цінний продукт з високою чистотою. На початковому етапі відходи піддаються дробленню та сортуванню, що дозволяє розділити матеріал на неметалічну, слабо-металічну та сильно-металічну фракції. Цей поділ є важливим, оскільки дозволяє направляти матеріал на подальшу обробку залежно від його складу та металевої активності, а також оптимально підбирати відповідне технологічне обладнання для кожної фракції – від дробарок і сортувальних установок до сепараторів.

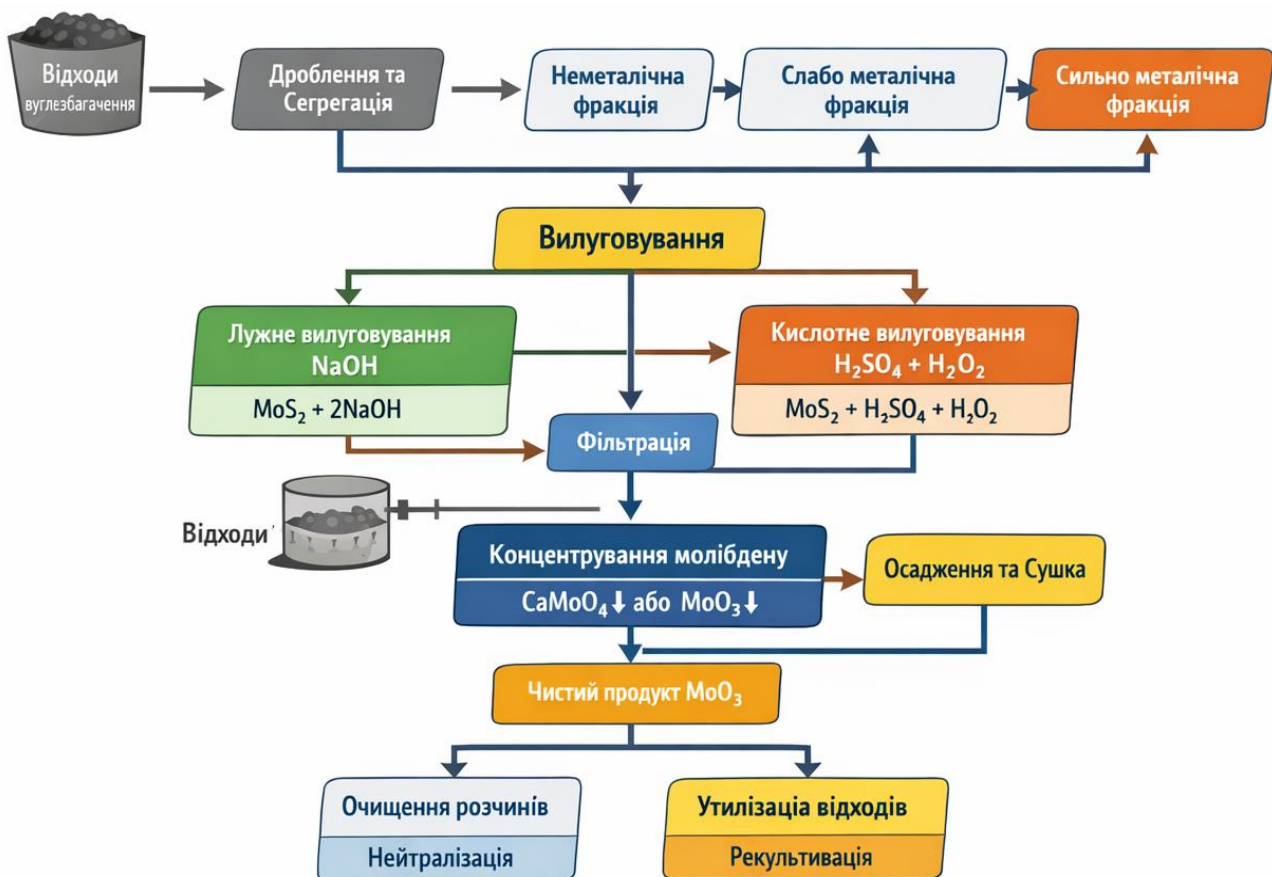


Рис. 3. Технологічна схема гідрометалургійного отримання молібдену із відходів вуглезбагачення

