

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**Мірошников Іван Олександрович**

УДК 622.27:622.002.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСНОГО  
ВИДОБУВАННЯ МОЛІБДЕНУ ІЗ ПРИРОДНИХ ТА ТЕХНОГЕННИХ  
РОДОВИЩ**

184 – «Гірництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Іван Олександрович Мірошников

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Дичковський Роман Омелянович, д.т.н, професор

Дніпро – 2026

## ЗМІСТ

<b>АНОТАЦІЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>11</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>14</b>
<b>РОЗДІЛ 1 НАЯВНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОЇ РОЗРОБКИ МОЛІБДЕНОВИХ РОДОВИЩ УКРАЇНИ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>23</b>
1.1 Сучасний стан розвитку технологій видобування молібденових руд в Україні у контексті загальносвітових тенденцій розвитку .....	23
1.2 ПРАКТИКА ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ РОДОВИЩ МОЛІБДЕНОВИХ РУД ЗА ПОХОДЖЕННЯМ .....	37
1.3 Методи геомеханічної оцінки масиву порід при розробці природних та техногенних родовищ молібденових руд.....	42
1.4 Методи геомеханічної оцінки масиву порід при розробці природних та техногенних родовищ молібденових руд .....	42
1.5 Загальна методологія проведення досліджень.....	45
1.6 Висновки. Мета, ідея, методи та основні задачі досліджень .....	50
<b>РОЗДІЛ 2 ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ МОЛІБДЕНОВИХ РУД. ВИБІР МЕТОДІВ І РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>54</b>
2.1. Формування моделі технології комплексного відпрацювання молібденових руд природного та техногенного походження.....	54
2.2. Формування принципів аналогічності на основі існуючих техніко-технологічних рішень відпрацювання молібденових родовищ.....	<b>ОШИБКА!</b>
	<b>ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>
2.3. Наукова основа гідрометалургійного вилучення молібдену при розробці природних та техногенних родовищ .....	60
2.4. Термічний та термодинамічний аналіз при вилучення молібдену .....	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>

2.5 МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЛАБОРАТОРНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ  
МОЛІБДЕНОВИХ РУД..... **ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

2.6. ГЕОМЕХАНІЧНА ОСНОВА РОЗРОБКИ ПРИРОДНИХ РОДОВИЩ МОЛІБДЕНОВИХ  
РУД ..... 70

2.6 ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ..... 75

**РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИДАТНОСТІ ПРИРОДНИХ І  
ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ ДО КОМПЛЕКСНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ  
МОЛІБДЕНОВИХ РУД ..... 77**

3.1. СИСТЕМА ВІДБОРУ ПРОБ ДЛЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ 777

3.2. КОНТРОЛЬОВАНІ ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ТЕХНОГЕННИХ ТА ПРИРОДНИХ  
МАТЕРІАЛАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МОЛІБДЕНУ У ПОРОДНИХ МАСИВАХ ... 88

3.3. ФОРМУВАННЯ ПРИНЦИПІВ АНАЛОГІЧНОСТІ ПРИ РОЗРОБЦІ МОЛІБДЕНОВИХ  
МАСИВІВ..... **ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

3.4. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ ..... 112

**РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ТЕХНОЛОГІЙ ВИДОБУВАННЯ МОЛІБДЕНОВИХ РУД В УКРАЇНІ ..... 114**

4.1. ФАКТОРИ, ЩО ОБМЕЖУЮТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНОГО ВИЛУГОВУВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ І ПРИРОДНИХ МОЛІБДЕНОВИХ  
РУД ..... 114

4.2. ТЕХНОЛОГІЯ ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУВАННЯ МОЛІБДЕНОВИХ РУД НА ПРИКЛАДІ  
ВЕРБІНСЬКОГО РУДОПРОЯВУ ..... **ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

4.3. ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНОГО  
ВИЛУГОВУВАННЯ МОЛІБДЕНУ ІЗ ТЕХНОГЕННИХ ТА ПРИРОДНИХ РОДОВИЩ..... **ПОМИЛКА!  
ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

4.4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
РІШЕНЬ ..... **ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

4.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ..... 138

**ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ ..... 140**

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 143**

**ДОДАТОК А. ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ  
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ.....ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

**ДОДАТОК Б. БАЗИ ДАНИХ, РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНИХ  
ОБЧИСЛЕНЬ, ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАДНАННЯ... ОШИБКА!  
ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.**

## АНОТАЦІЯ

*Мірошников Іван.* Обґрунтування технологічних параметрів комплексного видобування молібдену із природних та техногенних родовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 «Гірництво», – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, що полягає в обґрунтуванні параметрів технологічних схем комплексної розробки молібденових родовищ України з урахуванням особливостей як природних, так і техногенних родовищ сировини. Дослідження спрямоване на створення ефективних методів вилучення та переробки молібденовмісних руд і відходів, оптимізацію технологічних процесів із мінімізацією втрат цінних компонентів та негативного впливу на довкілля. Розроблені підходи передбачають інтеграцію сучасних гірничих, збагачувальних і екологічно безпечних технологій, що дозволяє забезпечити раціональне використання ресурсів та підвищити економічну ефективність промислового освоєння родовищ різного типу.

Для вирішення поставлених у роботі завдань виконано аналіз гірничотехнічної та гірничогеологічної ситуації щодо розробки молібденових родовищ України. У процесі дослідження визначено ключові напрями оптимізації гірничо-збагачувальних процесів, спрямовані на підвищення ефективності видобутку та переробки як природних, так і техногенних родовищ. Отримані результати створюють передумови для впровадження інноваційних рішень, зокрема інтеграції цифрового моделювання, автоматизації виробничих процесів та застосування екологічно безпечних технологій, що дозволяє не лише мінімізувати втрати цінних компонентів, а й знизити техногенний вплив на довкілля. Застосування обґрунтованих параметрів технологічних схем забезпечує раціональне використання ресурсів, підвищення промислової рентабельності та

формування стратегічного підходу до комплексного освоєння молібденових родовищ у довгостроковій перспективі.

Виходячи із сучасного стану поводження з молібденовими рудами природного походження та відходами, що накопичилися у відвалах після гірничодобувної діяльності, розроблено технологічні рішення щодо комплексної розробки молібденових руд з урахуванням гірничо-геологічних умов, складу та хімічних зв'язків Мо з іншими хімічними елементами. Застосовані інноваційні рішення дають можливість не лише забезпечити економічну ефективність шляхом отримання цінних молібденових концентратів, а й зменшити трудомісткість робіт, підвищити безпеку праці шахтарів, а також вирішити екологічні та соціальні питання на економічно доцільному рівні з одночасним прискоренням роботи зміни.

Для проведення лабораторних досліджень та обчислювального експерименту здійснено відбір проб і визначення складу молібденовмісних матеріалів за допомогою електронного мікроскопа ПЕУ-У. Одночасно було застосовано методи формування нейронних мереж та принципи машинного навчання для аналізу хімічного складу та виявлення пріоритетних елементів у процесах розвідки, розкриття, підготовки та розробки молібденовмісних руд. Отримані результати дозволяють підвищити точність прогнозування і планування технологічних схем, а також оптимізувати ефективність використання ресурсів та зменшити втрати цінних компонентів.

Дослідження показали, що у природних родовищах спостерігається стабільне співвідношення молібдену та сірки (приблизно 60 % до 40 %) у молібденітах з родовищ, рудопроявів та проявів мінералізації Українського щита. Це свідчить про генетичну спорідненість елементів та їхню взаємозалежність у процесах мінералоутворення. Встановлено коефіцієнт аналогічності, який визначає відповідність для системи розкриття, підготовки та розробки родовищ. Він розраховується на основі багатокomпонентних баз даних технологічних впроваджень підприємств, що уже ведуть видобуток молібденових руд.

Вміст молібденових сполук у техногенних родовищах після вуглезбагачення залежить квадратично від рівня намагніченості вуглевідходів та корелює з концентрацією заліза і емпіричними коефіцієнтами, що враховують просторову вибірку проб і ступінь термічної обробки сировини. Це дає можливість вибирати технологічну схему, яка дозволяє виділяти молібден разом з іншими корисними компонентами ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mn}$ , рідкоземельні елементи, рідкоземельні метали тощо) без попередньої агломерації чи високотемпературного випалу.

Розроблено технологічні рішення для комплексного освоєння молібденових родовищ України з урахуванням геолого-промислових особливостей і можливості видобутку супутніх корисних копалин. Запропоновано класифікацію родовищ за формою залягання та промисловою придатністю, що підвищує ефективність геолого-економічної оцінки на ранніх стадіях проєктування. Індивідуалізовані технологічні схеми розробки враховують комплексність видобутку супутніх копалин і гірничо-геологічні умови залягання, що сприяє максимальному вилученню цінних компонентів та підвищенню ресурсної ефективності виробництва.

Таким чином, дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей розподілу складу молібденових сполук вирішено актуальне науково-технічне завдання – обґрунтування раціональних параметрів розробки молібденових руд із природних та техногенних родовищ. Отримані результати дозволяють розробити рекомендації щодо визначення параметрів гідрометалургійного методу вилучення молібдену в умовах переробки відходів гірничодобувної діяльності ПрАТ «Львівська вугільна компанія», а також при розробці Вербинського молібденового рудопрояву (що входить до складу Устинівського прогнозованого рудного поля).

Ключові слова: молібденові руди, техногенні та природні родовища, гідрометалургія, відходи вуглезбагачення, магнітні властивості, нейронні мережі, комплексне освоєння, ресурсна ефективність.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

*Статті у наукових фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:*

1. **Miroshnykov, I.** (2023). Current application directions for the weathering rind of molybdenum deposits of Ukraine. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 75, 18–28. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.018>

*Здобувачем встановлено наявність ознак перспективного ресурсу молибдену в забруднених молибденом ґрунтах з кір вивітрювання родовищ України.*

2. **Miroshnykov, I.** (2025). Justification of the mining operations on the Verbynske molybdenum ore occurrence with the purpose of production of mineral raw materials of temporary conditions. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 81, 50–63. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/81.050>

*Здобувач обґрунтував міркування щодо встановлення тимчасових кондицій мінеральної сировини для Вербинського молибденового рудопрояву.*

3. Dychkovskiy, R., **Miroshnykov, I.**, & Pererva, A. (2025). Synthesis of potassium humate as an eco-friendly method for coal-preparation waste utilization. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 82, 274–287. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.274>

*Здобувач запропонував технологічні рішення щодо зменшення витрат на поводження з техногенними відходами вуглезбагачення.*

4. Dychkovskiy, R., **Miroshnykov, I.**, & Pererva, A. (2025). Hydrometallurgical recovery of molybdenum and critical raw materials from technogenic deposits of coal preparation waste. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 83, 7–21. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.007>

*Здобувач запропонував технологічні рішення щодо зменшення витрат на поводження з техногенними відходами вуглезбагачення.*

*Статті у виданнях із у наукометричних баз даних Scopus i Web of Science:*

1. **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, Volume 1457(1), 012014.*  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012014>

*Здобувачем виконано дослідження з планування екологічних ризиків, що настають внаслідок вилучання молібденової складової без урахування інших товарних складових.*

2. Zberovskyi, V., Vlasenko, V., Bubnova, O., Ahaiev, R., **Miroshnykov, I.**, & Jamiński, M. (2026). Management of Technical and Economic Factors in the Concept of Recovery, Production, and Processing of Hydrocarbons. *Inżynieria Mineralna*, 4(2), 249-261. <https://doi.org/10.29227/im-2025-02-04-029>

*Здобувач виконав попередню обробку даних, забезпечив графічний супровід та узагальнив кінцеві результати.*

#### *Патенти*

1. **Мірошников І.О.**, Дичковський Р.О., Перерва А.Ю. Спосіб одержання розчину гумату калію: пат. 148329 Україна: МПК E21C 41/32. C05F 11/02.

*Здобувач розробив схему вилучання цільової речовини.*

#### *Матеріали наукових конференцій:*

1. **Мірошников І.О.**, Потіп М.М. (2024). Правові проблеми видобутку молібдену в Україні. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2024. Дніпро, 27-29 березня 2024 року. С. 359-361.