Наступний етап (вилуговування) передбачає два альтернативні шляхи: лужне вилуговування з використанням NaOH або кислотно-окислювальне вилуговування за участі H_2SO_4 та H_2O_2 . Вибір конкретного реагентного середовища та режиму процесу визначається складом вихідної сировини, бажаною швидкістю вилучення та кінцевою концентрацією молібдену у розчині. Після вилуговування відбувається фільтрація, яка відокремлює тверді залишки та забезпечує підготовку продуктивного розчину для концентрування молібдену.

Концентрування здійснюється шляхом осадження у вигляді кальцієвого молібдату ($CaMoO_4$) або триоксиду молібдену (MoO_3), після чого продукт піддається сушці. На цьому етапі також передбачена можливість підбору оптимального обладнання для осадження та сушіння, що дозволяє регулювати розмір кристалів та чистоту кінцевого продукту. Отриманий чистий MoO_3 може бути використаний для виробництва товарних сполук молібдену або подальшої хімічної обробки.

У завершальній частині схеми передбачено очищення розчинів і нейтралізацію відходів, а також їх рекультивацію. Цей комплексний підхід не тільки підвищує ефективність вилучення молібдену, а й мінімізує негативний вплив на довкілля, роблячи технологію більш економічно та екологічно доцільною. Завдяки гнучкості схеми, технологи можуть підбирати обладнання та регулювати параметри процесу на кожному етапі, забезпечуючи стабільну роботу та максимальну продуктивність.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що відходи вуглезбагачення Західної України є цінним джерелом молібдену та супутніх металів. Класифікація відходів на неметалічну, слабо-металічну та сильно-металічну фракції дозволяє ефективно керувати технологічним процесом, підбираючи оптимальне обладнання та методи обробки для кожної групи сировини. Такий підхід підвищує селективність вилучення цінних компонентів, зменшує витрати реагентів і енергії, а також створює передумови для економічно доцільної переробки техногенних ресурсів.

Досліджені лужні та кислотно-окиснювальні схеми вилуговування молібденіту показали високу ефективність переведення металу у розчинну форму при контрольованих термодинамічних та температурних умовах. Застосування NaOH у лужному середовищі забезпечує селективне утворення молібдат-іонів, тоді як H_2SO_4 та H_2O_2 у кислотно-окиснювальному середовищі дозволяють руйнувати сульфідну структуру молібденіту і отримувати гідратований оксид молібдену. Така різностороння стратегія забезпечує гнучкість технології та можливість її адаптації до різного складу сировини.

Оптимізація масообміну та контроль кінетики реакцій є ключовими факторами підвищення ефективності процесу. Врахування дифузії реагентів і своєчасного відведення продуктів реакцій дозволяє максимально прискорити вилуговування та досягти високої повноти конверсії молібдену. Інтеграція термодинамічних та масообмінних моделей дає змогу прогнозувати хід процесу, оптимізувати тривалість операцій і раціонально використовувати реагенти та енергію, що робить технологію більш керованою, економічною та екологічно безпечною.

Розроблена технологічна схема комплексного вилучення молібдену із природних і техногенних ресурсів демонструє ефективний шлях від дроблення та сортування відходів до отримання чистого MoO_3 або CaMoO_4 . Використання аналітичних та обчислювальних методів дозволяє об'єднати різні джерела сировини в єдиний переробний ланцюг, зменшити обсяг утворюваних відходів і мінімізувати негативний вплив на довкілля. Практичне застосування цієї моделі забезпечує підвищення виходу товарного продукту та закладає науково обґрунтовану основу для оптимізації промислових технологій гідрометалургійного вилучення молібдену.

Вдячність. Представлені результати отримано в рамках виконання науково-дослідної роботи ДТ-530 «Наукове обґрунтування та розробка геореакторних систем для комплексної переробки відходів вуглезбагачення з орієнтацією на отримання критичної сировини» за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Polyanska, A., Cichoń, D., Verbovska, L., Dudek, Sala, D., Martynets, V. (2022). Waste management skills formation in modern conditions: the example of Ukraine. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, 4(45), 322–334. <https://doi.org/10.55643/fcaptop.4.45.2022.3814>
2. Lewicka, D., Zarębska, J., Batko, R., Tarczydło, B., Woźniak, M., Cichoń, D., & Pec, M. (2023). Circular Economy in the European Union. *Circular Economy in the European Union: Organisational Practice and Future Directions in Germany, Poland and Spain*, 21–267 <https://doi.org/10.4324/9781003411239>
3. Lapshyn, Ye, Shevchenko, O., Dybrin, S., & and Dychkovskiy, R. (2025). Feasibility of Fine Classification in Processing Watered Coal Sludge from Storage: A Case Study of the Dnipro Coke Chemical Plant. *Acta Montanistica Slovaca*, 100. <https://doi.org/10.46544/ams.v30i1.07>
4. Стратегія розвитку Львівської області на період 2021–2027 років. (2021) Львів : Львівська бласна державна адміністрація. <https://drive.google.com/file/d/1UrDHGh5KA9uZ11-QSwiLyjwuMWUR3U08/view>
5. Державна служба статистики України (n.d.). Утворення відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів у 2017 (2018, 2019, 2020) році. <https://www.ukrstat.gov.ua>
6. Knysh, I., & Karabyn, V. (2014). Heavy metals distribution in the waste pile rocks of Chervonogradska mine of the Lviv-Volyn coal basin (Ukraine). *Pollution Research*, 33, 663–670.
7. Хлопицький, А.А., & Макаренко, М.П. (2013). Перспективи утилізації золошлакових відходів теплових електростанцій. *Електронний науковий журнал "Universum: технічні науки"*, 1, 35–47.
8. Slater, M. J. (1995). A textbook of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 37(1), 123. [https://doi.org/10.1016/0304-386x\(95\)90002-m](https://doi.org/10.1016/0304-386x(95)90002-m)
9. Polyanska, A., Savchuk, S., Dudek, M., Sala, D., Pazynich, Y., & Cicho, D. (2022). Impact of digital maturity on sustainable development effects in energy sector in the condition of Industry 4.0. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/097>
10. Chmielewski, A. G., Urbański, T. S., & Migdał, W. (1997). Separation technologies for metals recovery from industrial wastes. *Hydrometallurgy*, 45(3), 333–344. [https://doi.org/10.1016/s0304-386x\(96\)00090-4](https://doi.org/10.1016/s0304-386x(96)00090-4)