Посилання: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/55414f75-8777-44ca-a66d-0e7333f3b358/content>

*Здобувачем виконано дослідження сприятливих норм законодавства країн, які видобувають молібден.*

2. Dychkovskyi, R., **Miroshnykov, I.**, Dybrin, S., & Pererva A. (2025). Prospects for by-product molybdenum recovery within integrated development of critical and construction materials from technogenic deposits. XVIII міжнародна науково-практична конференція Української школи гірничої інженерії. Східниця, 29 вересня-04 жовтня 2025 року. С. 47-50. <https://doi.org/10.33271/usme18.047>

*Здобувачем виконано дослідження структури матеріалу та пошук аналогів гірського масиву.*

3. **Miroshnykov, I.** (2025) Promoting Environmental Sustainability in Molybdenum Ore Mining. International Conference Physical and Chemical Geotechnologies. Dnipro-Kraków, 9(1), 091015. <https://doi.org/10.15407/pcgt.25.15>

*Здобувачем виконано усі дослідження, пов'язані із даною роботою.*

4. Pavlychenko A., Lewicka D., **Miroshnykov, I.**, & Dychkovskyi R. (2025). Hybrid Approach of Neural Networks and Analog-Based Methods for Industrial Assessment of Technogenic Deposits. DIM-ESEE Conference. 15th – 17th October 2025, Dubrovnik, Croatia. Paper No. 356. Посилання: <https://hrcak.srce.hr/omp/index.php/rgn-unizg/catalog/view/399/71/7137>

*Здобувач виконав пошук похідної інформації з адаптовності методів до техногенних родовищ.*

5. Pavlychenko A., Lewicka D., **Miroshnykov, I.**, & Dychkovskyi R. (2025). Integration of Neural Networks into AnalogBased Methods for Assessing Technogenic Deposits for Industrial Exploitation. DIM-ESEE Conference. 15th – 17th October 2025, Dubrovnik, Croatia. MR36.

Посилання: <https://dim-ese.eu/wp-content/uploads/1st-DIM-ESEE-Book-of-Abstracts.pdf>

*Здобувач виконав попередню обробку даних та спрямував маршрут даних.*

## ABSTRACT

*Miroshnikov Ivan.* – Substantiation of technological parameters for the integrated extraction of molybdenum from natural and man-made deposits. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Qualifying research paper manuscript copyright.

Thesis of the scientific degree of the Philosophy Doctor (Ph.D.) in specialty 184 «Mining of mineral deposits» – Dnipro University of Technology, Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to solving a pressing scientific and technical problem, namely the justification of parameters for technological schemes of the integrated development of molybdenum deposits in Ukraine, taking into account the specific features of both natural and technogenic mineral resources. The research is aimed at developing efficient methods for the extraction and processing of molybdenum-bearing ores and wastes, as well as optimizing technological processes to minimize the loss of valuable components and reduce negative environmental impacts. The proposed approaches involve the integration of modern mining, beneficiation, and environmentally safe technologies, which ensures the rational use of resources and increases the economic efficiency of industrial exploitation of deposits of various types.

To address the objectives set in this study, an analysis of the mining-technical and mining-geological situation regarding the development of molybdenum deposits in Ukraine was carried out. The research identified key directions for optimizing mining and beneficiation processes aimed at improving the efficiency of extraction and processing of both natural and technogenic deposits. The obtained results provide a foundation for the implementation of innovative solutions, including the integration of digital modeling, automation of production processes, and the application of environmentally safe technologies, which not only minimize the loss of valuable components but also reduce the technogenic impact on the environment. The application of justified parameters for technological schemes ensures the rational use of resources, increases industrial profitability, and establishes a strategic approach to the comprehensive development of molybdenum deposits in the long term.

Based on the current state of handling naturally occurring molybdenum ores and the waste accumulated in dumps after mining activities, technological solutions have been developed for the comprehensive development of molybdenum ores, taking into account the mining-geological conditions, composition, and chemical bonds of Mo with other chemical elements. The applied innovative solutions make it possible not only to ensure economic efficiency through the production of valuable molybdenum concentrates but also to reduce labor intensity, enhance miner safety, and address environmental and social issues at an economically viable level, while simultaneously accelerating the pace of the work shift.

For laboratory studies and computational experiments, sampling and determination of the composition of molybdenum-bearing materials were carried out using the PEU-U electron microscope. Simultaneously, methods for forming neural networks and principles of machine learning were applied to analyze the chemical composition and identify priority elements in the exploration, opening, preparation, and development of molybdenum-bearing ores. The results obtained make it possible to improve the accuracy of forecasting and planning technological schemes, as well as to optimize resource use efficiency and reduce losses of valuable components.

Studies have shown that natural deposits exhibit a stable molybdenum-to-sulfur ratio (approximately 60% to 40%) in molybdenites from deposits, ore occurrences, and manifestations of molybdenum mineralization within the Ukrainian Shield. This indicates the genetic affinity of these elements and their interdependence in mineral formation processes. A similarity coefficient has been determined, which serves as a criterion for the design, preparation, and extraction system of deposits. It is calculated based on multicomponent databases of technological implementations from enterprises already engaged in molybdenum ore mining.

The content of molybdenum compounds in technogenic deposits after coal beneficiation exhibits a quadratic dependence on the magnetization level of coal waste and correlates with iron concentration and empirical coefficients, which take into account the spatial sampling of specimens and the degree of thermal treatment of the raw material. This makes it possible to select a technological scheme that allows the recovery of

molybdenum together with other valuable components ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mn}$ , rare earth elements) without the need for prior agglomeration or high-temperature roasting.

Technological solutions have been developed for the integrated exploitation of molybdenum deposits in Ukraine, taking into account geological and industrial characteristics and the potential for extracting associated valuable minerals. A classification of deposits by occurrence form and industrial suitability is proposed, improving the efficiency of geological and economic evaluation at the early stages of project design. Individualized mining schemes are proposed that consider the comprehensive extraction of associated minerals and the mining-geological conditions of occurrence, contributing to the maximum recovery of valuable components and improving the resource efficiency of production.

Thus, the dissertation represents a completed research work in which, based on the newly established regularities of the distribution of molybdenum-bearing compounds, an important scientific and technical problem has been solved – the substantiation of rational parameters for the development of molybdenum ores from both natural and technogenic deposits. The results of the study make it possible to develop recommendations for determining the parameters of the hydrometallurgical method of molybdenum extraction under the conditions of processing mining waste at PJSC Lviv Coal Company, as well as at the Verbynske molybdenum occurrence (part of the Ustynivske prospective ore field).

Keywords: molybdenum ores, technogenic and natural deposits, hydrometallurgy, coal beneficiation waste, magnetic properties, neural networks, integrated exploitation, resource efficiency.

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Зростання глобального попиту на молібден, який широко використовується у виробництві легованих сталей, електроніці, енергетичному машинобудуванні та технологіях відновлюваної енергетики, обумовлює необхідність розробки ефективних і екологічно безпечних технологій його видобутку та переробки. Молібден є стратегічно важливим металом завдяки високій температурі плавлення, корозійній стійкості та здатності значно підвищувати міцнісні характеристики сплавів, що визначає його ключову роль у забезпеченні технологічної незалежності та розвитку промисловості. В умовах обмеженості багатих руд і зростання вимог до екологічної безпеки особливої актуальності набуває комплексне освоєння як природних, так і техногенних молібденових рудопроявів із використанням ресурсозберігаючих технологій.

Комплексне відпрацювання природних молібденових родовищ передбачає обґрунтування раціональної системи їх розробки, що забезпечує ефективне вилучення рудної маси з мінімальними втратами та збереженням геомеханічної стійкості масиву. Отримана руда транспортується на поверхню, де здійснюється її первинна переробка та доведення вмісту молібдену до промислово доцільних концентрацій. Подальша переробка концентрованої сировини здійснюється із застосуванням гідрометалургійних методів, зокрема вилуговування, що забезпечує селективне вилучення молібдену та супутніх цінних компонентів із рудної сировини.

Одночасно значний потенціал для розширення мінерально-сировинної бази становлять техногенні родовища, представлені відходами гірничодобувної та збагачувальної промисловості, хвостосховищами, відвалами та іншими накопиченими матеріалами, що містять залишкові концентрації молібдену. Використання технології гідрометалургійного вилуговування для переробки таких утворень дозволяє не лише вилучати цінні метали, але й зменшувати екологічне навантаження на навколишнє середовище, сприяючи рекультивації техногенно порушених територій і зниженню ризиків забруднення ґрунтів і водних ресурсів.

Ефективність подальшого гідрометалургійного вилуговування значною мірою визначається параметрами технологічного процесу, зокрема гранулометричним складом матеріалу, концентрацією реагентів, тривалістю контакту фаз, температурним режимом і фільтраційними властивостями середовища. Обґрунтування цих параметрів має базуватися на комплексному врахуванні геологічних, гірничотехнічних, мінералогічних і технологічних особливостей як природних руд, так і техногенних матеріалів, що дозволяє забезпечити максимальний ступінь вилучення молібдену при мінімальних витратах ресурсів.

Впровадження інтегрованого підходу, який поєднує раціональну систему розробки родовищ, попереднє збагачення та гідрометалургійне вилуговування, створює передумови для підвищення повноти використання мінеральної сировини та економічної ефективності виробництва. Такий підхід забезпечує можливість комплексного освоєння молібденових рудопроявів різного генезису, зниження втрат корисних компонентів і мінімізацію негативного впливу на довкілля, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку гірничо-металургійного комплексу.

Таким чином, обґрунтування технологічних параметрів комплексного видобування молібдену із природних та техногенних родовищ є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого спрямоване на підвищення ефективності вилучення молібдену, зміцнення мінерально-сировинної бази України в умовах зростаючого глобального попиту на стратегічні ресурси, а також забезпечення екологічно безпечного освоєння надр на засадах циркулярної економіки.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» згідно із Національним плану дії в галузі енергетики до 2030 року № 687, затвердженим Міністерством енергетики та вугільної промисловості України у 2018 році, та відповідно до Закону України «Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року». Результати дослідження відповідають основним

принципам Європейського зеленого курсу (англ. The European Green Deal - 2050), що передбачає створення Європейського континенту кліматично нейтральним до 2050 року. Автор входив до складу колективу виконавців госпдоговірної тематики №072355-24 “Обґрунтування ресурсозберігаючої гідротехнології видобування багатих залізних руд в умовах шахти “Ювілейна” ПрАТ “Суша Балка” (01.03.2024 – 31.08.2024), держбюджетних роботи Міністерства освіти і науки України ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» № держреєстрації 0123U101757 та ДТ-530 «Наукове обґрунтування та розробка геореакторних систем для комплексної переробки відходів вуглезбагачення з орієнтацією на отримання критичної сировини» (№ держреєстрації 0126U000998).

**Мета дослідження** полягає в обґрунтуванні раціональних параметрів технології видобування молібдену при комплексному відпрацюванні природних і техногенних родовищ на основі встановлених закономірностей впливу геомеханічних, гірничотехнічних, технологічних факторів, гранулометричних властивостей та термохімічних перетворень сировини.

Поставлена мета досягається шляхом реалізації наступних **наукових завдань дослідження:**

- виконати аналіз сучасного стану та існуючих технологічних рішень щодо видобування і переробки молібденових руд, а також визначити геохімічні та мінералогічні закономірності, що впливають на ефективність вилучення молібденітів Українського щита;
- сформулювати технологічну систему відпрацювання молібденових родовищ виходячи із встановленого коефіцієнта аналогічності, що формується за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту із багатокomпонентних баз даних наявних техніко-технологічних впроваджень;
- розробити способи селективного магнітного вилучення мінеральних фаз при варіюванні магнітною силою джерела для підвищення концентрації молібдену та вилучення його у поєднанні з іншими корисними компонентами;

– встановити залежності контрольованих фазових перетворень та їх інтенсивність при зовнішній термічній дії до 1500 °С з метою встановлення меж застосування гідрометалургійного видобування молібдену із масивів;

– встановити економічну доцільність запропонованих технологічних рішень залежно від генезису формування, просторового розташування тіл корисних копалин та їх промислового призначення.