11. Faramarzi, M. A., Mogharabi-Manzari, M., & Brandl, H. (2020). Bioleaching of metals from wastes and low-grade sources by HCN-forming microorganisms. *Hydrometallurgy*, 191, 105228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105228>
12. Abdrakhimov, V. Z. (2021). Environmental management, economic and practical aspects of the use of waste from the fuel and energy complex in the production of thermal insulation materials. *Economy, Governance and Lave Basis*, 1, 11–16. https://doi.org/10.51608/23058641_2021_1_11
13. Bourgeois, D., Lacanau, V., Mastretta, R., Contino-Pépin, C., & Meyer, D. (2020). A simple process for the recovery of palladium from wastes of printed circuit boards. *Hydrometallurgy*, 191, 105241. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105241>
14. Kosenko, A., Khomenko, O., Kononenko, M., Polyanska, A., Buketov, V., Dychkovskiy, R., Polański, J., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2025). Sustainable management of iron ore extraction processes using methods of borehole hydro technology. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 16(1), 92–112. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2025.145592>
15. Dychkovskiy, R., Sala, D., Pyzalski, M., Miroshnykov, I., Sujak, A., Durczak, K., Kotsan, I., & Pererva, A. (2026). Management of Chemical Synthesis Processes of Potassium Humate during Coal Beneficiation Waste Processing. *Sustainability – article in press*.
16. Beshley, S., Baranov, V., & Shpak, Y. (2021). Вплив кам'яновугільного попелу та гумату калію на вміст нітрогену і карбону в субстраті відвалу вуглепромисловості й органах. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*, (85), 45–52.
17. Fayzullaev, N.I. (2020). Kinetics and Mechanisms of Oxycondensation Reaction in Methane Molybden-Marganets- Zirconium Catalysis. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24(4), 7935–7947. <https://doi.org/10.37200/ijpr/v24i4/pr2020743>
18. Voloshchyshyn, A.I., Bosak, P.V., Popovych, V.V., Menshykova, O.V., & Kopystynskiy, Y.O. (2024). Natural phytomelioration of coal mine waste heaps in the context of increased radiation background (on the case of Nadiya mine, Lviv-Volyn coal basin, Ukraine). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012130>
19. Miroshnykov, I., Cichoń, D., Shyrin, L., Dybrin, S., & Dychkovskiy, R. (2025). Ensuring the environmental sustainability of molybdenum ore mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1457(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012014>
20. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
21. Wilhelm, E. (2021). Gibbs Energy and Helmholtz Energy: Introduction, Concepts and Selected Applications. *Gibbs Energy and Helmholtz Energy*, 1–120. <https://doi.org/10.1039/9781839164095-00001>
22. Faraoni, V. (2004). An alternative approach to the heat equation. *Heat and Mass Transfer*, 41(1), 32–36. <https://doi.org/10.1007/s00231-004-0517-5>
23. Pavlychenko, A., Sala, D., Pyzalski, M., Dybrin, S., Antoniuk, O., & Dychkovskiy, R. (2025). Utilizing Fuel and Energy Sector Waste as Thermal Insulation Materials for Technical Buildings. *Energies*, 18(9), 2339. <https://doi.org/10.3390/en18092339>

ABSTRACT

Purpose. Scientific substantiation and development of hydrometallurgical approaches for the recovery of molybdenum and other critical raw materials from technogenic deposits of coal beneficiation waste, aimed at increasing their resource value, reducing environmental impact, and creating prerequisites for integrated processing.

Methods. The study is based on a sequential and integrated preparation of coal beneficiation waste samples using analytical and experimental methods. An analytical framework for hydrometallurgical technology for the recovery of molybdenum and associated critical elements was developed,

involving variation in reagent type and concentration, temperature, process duration, and solid-to-liquid ratio. Process efficiency was evaluated based on recovery and selectivity indicators of target components.

Results. It was established that the application of the developed hydrometallurgical technology ensures efficient recovery of molybdenum and associated critical elements from technogenic waste. The influence of key process parameters on recovery and selectivity indicators was determined, enabling substantiation of optimal processing conditions and enhancement of the resource value of the waste.

Originality. Lies in the development of an integrated approach to the hydrometallurgical recovery of molybdenum and associated critical elements from coal beneficiation waste of technogenic deposits, combining stepwise sample preparation with variation of key process parameters. Relationships between these factors and the recovery and selectivity of target components were established, enabling the determination of optimal processing parameters and enhancement of the resource value of the waste.

Practical implication. Lies in the creation of a scientifically substantiated methodology for hydrometallurgical processing of coal preparation waste from technogenic deposits in Western Ukraine for efficient recovery of molybdenum and other critical elements. The proposed approaches enhance the resource value of technogenic deposits, reduce waste volumes and environmental impact, and provide a basis for implementing industrial technologies for comprehensive waste processing and forming closed-loop resource utilization in the coal industry.

Keywords: *coal preparation waste, technogenic deposits, critical raw materials, molybdenum, hydrometallurgy, resource efficiency.*

дата першого надходження статті до видання	03.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	04.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025