*Ідея роботи* полягає у врахуванні закономірностей впливу геомеханічних, гірничотехнічних, технологічних факторів та термохімічних перетворень для молібденових родовищ при підвищенні ефективності комплексного видобування молібдену із супутнім вилученням інших корисних копалин включно із критичною сировиною.

*Об'єктом дослідження* є масив молібденомістких порід природного, техногенного походження та технологічні процеси отримання молібдену із супутнім вилученням інших корисних компонентів.

*Предмет дослідження* – закономірності зміни характеристик рудопорідного масиву при різних технологічних схемах відпрацювання молібденових руд.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що базується на аналізі та систематизації результатів світового та вітчизняного досвіду, включаючи оцінку наявних технологічних рішень, методів геолого-структурного аналізу для визначення морфологічних та механічних характеристик рудопородного масиву, математичного моделювання термохімічних, фазо-масових і фізико-механічних властивостей руд, лабораторних експериментів, цифрового відтворення даних нейронних мереж, їх використання оптимізації технологічних процесів і підвищення безпеки робіт. Комбінація зазначених методів дозволяє створити ефективні технологічні схеми видобутку молібденових руд із максимальним вилученням супутніх корисних компонентів, що сприятиме підвищенню економічної ефективності та екологічної безпеки гірничого виробництва.

### Наукова новизна отриманих результатів:

1. Коефіцієнт аналогічності ( $K_{ан}$ ), що слугує критерієм відповідності для формування системи розкриття, підготовки, розробки молібденових руд та визначається багатокомпонентною функцією за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту ( $\mathcal{NN}(\cdot)$ ) і ґрунтується на багатокомпонентних базах даних наявних техніко-технологічних впроваджень підприємств ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ), нормалізованих за ваговими показниками аналогічності ( $\varphi_i, w_i$ ), котрі уже провадять видобування молібденових руд із природних та техногенних родовищ. Це дозволяє з високим рівнем відповідності запропонувати техніко-технологічних супровід комплексного видобування молібденових руд із супутнім вилученням інших корисних копалин виходячи із наявного світового та національного досвіду роботи підприємств із аналогічними гірничо-геологічними умовами.

2. Зміна концентрації молібдену у виділених фракціях при варіюванні магнітної сили джерела визначається селективністю магнітного вилучення мінеральних фаз, з якими він асоційований: слабкі магнітні поля забезпечують вилучення переважно сильно магнітних компонентів із низьким вмістом Мо, тоді як інтенсивні поля сприяють залученню слабомагнітних і тонкодисперсних фаз, що зумовлює підвищення його концентрації та вилучення молібдену у поєднанні з іншими корисними компонентами ( $Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Mn$ , рідкоземельні метали) без потреби в попередній агломерації чи високотемпературному випалі. Реалізація такого підходу створює передумови для комплексного використання техногенних запасів із мінімальним екологічним навантаженням і зниженими витратами на підготовку сировини.

3. Концентрація молібдену ( $Mo_i$ ) у техногенних родовищах після вуглезбагачення описується квадратичною залежністю другого порядку від рівня намагніченості вуглевідходів ( $\varepsilon_{Fe}$ ), яка, у свою чергу, корелює з концентрацією заліза та емпіричними коефіцієнтами ( $a_i, b_i, c_i$ ), що враховують просторову вибірку проб і ступінь термічної обробки сировини. Даний підхід дає можливість підвищити вміст молібдену у масиві видобутих порід, що підвищує її економічну привабливість до промислового використання.

4. Результати контрольованих фазових перетворень при термічній дії до  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  показують руйнування органічної складової та окиснення сульфідних фаз із виділенням  $\text{SO}_2$  і втратою маси, тоді як за температур вище  $750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  хімічні перетворення практично завершуються й домінують фазові процеси, пов'язані з повним окисненням  $\text{MoS}_2$  та сублімацією  $\text{MoO}_3$ , в інтервалі  $1100\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  інтенсивний перехід  $\text{MoO}_3$  у газову фазу зумовлює збагачення твердого залишку тугоплавкими оксидами та спікання мінеральної матриці, а при  $1300\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  висока леткість оксиду молібдену й часткове плавлення зольної фази призводять до незворотних втрат молібдену. Встановлені межі фазових перетворень дають можливість визначити межі застосування гідрометалургійного видобування молібдену із масивів та температурний діапазон технологічно неефективного для його вилучення.

5. Оцінка інтенсивності фазо-масових перетворень найкраще описується експоненціальною залежністю, у якій зростання концентрації молібдену ( $C_{Mo}(T)$ ) визначається як добуток початкової концентрації молібдену ( $C_0$ ) на експоненту, аргумент якої формує добуток температурної константи зростання, підібраної для забезпечення найкращого збігу, та різниці між кінцевою температурою ( $T$ ) та початковою температурою ( $t_0$ ) фазових перетворень досліджуваних зразків. Це дає можливість прогнозувати зміни концентрації молібдену у породному масиві при різних режимах термічної обробки та оптимізувати умови контрольованих фазо-масових перетворень для підвищення виходу  $\text{MoO}_3$ .

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується** коректною постановкою й рішенням задач з застосуванням контрольованих експериментальних процедур, системним аналізом фазо-масових перетворень, геомеханічних процесів, використанням кількісних даних про концентрацію молібдену та їх математичною апроксимацією, проведенням експериментів на моделях, порівнянням їх із аналітично-розрахунковими методами та науковими роботами інших авторів (розбіжність не перевищує  $16\text{--}22\%$ ).

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей геомеханічних змін, контрольованих фазо-масових перетворень молібденовмісних порід, що дозволяє підвищити концентрацію  $\text{MoO}_3$ , визначити особливості окиснення  $\text{MoS}_2$  та руйнування органічної та сульфідної складових, а також створити експериментально підтверджену модель прогнозування ефективності магнітної сепарації та термічної обробки для підвищення концентрації молібдену в масиві до промислово привабливих рівнів.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Створено науково обґрунтованої основи для розробки оптимальних технологічних рішень щодо комплексного освоєння молібденових родовищ України з урахуванням геолого-промислових особливостей та можливості видобування супутніх корисних копалин.

2. Отримано критерії відповідності для формування системи розкриття, підготовки, розробки молібденових руд через встановлений коефіцієнт аналогічності, що визначається багатоконпонентною функцією за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту і ґрунтується на багатоконпонентних базах даних наявних техніко-технологічних рішень діючих підприємств.

3. Запропоновано прикладові технологічні схеми розробки родовищ молібденових руд, що враховують видобуток супутніх корисних копалин та особливості гірничо-геологічних умов залягання, що сприяє максимальному вилученню цінних компонентів і підвищенню ресурсної ефективності виробництва.

4. Встановлено зони непружних деформацій навколо гірничих виробок на різних глибинах залягання родовища для обґрунтування параметрів підповерхово-камерної системи розробки із закладанням виробленого простору.

5. Встановлено допустимі концентрації молібденових концентратів на основі їх хімічного складу та можливостей подальшого промислового застосування, забезпечуючи цільову орієнтацію процесів збагачення та реалізації продукції у відповідні сегменти ринку.

6. Отримано контрольовані фазо-масові перетворення молібденітових формацій в межах температур до 1500 °С для підвищення концентрації молібдену у видобутій сировині та розробки технологічних схем отримання кінцевого продукту.

7. Проведено економічну оцінку запропонованих техніко-технологічних рішень, котра підтверджує дієвість застосування технології видобування та вилуговування для ефективного відпрацювання молібденових родовищ природнього та техногенного походження.

**Реалізація результатів роботи.** Розробки автора впроваджені у технологічну проектну документацію, програми техніко-економічного обґрунтування перспективності розвитку гірничих підприємств, зокрема ПрАТ «Львівська вугільна компанія», що займаються освоєнням молібденових родовищ, а також у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» при викладанні лекцій, проведенні практичних занять, курсового та дипломного проектуванні для студентів за напрямом підготовки 184 «Гірництво».

**Особистий вклад автора:** формулювання мети, задач дослідження та наукових положень; розробка підходів до термохімічних та фазо-масових перетворень; обробка, узагальнення й аналіз отриманих результатів; обґрунтування параметрів технологій видобування молібдену із природніх та техногенних родовищ; впровадження технічних рішень у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях, форумах і семінарах: DIM-ESEE Conference 2025: Development and Innovations in Mineral resourcing (Розвиток та інновації в мінерально-сировинній галузі), 15 – 17 жовтня 2025, Дубровник, Хорватія; 9-та міжнародна науково-практична конференція: PCG – Energy Production, Conservation, and Efficiency (PCG – Виробництво, збереження та ефективність енергії, PCG-EPCE-2025), Краків–Дніпро, 2–4 квітня 2025 р.; XVIII міжнародної науково-практична конференція Українська школа гірничої інженерії «Комплексний видобуток мінеральної сировини при впровадженні інноваційних

технологій переробки відходів у контексті сталого розвитку та ESG-стратегії», Східниця, 29 вересня - 04 жовтня 2025 р., а також науково-методичних семінарах кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 12 наукових праці, у тому числі 4 статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України, 2 статті у виданнях, що індексуються наукометричною базою даних Scopus, 5 публікацій у матеріалах закордонних і всеукраїнських конференцій та патент на корисну модель.

**Особистий вклад у надруковані у співавторстві наукові праці:** [2, 57, 60, 62, 112, 113] – проведення досліджень, узагальнення результатів та формування висновків [2, 57, 60, 112, 113, 118, 119, 124, 125] – аналіз літературних джерел, опрацювання та систематизація даних з визначення характеристик молібденових родовищ; [57, 60, 112, 113, 118, 119, 124] – участь у виконанні досліджень, обробка та систематизація отриманих результатів, [127] – формування ідеї роботи, оформлення супровідних документів.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку літературних джерел (130 джерел) та 14 додатків. Робота містить 142 сторінок основного тексту, 20 рисунків і 7 таблиць, загальний обсяг – 188 сторінок.

**Автор висловлює слова щирої вдячності** науковому керівнику, Заслуженому діячу освіти України, доктору технічних наук, професору Дичковському Роману Омеляновичу за наукові консультації, допомогу в організації та проведенні досліджень, співпрацю й усесторонню підтримку.

# РОЗДІЛ 1 НАЯВНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ КОМПЛЕКСНОЇ РОЗРОБКИ МОЛІБДЕНОВИХ РОДОВИЩ УКРАЇНИ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Сучасний стан розвитку технологій видобування молібденових руд в Україні у контексті загальносвітових тенденцій розвитку

### 1.1.1 Динаміка попиту і трансформація технологій видобутку молібдену у глобальному контексті

Зростаючий світовий попит на молібден, особливо в таких галузях, як виробництво сталі, електроніка та відновлювана енергетика, підкреслює необхідність розвитку сталих практик видобутку [1]. Молібден є критично важливим мінералом завдяки своїм унікальним властивостям: високій температурі плавлення, стійкості до корозії та здатності підвищувати міцність сплавів з іншими металами [2]. Зі зростанням попиту зростає і потреба в сталому підході до видобутку, що забезпечить постачання цього цінного ресурсу без шкоди для навколишнього середовища [1-3].

У сучасності металевий молібден має обмежене використання, на нього приходить приблизно 5% світового видобутку. Близько 80% світового видобутку молібдену застосовується в якості легуючої добавки в сталь. Майже весь молібден (98%) видобувають з одного мінералу – молібденіту [4].

Приблизно 30% виробництва молібденової продукції перепадає на рециклінг, тобто використання молібденовмісного металобрухту з обладнання, термін корисного використання якого скінчився. Молібден не вилучають з металобрухту з відсутності економічної доцільності. Такий брухт використовують як скрап. Молібденовмісний брухт вважається більш економічно цінним джерелом молібдену ніж молібденові руди [5].

На рис.1.1 наведено динаміку зміни видобутку молібдену протягом останніх 14 років, починаючи з 2010 р [6, 7].

Світове виробництво молібденової товарної продукції гірничими підприємствами (mine production), тис. метричних тонн металевого молібдену

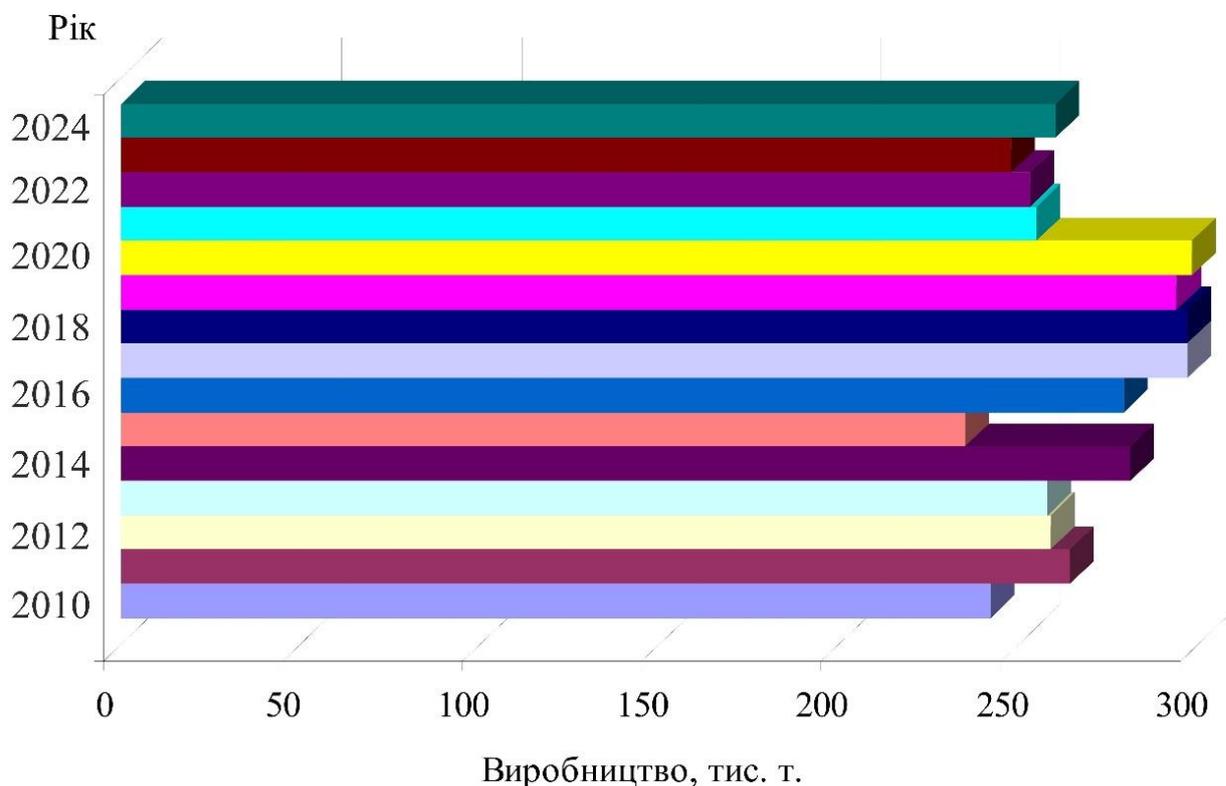


Рисунок 1.1 – Світове виробництво молібденітового концентрату у період з 2010 р. по 2024 р.

Промисловий видобуток молібдену вперше в світі було розпочато в Норвегії в 1885 р. Майже за півтора століття потужність гірничих підприємств з видобутку молібдену зросла до мільйонів тонн руди на місяць. Збільшення обсягів видобутку одиничної потужності підприємств відбувалося відповідно до зростання попиту на молібденову сировину з боку промисловості [6, 8, 9].

Сплески у розробці молібденових родовищ були тісно пов'язані з хвилями зростання попиту з боку машинобудівних підприємств [8, 10]. Стабільно високий попит на молібден відбувався під час воєних конфліктів глобального значення. Натомість різке зниження попиту в після воєнні часи призводило до скорочення або повного припинення розробки родовищ та зростання переробки молібденовмісного військового брухту [5, 10].

Водночас, видобуток молібдену демонструє зростання й у мирний період. Перший значний мирний сплеск видобутку зафіксовано у 1922–1924 рр. на тлі глобальної електрифікації, що викликала потребу в електричному освітленні (поява ламп розжарювання). Подальше використання молібдену в мирних цілях стабільно зростає [11, 12].

Молібденові концентрати демонструють тенденцію до сталого здешевлення. Сто років тому молібден видобувався виключно на спеціалізованих молібденових родовищах. Видобуток супутніх корисних копалин (міді, золота, свинцю, вольфраму тощо) практично не проводився. Існували лише окремі експериментальні, часто малорезультативні спроби [13].

Виходячи із історичних аспектів розробки молібденових руд варто зазначити, що на початку ХХ століття відзначено незначні обсяги видобутку молібдену як супутнього корисного компонента на свинцевих родовищах. У 1930-х роках стався прорив у технології флотаційного збагачення мідних руд, що спричинив значне здешевлення міді та молібдену. У 1933 році мексиканська компанія Greene Cananea Copper Co., дочірня структура Anaconda Co., вперше почала відновлення молібденіту як супутнього корисного компонента мідного виробництва. Через три роки компанія Kennecott Corp. Таку схему з руд кар'єру Bingham (штат Юта, США). Відтоді нові схеми збагачення молібденіту впроваджено на багатьох міднозбагачувальних підприємствах США, Чилі та Канади [14, 15].

Здешевлення молібдену призвело до скорочення кількості підземних розробок і рудників загалом, завдяки зростанню промислових запасів на діючих підприємствах. Наразі понад 90% світового видобутку молібдену забезпечують мідні родовища (у термінології США – by-product), де мідь міститься у первинній сульфідній руді. До таких родовищ належать підприємства Чилі, США, Мексики, Перу, Канади, а також Монголії, Вірменії, Росії, Казахстану, Узбекистану [13].

Близько 10% молібдену видобувається на вольфрам-молібденових (Китай), золото-молібденових (Австралія) та уран-молібденових родовищах. Однак, родовища типу by-product за своїми запасами залишатимуться надійними постачальниками молібдену і в майбутньому [14].

Способи вилуговування молібдену з руди не набули широкого розповсюдження через їх економічну нерентабельність. У світі не існує жодного рудника, де молібден вилуговують у промислових масштабах, окрім окремих експериментальних спроб [16]. На деяких мідних родовищах, де молібден видобувається як побічний продукт, здійснюється вилуговування, однак воно застосовується лише до окиснених сортів мідної руди й не стосується молібдену.

Ширше застосування має вилуговування не з руди, а з продуктів випалу молібденітового концентрату, що класифікується як хімічне виробництво. Із збагачувальної фабрики концентрат надходить на хімічний завод. Наприклад, у 1 тонні флотаційного концентрату може міститися до 580 кг молібдену (в перерахунку на метал), 0,2 кг ренію, кілька кілограмів вольфраму та міді, а також значна кількість сірки [17].

Прикладом сучасного рудника підземного видобутку з застосуванням системи блокового самообвалення є рудник Henderson, США. Проектна потужність 32000 т руди на добу. В 2022 р. видобуток в молібдені становив 5443 т. До парку обладнання входить 15 дев'яти тонних вантажно-доставочних машин та 7 самоскидів вантажопідйомністю 73 т. Конвеєри до збагачувальної фабрики мають загальну протяжність 24 км, з яких 16 км знаходяться в тунелі під Американським континентальним водорозділом [16, 18].

На тлі зростаючого глобального попиту на молібден як критично важливий мінерал для металургії, енергетики та високотехнологічних галузей, відбувається стійке розширення масштабів його видобутку та переробки. Історичні та сучасні тенденції свідчать, що обсяги видобутку тісно пов'язані з хвилями індустріального попиту, зокрема в періоди електрифікації чи інтенсифікації машинобудування. Поява ефективних технологій флотаційного збагачення у XX столітті зумовила масовий перехід до сумісної переробки руд та здешевлення молібдену, що сприяло згортанню підземного видобутку [19]. Альтернативні способи вилучення, вилуговування з руд, не набули промислового поширення через низьку рентабельність, тоді як вилуговування продуктів випалу концентрату розвивається як складова хімічної переробки [20, 21]. Отже, доцільним є вивчення досвіду

передових країн, що наразі лідирують у розробці молібденових родовищ, оскільки в Україні такий досвід існує здебільшого на рівні науково-технічних напрацювань.

### **1.1.2. Передова світова практика видобування молібдену як основного та побічного продукту**

У наш час понад 90 % молібдену добувається як побічний продукт під час розробки мідних сульфідних родовищ у країнах-лідерах – Чилі, США, Перу та Китаї. Такий підхід дозволяє суттєво знизити собівартість видобутку молібдену завдяки спільному освоєнню поліметалічної сировини [22]. Вилучення молібдену здійснюється на етапі флотаційного збагачення, де застосовуються спеціалізовані реагенти для селективного відокремлення молібденіту від мідних мінералів [20]. Ефективність цього підходу підтверджується стабільним зростанням обсягів виробництва молібдену без необхідності відкривати окремі вузькопрофільні родовища.

Світовим лідером у видобутку молібдену є Китай, який у 2023 році забезпечив понад 110 тис. тонн цього металу, що становить майже половину світового обсягу. Провідними експортерами виступають корпорації China Molybdenum Co., Ltd (СМОС) та Jinduicheng Molybdenum Group, які володіють потужними виробничими кластерами [23]. Особливістю китайської моделі є концентрація всіх етапів виробництва в межах єдиного технологічного комплексу, що дозволяє досягти високої ефективності виробничого циклу [24]. Ці компанії інтегрують геологорозвідувальні, видобувні, збагачувальні, металургійні та логістичні процеси в рамках єдиної корпоративної системи управління. Такий підхід дає змогу не лише знижувати собівартість продукції, а й оперативно адаптуватися до змін ринку завдяки цифровим рішенням у моніторингу та прогнозуванні обсягів виробництва [25].

Китай також є лідером у впровадженні сучасних екологічно орієнтованих технологій у сфері видобутку та переробки молібденових руд. Наприклад, на підприємствах СМОС застосовуються замкнені цикли водопостачання, системи

вторинної утилізації відходів, а також системи моніторингу впливу на довкілля в режимі реального часу. Особливу увагу приділяють розширенню переробки супутніх елементів, таких як реній, вольфрам, сірка, що містяться у молібденіті. Це сприяє підвищенню комплексності використання сировини та зменшенню навантаження на екосистему. Таким чином, китайський досвід демонструє, як за умов високої концентрації виробництва можна поєднати масштабність видобутку з принципами сталого розвитку та цифрової трансформації гірничодобувного сектору [22-25].

Другим і третім за обсягами світового виробництва молібдену є Перу та Чилі — країни, де молібден здебільшого добувається як побічний продукт під час розробки мідних порфірових родовищ. У Перу основним джерелом є гірничозбагачувальний комплекс Cerro Verde, де завдяки високим масштабам видобутку міді створюються сприятливі умови для економічно доцільного вилучення молібдену [26]. Видобування та збагачення порфірових руд здійснюється з використанням сучасних схем флотації, що дозволяють розділяти мідні та молібденові мінерали із високим рівнем селективності [27]. Це, у свою чергу, сприяє не лише зростанню коефіцієнта вилучення цінних компонентів, а й зменшенню втрат у хвостах, що важливо з точки зору сталого використання ресурсів.

У Чилі, яка традиційно є провідним гравцем на світовому ринку міді, молібденова галузь тісно пов'язана з родовищами Collahuasi, Los Pelambres, Sierra Gorda та ін. Саме тут активно застосовуються технології сумісної флотаційної переробки, що забезпечують ефективне розділення мідних і молібденових концентратів за рахунок багатоетапної очистки, тонкого регулювання рН пульпи, а також застосування органічних модифікаторів та флокулянтів [28]. Ці підприємства орієнтуються на глибоку переробку сировини з одночасним вилученням інших супутніх компонентів – золота, срібла, ренію. Важливо, що чилійські гірничі компанії впроваджують технології зменшення водного сліду, переробки хвостів і рекультивації відвалів, що дозволяє поєднувати високу продуктивність із вимогами екологічної безпеки [26, 28].

У США молібден видобувається переважно як основний корисний компонент, що відрізняє американський підхід від практики більшості країн, де молібден вилучається як побічний продукт мідного виробництва. Найбільш відомими є родовища Climax та Henderson у штаті Колорадо, які належать корпорації Freeport-McMoRan [22]. Ці родовища містять високоякісні запаси молібденіту з високим вмістом металу, що дозволяє забезпечити економічно ефективний підземний видобуток.

Збагачення молібденової руди в США базується на високоточних багатоетапних флотаційних системах, що дозволяють досягти високої селективності вилучення навіть за складної мінералогії. Автоматизовані системи моніторингу якості концентратів, впровадження енергоефективних установок, а також рециркуляційні водні схеми значно підвищують технологічну й екологічну ефективність виробництва [29]. Крім того, американські підприємства активно впроваджують цифрові платформи для планування та прогнозування виробничих циклів, а також використовують штучний інтелект для оптимізації витрат реагентів та споживання енергії. У 2023 році США виробили близько 33 тис. тонн молібдену, зберігаючи стабільну позицію у глобальному рейтингу виробників і посівши четверте місце у світі [22, 29].

Суттєвими трендами у світовій практиці є впровадження екологічно сталих підходів. Наприклад, компанія Molymet (Чилі, Мексика) активно застосовує технології з низьким вуглецевим слідом, зокрема атомізацію плазмою, використання енергії вітру та замкнені цикли водокористування. Завдяки таким ініціативам Molymet потрапила до 5 % найекологічніших компаній гірничодобувної галузі за рейтингом EcoVadis [29]. Загальні відомості щодо показників виробництва молібдену провідними країнами-виробниками та особливості технологій його видобутку наведено у табл. 1.1. Представлені дані відображають обсяги видобутку, частку окремих країн у світовому виробництві, а також основні технологічні підходи до освоєння молібденових родовищ. Їх аналіз дозволяє встановити сучасні тенденції розвитку галузі та визначити найбільш ефективні технологічні рішення, що можуть бути адаптовані до умов досліджуваних родовищ.

Світові лідери з видобутку молібдену: обсяги виробництва та технологічні характеристики [22, 23, 25, 28 - 30]

№ п/п	Країна / Компанія	Виробництво, т	Особливості технології
1	Китай / СМОС, Jinduicheng	~110 000	Повна інтеграція, цифровий контроль
2	Перу / Cerro Verde	~41 000	Побічне виймання при збагаченні мідної руди
3	Чилі / Collahuasi, Sierra Gorda	~38 000 ~3 000	Спільна переробка у системі «мідь - молібден»
4	США / Freeport-McMoRan	~33 000	Блокова із самообваленням (підземний спосіб)
5	Мексика, Вірменія, Казахстан	~ 5 – 17 000	Переважно вторинна селективна флотація

Загалом, сучасна світова практика видобутку молібдену базується на трьох ключових підходах: вертикальній інтеграції, вилученні молібдену як побічного продукту мідного виробництва та впровадженні технологій сталого розвитку. Провідні гравці прагнуть підвищити продуктивність та ефективність виробництва шляхом цифровізації, модернізації переробки та оптимізації енергоспоживання. Ці фактори визначають конкурентоспроможність країн-лідерів у галузі [22, 23, 30]. Саме на цьому міжнародному досвіді доцільно орієнтуватися під час формування сучасних технологій розробки молібденових руд в Україні [31]. Дієвим механізмом перенесення наявних техніко-технологічних рішень є встановлення аналогічності вихідних даних, у першу чергу, гірничо-геологічних умов залягання молібденових руд. Практика країн-лідерів демонструє ефективність поєднання високопродуктивних технологічних рішень із принципами сталого розвитку та цифрової трансформації. Врахування таких підходів дозволить адаптувати видобуток до сучасних економічних і екологічних викликів, підвищивши конкурентоспроможність вітчизняної гірничої галузі.

### 1.1.3 Інноваційні та екологічні підходи до розробки молібденових родовищ в Україні

Видобуток молібдену в Україні має стратегічне значення для промислового зростання та технологічного розвитку країни, особливо з огляду на зростаючі потреби світової економіки в цьому критичному мінералі [32]. Водночас, видобуток молібденової руди супроводжується екологічними викликами, зокрема забрудненням води та ґрунту і енергоємними процесами [33]. Оскільки Україна адаптує свої політики до міжнародних стандартів сталого розвитку, екологічно безпечні методи видобутку є важливими для досягнення як національних, так і глобальних екологічних цілей [34]. Запровадження сталих методів у видобутку молібдену не лише сприяє зменшенню екологічного сліду, а й підвищує конкурентоспроможність України, відповідає екологічним вимогам Європейського Союзу, і сприяє довгостроковій стійкості та ефективному використанню ресурсів у галузі.

Станом на сьогодні молібден у нашій країні вважається стратегічно важливим хімічним елементом, що фактично його прирівнює до критичних мінералів. Його першочергове значення має вкрай важливе значення для розвитку металургії, електроніки, оборонної та енергетичної галузей. У час російської агресії він набуває особливого значення із-за широкого використання у воєнно-промисловому комплексі [35, 36]. У світі активно розвиваються новітні технології видобутку та збагачення молібденових руд, що спрямовані на зменшення енергоспоживання, підвищення екологічної безпеки та ефективності використання ресурсів [37, 38]. В Україні також спостерігається відновлення інтересу до родовищ молібдену в контексті ресурсної незалежності та переходу до стійких методів гірничої діяльності [39].

Ситуація з розробкою родовищ молібдену в Україні історично пов'язана з розвідками ще з XIX століття, коли молібденіт було виявлено поблизу річки Буг на Вінниччині [40]. Найбільші промислові перспективи мають Західноукраїнська та Подільська зони, хоча значна частина родовищ залишаються недостатньо

освоєними через технічну відсталість, високі капітальні витрати та екологічні ризики [41, 42].

У зв'язку з інтеграцією України в європейський простір та гармонізацією законодавства із стандартами ЄС, все більше уваги приділяється питанням сталого розвитку у видобувній галузі [43]. Це стимулює впровадження систем екологічного моніторингу, оцінки впливу на довкілля (ОВД), а також розробку проєктів рекультивації територій, зокрема із використанням методів фіторемедіації [44, 45].

Українські наукові установи проводять дослідження щодо можливостей термохімічних перетворень при утилізації хвостів збагачення молібденових руд, зокрема з метою вилучення супутніх металів (наприклад, міді або ренію), що відповідає міжнародним підходам до мінімізації відходів і максимального використання ресурсної бази [46-48]. Сучасні патенти з цієї галузі передбачають стабілізацію токсичних елементів у хвостах шляхом використання в'язучих матеріалів і полімерних оболонок [49].

На тлі глобального потепління та енергетичної трансформації все більшої актуальності набуває використання відновлюваних джерел енергії у гірничих процесах [50, 51]. У світі зростає кількість проєктів, де видобування молібдену здійснюється із використанням сонячної енергії або електромобільного транспорту [52, 53]. В Україні ці тенденції лише починають впроваджуватись, однак інтерес до модернізації за "зеленими" стандартами зростає, особливо серед підприємств, орієнтованих на експорт продукції до ЄС [54].

Сучасні цифрові технології також мають значний вплив на галузь. Використання геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі, автоматизованих систем управління технологічними процесами та сенсорних систем моніторингу дозволяє підвищити ефективність та прозорість діяльності підприємств [55]. Деякі українські гірничі підприємства вже впроваджують елементи таких систем у межах пілотних проєктів, що відповідає загальносвітовим трендам переходу до «розумного» гірництва (Smart Mining) [56].

Таким чином, хоча Україна знаходиться лише на етапі переходу до сталого видобування молібденових руд, загальна динаміка свідчить про зростання інтересу

до інноваційних, екологічно безпечних і ресурсоефективних технологій. Розвиток галузі вимагає активного залучення інвестицій, державної підтримки інновацій, міжнародної науково-технічної співпраці та формування кадрового потенціалу, здатного реалізувати трансформацію видобувної галузі відповідно до викликів ХХІ століття [57, 58].

Окрему увагу в Україні привертають техногенні родовища — зокрема відвали (терикони) вугільних шахт і збагачувальних фабрик, які тривалий час розглядалися виключно як джерело екологічного забруднення. Однак сучасні дослідження свідчать про підвищений вміст критичних і рідкоземельних елементів, зокрема молібдену, у цих техногенних об'єктах, особливо в тих, де залишки вугілля зазнали спонтанного займання або тривалої термічної обробки. Піролізогенна трансформація речовини призводить до вторинної мінералізації металів, що відкриває перспективи промислової переробки таких териконів як альтернативного джерела рідкісних металів [58, 59]. Українські дослідження, зокрема в Донецькому регіоні, демонструють вміст молібдену на рівні 10–40 мг/кг у зольному залишку териконів, що є економічно доцільним для вилучення за умов модернізованої технології гідрометалургійної обробки [59].

Виходячи з проведених досліджень, кристали молібденіту, виявлені в межах Українського щита, приурочені до кількох структурно-геологічних мегаблоків, зокрема: Приазовського, Росинсько-Тікицького, Інгульського та Середньопридніпровського [43,58,60]. Це свідчить про широке, хоча й вибіркоче, поширення молібденової мінералізації в межах зазначених тектонічних одиниць. Загальна інформація щодо результатів аналізу хімічного складу молібденітів наведена у [Додатку Б.1], що дозволяє порівняти мінеральні асоціації за різними структурними зонами.

Під час аналізу результатів геологорозвідувальних робіт було встановлено найбільшу геохімічну спорідненість між молібденом та сіркою. Саме тому для подальшого аналізу було прийнято умовне припущення, що їхня сукупність становить 100 % цільового мінерального складу. У більшості випадків

співвідношення цих елементів становить близько 60 % молібдену та 40 % сірки, однак у деяких пробах ця сума дещо відрізняється від 100 %, що свідчить про наявність інших супутніх мінералів або форм сполук з дуже низьким вмістом основних компонентів. Загальне візуальне відтворення поширення найхарактерніших родовищ, рудопроявів та проявів молібденової мінералізації (ПММ) наведено на рис. 1.2 (Додаток Б.1).

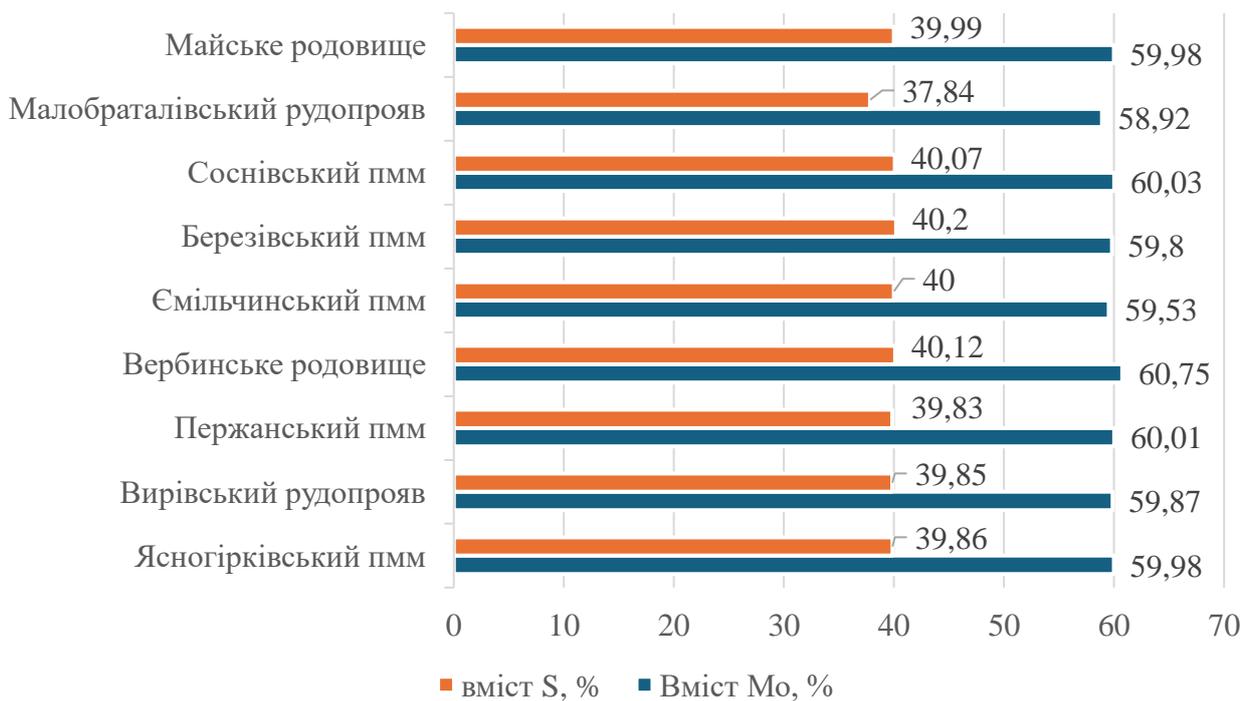


Рисунок 1.2 – Характерні прояви молібденової мінералізації в межах основних мегаблоків Українського щита

Виходячи із аналізу поширення молібденітів по утвореннях Українського щита, можна зробити наступний висновок, що молібденова мінералізація приурочена переважно до меж тектонічних мегаблоків, зокрема Приазовського, Інгульського, Росинсько-Тікицького та Середньопридніпровського, що свідчить про її структурно-контрольований характер [Додаток Б.1]. Просторове положення проявів молібденітів свідчить про їхню тісну прив'язаність до глибинних розломів та зон активної гідротермальної діяльності. У мінеральному складі між іншими

хімічними елементами, виявлена стійка асоціація молібдену із сіркою, що може вказувати на єдине джерело мінералоутворення або спільні умови кристалізації. Такий висновок дозволяє використовувати наявність одного з елементів як індикатор присутності іншого при проведенні геологорозвідувальних робіт. За результатами проведеного аналізу, методами обробки даних у програмному середовищі Microsoft Excel, встановлено, що розбіжність отриманих результатів досліджень у межах проведених вимірювань не перевищує 8 %, що свідчить про високу ступінь точності та відтворюваності експериментальних даних.

Проведений аналіз молібденітів, відібраних із родовищ, рудопроявів та проявів молібденової мінералізації Українського щита, засвідчив *стабільне співвідношення вмісту молібдену та сірки, що становить орієнтовно 60 % до 40 %*. Така сталість пропорцій свідчить про генетичну спорідненість цих хімічних елементів і їхню тісну взаємозалежність у процесах природного мінералоутворення. *Виявлений зв'язок дає підстави для геохімічного прогнозування: наявність одного з елементів, молібдену або сірки, може слугувати індикатором присутності іншого в геологічному середовищі*. Це, своєю чергою, має важливе значення для підвищення ефективності пошуків молібденовмісних сполук.

З іншого боку, склад українських молібденітів різниться за акцесорними властивостями. Гарантовано цінними слід вважати молібденіти в яких присутній хімічний елемент реній. Для металургії реній вважається металом з високим попитом, а інших промислових шляхів отримання, крім отримання з молібденіту, не існує. Також цінність окремих видів молібденіту слід порівнювати з затвердженими запасами. Так, Вербинське родовище (молібденітовий рудопрояв на Вербинській ділянці) має високу цінність не тільки за рахунок вмісту ренію (що не є переважно цінним), а за рахунок затверджених Державною комісією України по запасах корисних копалин запасів категорії С2 (що є переважно цінним).

Традиційні методи видобутку молібдену пов'язані з суттєвими екологічними ризиками, включно з деградацією ґрунтів, забрудненням води та повітря [61]. Процес видобутку часто передбачає видалення великих обсягів порід та оголення

хвостосховищ, що може призводити до потрапляння токсичних речовин у навколишнє середовище [62]. Такі наслідки підкреслюють термінову необхідність у впровадженні екологічно чистих технологій, оскільки подальше використання застарілих методів може спричинити незворотну шкоду для екосистем і місцевого населення.

Видобуток молібдену часто здійснюється у віддалених або екологічно чутливих районах, де існує ризик порушення природної флори та фауни [63]. Крім того, гірничодобувна діяльність може негативно впливати на здоров'я та добробут місцевих громад через забруднення води й повітря, шум та зміну ландшафту [62, 64]. Усунення таких впливів є критично важливим не лише для збереження довкілля, а й для збереження соціальної ліцензії на діяльність у цих регіонах, що зумовлює нагальну потребу в сталих підходах.

Сталий видобуток відповідає Цілям сталого розвитку ООН (ЦСР), зокрема тим, що стосуються відповідального споживання і виробництва, боротьби зі зміною клімату та охорони екосистем [65]. Оскільки уряди та промисловість по всьому світу прагнуть досягти цих цілей, виникає нагальна потреба в реформуванні гірничих операцій для зменшення екологічного сліду [65]. Це дослідження підтримує зазначені цілі шляхом аналізу практичних рішень для зменшення негативного впливу видобутку молібдену на довкілля. Новітні технології у сфері видобутку відкривають нові можливості для зменшення екологічного впливу, зокрема точковий видобуток, замкнені системи водопостачання та стратегії зменшення відходів [66]. У цьому дослідженні розглядається застосування таких інновацій саме у сфері видобутку молібдену, оцінюється їх ефективність та масштабованість, що є ключовими для впровадження сталих практик у галузі.

Сталий видобуток не лише виконує екологічні зобов'язання, а й приносить економічні вигоди шляхом зменшення відходів і підвищення ефективності використання ресурсів [65, 67]. Із посиленням екологічних стандартів у світі, компанії, які не дотримуються вимог, ризикують отримати штрафи, бути зупиненими або втратити доступ до ринку [64, 68]. Це дослідження висвітлює економічні та регуляторні стимули для впровадження сталих практик,

демонструючи, як дотримання екологічних норм може підвищити довгострокову життєздатність проєктів з видобутку молібдену.

Очікується, що результати цієї дисертаційної роботи також сприятимуть розробці стандартів сталого видобутку молібдену та інших критично важливих мінералів [69]. Показуючи реальні приклади і переваги сталих практик, це дослідження має на меті вплинути на політиків, лідерів галузі та екологічні організації, закликаючи їх підтримати та впровадити екологічно безпечні рішення [70]. Зрештою, дослідження спрямоване на забезпечення задоволення глобального попиту на молібден із одночасним збереженням довкілля та підтримкою сталого розвитку.

В умовах зростаючого глобального попиту на стратегічно важливі ресурси, особливо критичні та рідкоземельні метали, актуальними є дослідження та розробка сучасних технологічних схем розробки, збагачення та переробки молібденових руд у контексті комплексного вилучення супутніх компонентів. Молібденові родовища часто містять асоційовані елементи, зокрема ванадій, реній, ніобій, скандій і рідкоземельні елементи (РЗЕ), які за наявності ефективних технологічних рішень можуть додатково вилучатися у товарні продукти, що істотно підвищує економічну доцільність розробки таких об'єктів

## **1.2 Практика техніко-технологічне обґрунтування розробки родовищ молібденових руд за походженням**

Комплексна розробка молібденових руд передбачає поділ за джерелом сировини – на природні родовища та техногенні відходи. У випадку природних родовищ процес розпочинається з геологорозвідувальних робіт і геоекономічної оцінки, що дозволяє встановити запаси, рентабельність та гірничо-геологічні умови. Наступним етапом є видобуток руди – відкритим або підземним способом залежно від глибини залягання та геомеханіки порід. Загальна схема поділу комплексної розробки молібденових руд за походженням родовищ представлено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Схема поділу комплексної розробки молібденових руд за походженням родовищ

На представленому рисунку зелений фрагмент схеми відображає етапи, спільні для розробки як природних, так і техногенних родовищ молібденових руд. Ці процеси включають збагачення, хімічне вилуговування, екстракцію, осадження та отримання товарної продукції. Незалежно від джерела сировини, саме ці технологічні операції є ключовими для вилучення молібдену у придатній для використання формі. Їх універсальність дозволяє також, за необхідності, інтегрувати обидва типи ресурсів у єдиний переробний ланцюг.

Після видобутку руду піддають дробленню та подрібненню для досягнення необхідного гранулометричного складу, придатного до збагачення. Селективна флотація молібденіту дозволяє отримати концентрат  $\text{MoS}_2$ , який за потреби додатково очищується гідрометалургійними або пірометалургійними методами. Завершальним етапом первинної переробки є випалювання до  $\text{MoO}_3$  або безпосереднє металургійне вилучення молібдену, після чого проводиться утилізація відходів і рекультивація порушених територій [62, 71].

У разі техногенних родовищ, таких як хвости збагачення, золи, шлаки чи стічні води, процес починається з інвентаризації й аналітичного дослідження хімічного складу. Це дозволяє оцінити вміст молібдену, форм його знаходження та потенційний економічний ефект. Підготовка матеріалу включає сушіння, прожарювання або подрібнення залежно від фізико-хімічного стану відходів.

Основним етапом вилучення молібдену з техногенних ресурсів є хімічне вилуговування – лужне, кислотне або комбіноване сульфато-окиснювальне [33,72]. Після переходу молібдену у розчинну форму застосовуються методи сорбції, іонообміну або екстракції для його концентрування. З одержаного розчину молібден осаджують у вигляді  $\text{CaMoO}_4$  або  $\text{MoS}_2$ , після чого можливе повторне перекристалізування з метою підвищення чистоти продукту.

Завершальним етапом є отримання товарної продукції, такої як натрієвий молібдат ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ), триоксид молібдену ( $\text{MoO}_3$ ) або металевий молібден. Утилізація залишків та повторне використання основи матеріалу дозволяє

мінімізувати екологічний вплив. Оцінка екологічних наслідків та вжиття компенсаційних заходів становить важливу складову відповідального підходу до техногенної переробки. Такий підхід не лише сприяє ефективному використанню ресурсів, а й забезпечує екологічну безпеку територій. Коротку порівняльну характеристику етапів переробки молібдену з природних і техногенних родовищ наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

## Етапи отримання молібдену з природних та техногенних джерел

№ п/п	Етап	Природні родовища	Техногенні родовища
1	Джерело	Руда з надр	Відходи збагачення, золи, шлаки
2	Збагачення	Флотація	Вилуговування + сорбція / осадження
3	Продукт	$\text{MoS}_2 \rightarrow \text{MoO}_3$ або метал	$\text{Na}_2\text{MoO}_4$ , $\text{CaMoO}_4$ , $\text{MoS}_2$
4	Екологія	Рекультивация	Деактивація і повторне використання
5	Ризики	Гірничі	Хімічні та екотоксикологічні

Відповідно, отримання молібдену з природних та техногенних джерел складається з п'яти етапів. Спочатку, проводиться визначення джерела сировини, яке може бути представлене як рудою з надр, так і промисловими відходами. Далі здійснюється збагачення, що відрізняється технологічними підходами для кожного типу джерел. Наступні етапи включають формування кінцевого продукту, реалізацію екологічних заходів та врахування специфічних ризиків, пов'язаних із кожним видом родовищ. Розглянемо більш докладно даний технологічний процес.

Першим етапом у процесі отримання молібдену є визначення джерела сировини. Для природних родовищ молібден видобувають безпосередньо з руди, що залягає в надрах землі, найчастіше у вигляді молібденіту ( $\text{MoS}_2$ ) або у складі комплексних руд. Такий підхід вимагає проведення гірничих робіт, буріння та

транспортування руди на збагачувальні підприємства. Для техногенних родовищ джерелом є відходи попередніх виробництв – зокрема, відвали збагачення, золи теплових електростанцій, шлаки та інші накопичені промислові залишки, у яких молібден присутній у привабливих до вилучення концентраціях.

Другий етап – збагачення сировини. У випадку природних родовищ основним методом є флотація, яка дозволяє відокремити молібденітовий концентрат від пустої породи та супутніх мінералів. Цей метод ґрунтується на відмінностях у змочуваності поверхонь частинок і є ефективним для великих партій рудної сировини. Для техногенних джерел перевага надається хімічним методам, серед яких вилуговування з подальшою сорбцією або осадженням. Такі технології забезпечують перехід молібдену у розчинну форму та його концентрування з високим ступенем очищення.

На третьому етапі визначається та формується кінцевий продукт. Для природних родовищ після флотації отриманий концентрат молібденіту ( $\text{MoS}_2$ ) переробляється у оксид молібдену ( $\text{MoO}_3$ ) або безпосередньо у металевий молібден, залежно від потреб споживачів та технологічних умов. У випадку техногенних родовищ продукти можуть мати іншу форму – наприклад, розчинні солі  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  чи  $\text{CaMoO}_4$ , або відновлений концентрат  $\text{MoS}_2$ , придатний для подальшої металургійної переробки.

Четвертий етап стосується екологічних заходів. Для природних родовищ важливим завданням є рекультивація земель, порушених гірничими роботами. Це передбачає планування рельєфу, відновлення родючого шару ґрунту та висадку рослинності з метою повернення території у придатний стан. Для техногенних джерел акцент робиться на хімічну деактивацію залишкових відходів та повторне використання вилучених продуктів або очищених матеріалів. Таким чином, процес переробки техногенних родовищ часто має подвійний ефект – ресурсний та екологічний.

П'ятий етап пов'язаний із ризиками. Видобуток у природних родовищах супроводжується гірничими небезпеками: ризиком обвалів, утворенням пилу, деградацією ландшафту та зміною гідрогеологічних умов. У техногенних

родовищах основними загрозами є хімічні та екотоксикологічні фактори, пов'язані з наявністю у відходах токсичних сполук, які можуть потрапляти у ґрунт і воду, створюючи довготривалі негативні наслідки для довкілля.

Таким чином, діяльність з видобутку та переробки молібдену з природних і техногенних джерел має спільну мету – отримання цінного металу та його сполук, проте відрізняється джерелами сировини, технологічними підходами, екологічними стратегіями та характером ризиків. Використання техногенних родовищ у поєднанні з безпечними методами збагачення дозволяє зменшити потребу у новому видобутку та скоротити обсяги накопичених відходів, що робить такий підхід перспективним з точки зору сталого розвитку.

### **1.3 Методи геомеханічної оцінки масиву порід при розробці природних та техногенних родовищ молібденових руд**

Розв'язання інженерних задач, пов'язаних із розробкою природних і техногенних родовищ молібденових руд, потребує глибокого попереднього аналізу та зваженого обґрунтування прийнятих рішень. У сучасних умовах такі завдання дедалі частіше виходять за межі стандартних підходів, оскільки гірничі об'єкти характеризуються зростаючою складністю геологічної будови та різноманітним чинників, що впливають на їхній напружено-деформований стан [73]. Вирішення зазначених проблем, як правило, базується на використанні розрахункових схем, які моделюють геомеханічні процеси як у природному гірському масиві, так і в штучно сформованих техногенних – відвалах та хвостосховищах.

Разом із тим, складність таких схем істотно зростає зі збільшенням впливу додаткових факторів, зокрема складної внутрішньої структури молібденорудних масивів, дії змінних навантажень і взаємодії з водним та повітряним середовищами. За наявності складних геометричних форм, просторової неоднорідності та різноспрямованих деформаційних процесів впровадження адекватних розрахункових моделей потребує інтеграції сучасних методів геомеханічного

моделювання, здатних забезпечити належну точність і прогностичну надійність результатів [73, 74].

У ряді випадків застосування спрощених аналітичних залежностей виявляється малоефективним навіть за умови припущення пружного деформування середовища. Це зумовлює необхідність використання чисельних методів аналізу, насамперед методу скінченних елементів (МСК), скінчених різниць (МСР), граничних елементів (МГЕ), граничних інтегральних рівнянь (МГІР) та інших обчислювальних підходів, які дозволяють урахувати складні просторові закономірності розподілу молібдену й молібденовмісних сполук у рудному тілі [75-77]. У результаті якісне проектування геомеханічних процесів ґрунтується на поєднанні аналітичних методів, експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання, що створює основу для прогнозування поведінки масиву порід у реальних умовах експлуатації.

Для прикладу розглянемо природні молібденові родовища порфірового типу (Climax, Henderson, Erdenetta ін.) [78]. Вони характеризуються складною тектонічною будовою, блоковою структурою та високим ступенем тріщинуватості. Такі особливості зумовлюють значну просторову змінність геомеханічних параметрів і потребують диференційованого підходу до їх оцінювання. Техногенні родовища молібденових руд, що формуються у вигляді відвалів і хвостосховищ, вирізняються ще більшою неоднорідністю, вираженою реологічною поведінкою та суттєвою залежністю міцнісних і деформаційних властивостей від вологості й тривалості експлуатації [74, 79]. Оцінка геомеханічної ситуації та законів, що характеризують процеси видобування запаси молібденових руд може вимагати декількох чисельних методів аналізу геологічного середовища.

Відповідно, за умов ускладнення геологічної будови та дії додаткових факторів, таких як зміна навантажень, водонасичення, складних граничних умов, наявність геологічних порушень та ін., використання простих аналітичних моделей стає недостатнім. У таких ситуаціях чисельні методи, передусім метод скінченних елементів, дають змогу адекватно врахувати неоднорідність масиву, просторову

змінність властивостей і специфіку напружено-деформованого стану рудовмісних структур [75, 80].

Основними параметрами геомеханічної оцінки масиву порід є межі міцності при стиску та зсуві, модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення. Для аналізу граничного стану масиву порід широко застосовується критерії Кулона-Мора та Друкера-Прагера чи їх модифіковані версії, які у випадку техногенних масивів доцільно доповнювати залежностями, що описують деградацію міцнісних характеристик під впливом вологості, часу та інших параметрів [75, 81].

При хімічному вилуговуванні чи застосуванні гідрометалургійних технологій перероблення техногенної сировини під час вилученні молібденових сполук важливу роль відіграють методи оцінки термообміну та термодинаміки процесів, які дозволяють визначати енергетичну доцільність і технологічну ефективність реагентної взаємодії [73-75]. Термодинамічний аналіз, що ґрунтується на розрахунках змін вільної енергії Гіббса, ентальпії та ентропії реакцій, забезпечує прогноз напрямку та повноти перебігу вилуговування за різних температурних і концентраційних умов, тоді як методи оцінки теплопереносу дозволяють враховувати інтенсивність тепловиділення або теплопоглинання в реакційних зонах [74]. У поєднанні з кінетичними моделями розчинення мінеральних фаз, масообмінними підходами та чисельним моделюванням тепломасообміну такі методи створюють цілісну основу для оптимізації режимів гідрометалургійної переробки, підвищення ступеня вилучення молібдену та зниження енергетичних витрат процесу.

Вагому роль у формуванні вихідних даних для геомеханічного моделювання відіграють геофізичні методи досліджень, зокрема сейсмоакустичні та електророзвідувальні. Вони дозволяють оцінювати внутрішню структуру масиву, виявляти зони ослаблення та уточнювати параметри розрахункових моделей [81-83]. Чисельне моделювання, скажімо за допомогою методу скінченних елементів чи інших підходів плоского чи об'ємного дискретного представлення масиву виступає

базовим інструментом прогнозування напружено-деформованого стану породорудної товщі за різних сценаріїв ведення гірничих робіт.

Для техногенних масивів особливого значення набуває врахування реологічних властивостей матеріалу, зокрема повзучості та релаксації напружень, які істотно впливають на довготривалу стійкість інженерних споруд і рівень експлуатаційної безпеки. Завершальною складовою геомеханічної оцінки є система геомеханічного моніторингу, що охоплює геодезичні, інклінометричні та супутникові методи спостережень і забезпечує контроль розвитку деформаційних процесів та своєчасне виявлення потенційно небезпечних змін у масиві [75, 84].

Таким чином, комплексний підхід до геомеханічної оцінки, який поєднує аналітичні методи, експериментальні дослідження, чисельне моделювання та моніторинг, створює науково обґрунтовану основу для управління гірничими ризиками та є необхідною умовою ефективного й екологічно безпечного освоєння як природних, так і техногенних родовищ молібденових руд.

#### **1.4 Загальна методологія проведення досліджень**

Обґрунтування параметрів технологічних схем комплексної розробки молібденових руд природного та техногенного походження передбачає послідовну реалізацію низки взаємопов'язаних етапів, кожен з яких є важливим для досягнення кінцевої мети дослідження. Відповідно, загальна методологія ґрунтується на системному підході до аналізу геолого-технічних, геомеханічних, технологічних та еколого-економічних факторів, що визначають ефективність розробки молібденовмісних родовищ. Дослідження виконуються поетапно з використанням комплексу теоретичних, експериментальних, чисельних і аналітичних методів.

На першому етапі проводиться аналіз сучасного стану розробки молібденових руд природного та техногенного походження в Україні й за кордоном. Одночасно здійснюється систематизація геологічних, мінералогічних і технологічних характеристик молібденових руд та відходів їх переробки. На основі отриманих даних визначаються основні наукові проблеми та технологічні

обмеження, характерні для розробки техногенних родовищ, формуються мета, завдання й об'єкт дослідження, а також обґрунтовується вибір методів досліджень.

Другий етап присвячений геолого-структурній та мінерало-технологічній оцінці родовищ. На цьому етапі вивчається геологічна будова природних родовищ і техногенних масивів, аналізується гранулометричний склад рудної сировини, мінеральні форми молібдену та супутніх компонентів. Проводиться оцінка ступеня техногенного перетворення порід і руд, визначаються їх фізико-механічні та фізико-хімічні властивості, після чого родовища класифікуються за умовами розробки та технологічною придатністю.

На основі узагальненої інформації про діяльність діючих гірничодобувних підприємств у дослідженні застосовано інструменти нейронних мереж і машинного навчання, які дають змогу виявляти подібність між різними родовищами за сукупністю гірничо-геологічних показників. Використовуючи спеціально визначений коефіцієнт аналоговості, стає можливим переносити ефективні технологічні рішення з уже освоєних об'єктів на нові родовища зі спорідненими умовами залягання. Такий підхід дозволяє обґрунтовано пропонувати раціональні системи розкриття, підготовки та розробки для перспективних родовищ, зокрема Вербицького, зменшуючи технологічні ризики та підвищуючи ефективність проєктних рішень.

На третьому етапі виконується геомеханічна оцінка природних і техногенних масивів. Визначається їх напружено-деформований стан, встановлюються показники міцності, деформативності та стійкості порід і відвалів. Оцінюється вплив гірничих робіт на стійкість бортів кар'єрів, відвалів і техногенних тіл із використанням аналітичних і чисельних методів, зокрема методу граничної рівноваги, методу кінцевих і дискретних елементів. На основі цих досліджень обґрунтовуються допустимі параметри гірничих виробок і схилів.

Окремо для техногенних родовищ, у яких передбачається вилучення молібденових сполук із застосуванням технологій хімічного вилуговування та гідрометалургії, у дослідженні використано методи оцінки теплообміну та термічної деструкції сировини. Такий підхід дозволяє врахувати вплив

температурних режимів на перебіг фізико-хімічних процесів, зміну структури техногенного матеріалу та кінетику вилуговування молібдену. У результаті стає можливим обґрунтувати раціональні параметри теплової та хімічної обробки, підвищити ефективність вилучення корисних компонентів і зменшити енерго- та ресурсомісткість гідрометалургійних процесів.

Четвертий етап передбачає обґрунтування способів і систем розробки родовищ. На цьому етапі аналізуються можливі варіанти відкритої, підземної та комбінованої розробки, оцінюється доцільність селективного та комплексного вилучення молібдену. Розглядаються технологічні схеми переробки природних і техногенних руд, встановлюються межі та параметри виїмкових блоків, а також визначаються раціональні режими ведення гірничих робіт з урахуванням геомеханічних обмежень.

На цьому етапі досліджуються технологічні параметри видобутку та переробки молібденових руд. Визначаються оптимальні параметри гірничих робіт, обґрунтовуються режими дроблення, подрібнення та збагачення рудної сировини. Аналізується вплив гранулометричного складу на показники вилучення молібдену, оцінюються технологічні втрати й розубожування, а також оптимізуються режими роботи основного технологічного обладнання.

На п'ятому завершальному етапі дисертаційних досліджень виконується техніко-економічна, екологічна та техногенна оцінка технологічних схем розробки. На цьому етапі аналізуються екологічні ризики, пов'язані з розробкою природних і техногенних родовищ, та оцінюється вплив гірничих робіт на навколишнє середовище. Визначаються заходи з мінімізації негативного впливу, розробляються рішення щодо рекультивації й повторного використання техногенних територій, а також оцінюється відповідність запропонованих технологічних схем принципам сталого розвитку.

Техніко-економічна оцінка та оптимізація параметрів технологічних схем виконується на основі розрахунку основних показників для різних варіантів розробки. На завершальному етапі виконується їх порівняльний аналіз і визначається чутливість показників до зміни геологічних та технологічних

параметрів. На основі отриманих результатів обирається раціональна технологічна схема та обґрунтовуються рекомендації щодо її промислового впровадження.

На завершальному, восьмому етапі узагальнюються результати теоретичних і експериментальних досліджень, формуються основні наукові положення та практичні рекомендації. Оцінюється наукова новизна й практична значущість отриманих результатів, а також визначаються напрями подальших досліджень.

На основі наведеної методології досліджень, яка спирається на системний підхід до аналізу геолого-технічних, геомеханічних, технологічних та еколого-економічних факторів, що визначають ефективність розробки молібденовмісних родовищ, а також враховуючи поетапне виконання досліджень із використанням комплексу теоретичних, експериментальних, чисельних та аналітичних методів, були сформульовані мета та завдання роботи.

Для детальнішого та більш наочного уявлення про сутність досліджуваних процесів, а також про логіку й послідовність розв'язання поставлених наукових і прикладних завдань у роботі розроблено алгоритм їх комплексної реалізації. Зазначений алгоритм відображає взаємозв'язок окремих етапів досліджень і ключових методів, що застосовуються, та представлений у вигляді структурно-логічної схеми, наведеної на рисунку. 1.4.

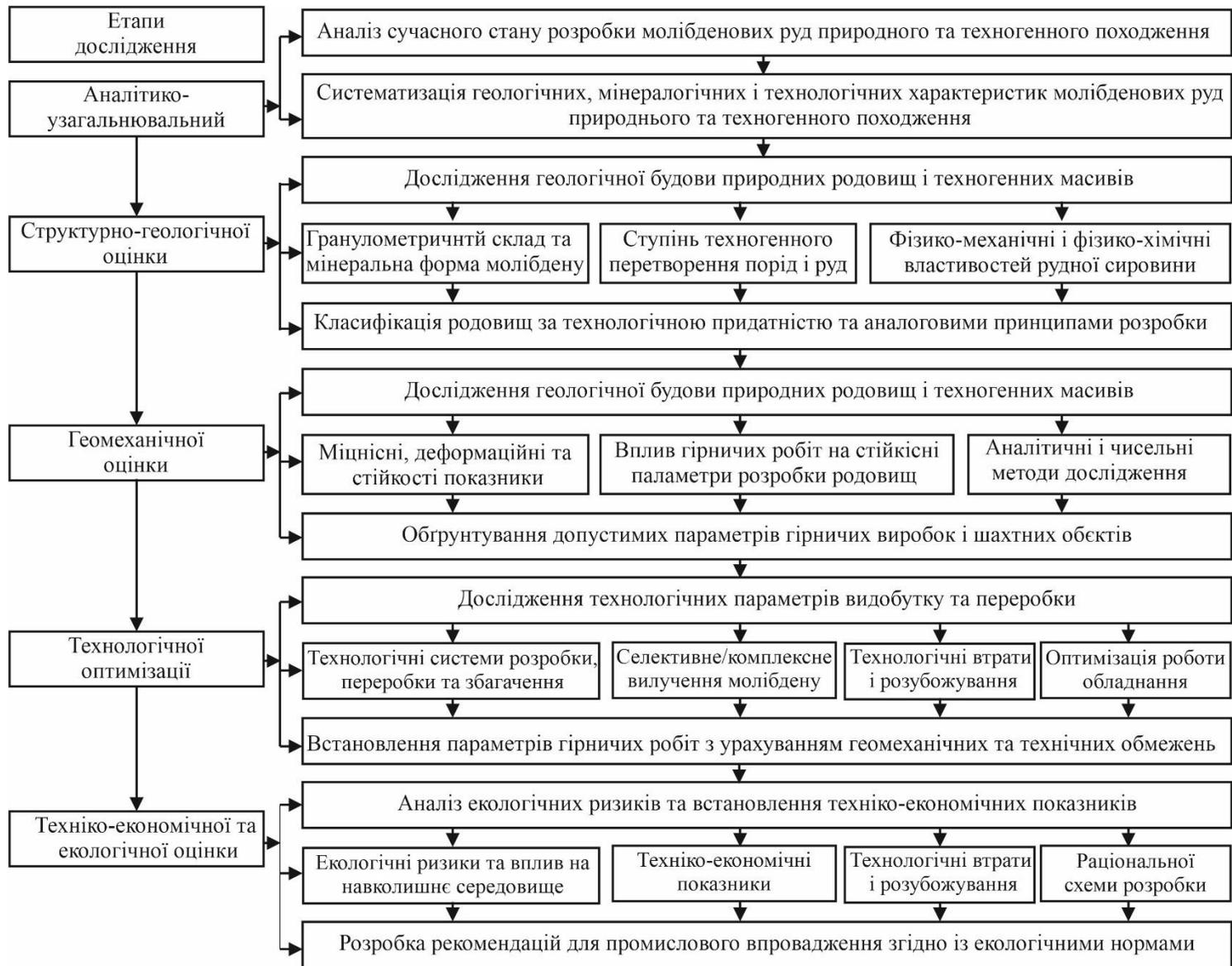


Рисунок 1.4 – Структурно-логічна схема проведення досліджень

## 1.5 ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1. МЕТА, ІДЕЯ, МЕТОДИ ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

У результаті аналізу сучасного стану обґрунтування параметрів технологічних схем комплексної розробки молібденових родовищ України було всебічно розглянуто рівень розвитку відповідних технологій під час освоєння як природних, так і техногенних родовищ. Основну увагу приділено науковим і прикладним дослідженням, що спрямовані на визначення раціональних параметрів гірничих робіт, схем розкриття, систем розробки та послідовності відпрацювання запасів з урахуванням геологічних, геомеханічних, технологічних та екологічних чинників. Проаналізовано підходи до використання відходів вуглезбагачення виключно в контексті їх впливу на стійкість масиву, формування техногенних родовищ і оптимізацію параметрів їх подальшої розробки. Узагальнення існуючих методів і технологічних рішень дало змогу виявити ключові тенденції розвитку комплексного освоєння молібденовмісних об'єктів та сформувані науково обґрунтовані передумови для вдосконалення параметрів технологічних схем, на основі чого були сформульовані відповідні узагальнені висновки.

1. Проведений аналіз засвідчив, що світовий розвиток молібденової галузі характеризується стійкою залежністю обсягів видобутку від хвиль індустріального та технологічного зростання. Впровадження флотаційних технологій у ХХ столітті зумовило різке здешевлення молібдену та перехід від спеціалізованих родовищ до комплексного освоєння поліметалічної сировини. Сучасні тенденції орієнтовані на підвищення ресурсоефективності, екологічної безпеки та стабільності постачання.

2. Понад 90 % світового молібдену видобувається як побічний продукт мідних родовищ, що підтверджує економічну доцільність комплексних технологічних схем. Досвід Китаю, Чилі, Перу та США демонструє ефективність вертикально інтегрованих виробничих комплексів із широким застосуванням цифрових систем управління. Такий підхід забезпечує зниження собівартості, підвищення коефіцієнтів вилучення та конкурентоспроможність галузі.

3. Технології вилучення молібдену безпосередньо з руди шляхом вилуговування не набули промислового поширення через низьку економічну ефективність. Найбільш доцільною залишається схема хімічної переробки продуктів випалу молібденітових концентратів із комплексним вилученням супутніх компонентів. Отримані узагальнення обґрунтовують необхідність адаптації світового досвіду для формування сучасних технологічних схем розробки природних і техногенних родовищ молібденових руд в Україні.

4. Молібденова мінералізація в межах Українського щита має чітко виражений структурно-контрольований характер і генетично пов'язана з глибинними розломами та гідротермальними процесами, що підтверджується стабільним співвідношенням молібдену і сірки у складі молібденітів. Виявлена геохімічна асоціація Mo–S може бути використана як індикаторна ознака під час прогнозування та пошуково-розвідувальних робіт.

5. Комплексна розробка молібденових руд доцільно реалізується з урахуванням походження сировини – природних і техногенних родовищ, що зумовлює відмінності у початкових етапах видобутку та підготовки матеріалу. Водночас ключові технологічні операції переробки (збагачення, вилуговування, екстракція та отримання товарної продукції) є універсальними та можуть бути інтегровані в єдиний переробний ланцюг.

6. Переробка техногенних родовищ молібдену характеризується підвищеним екологічним та ресурсним ефектом за рахунок поєднання хімічних методів вилуговування з процесами сорбції, осадження й повторного використання матеріалів. Залучення техногенних ресурсів дозволяє зменшити обсяги первинного видобутку та сприяє реалізації принципів сталого розвитку гірничо-металургійної галузі.

7. Геомеханічна оцінка масиву порід при розробці природних і техногенних родовищ молібденових руд потребує комплексного підходу з урахуванням просторової неоднорідності, тріщинуватості, водонасичення та змінних навантажень.

Застосування лише спрощених аналітичних моделей є недостатнім, що зумовлює необхідність інтеграції чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів, у поєднанні з експериментальними та геофізичними дослідженнями.

Виходячи з проведеного аналізу, отриманих висновків за першим розділом дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання досліджень.

**Мета дослідження** полягає обґрунтуванні раціональних параметрів технології гідрометалургійного вилуговування молібдену при комплексному відпрацюванні природних і техногенних молібденових родовищ на основі встановлення закономірностей впливу гірничотехнічних, гранулометричних і технологічних факторів на ефективність вилучення металу, що забезпечує підвищення повноти використання мінеральної сировини та економічної й екологічної ефективності її переробки.

Поставлена мета досягається шляхом реалізації наступних **наукових завдань дослідження:**

- виконати аналіз сучасного стану та існуючих технологічних рішень щодо видобування і переробки молібденових руд, а також визначити геохімічні та мінералогічні закономірності, що впливають на ефективність вилучення молібденітів Українського щита;
- сформувати технологічну системи відпрацювання молібденових родовищ виходячи із встановленого коефіцієнта аналогічності, що формується за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту із багатокomпонентних баз даних наявних техніко-технологічних впроваджень;
- розробити способи селективного магнітного вилучення мінеральних фаз при варіюванні магнітною силою джерела для підвищення концентрації молібдену та вилучення його у поєднанні з іншими корисними компонентами;
- встановити залежності контрольованих фазових перетворень та їх інтенсивність при зовнішній термічній дії до 1500 °С з метою встановлення меж застосування гідрометалургійного видобування молібдену із масивів;

– встановити економічну доцільність запропонованих технологічних рішень залежно від генезису формування, просторового розташування тіл корисних копалин та їх промислового призначення.

*Об'єктом дослідження* є рудопорідний масив молібденомістких порід природного, техногенного походження та технологічні процеси отримання молібдену із супутнім вилученням інших корисних компонентів.

*Предмет дослідження* – закономірності зміни характеристик рудопорідного масиву при різних технологічних схемах відпрацювання молібденових руд.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що базується на аналізі та систематизації результатів світового та вітчизняного досвіду, включаючи оцінку наявних технологічних рішень, методів геолого-структурного аналізу для визначення морфологічних та механічних характеристик рудопорідного масиву, математичного моделювання термохімічних, фазо-масових і фізико-механічних властивостей руд, лабораторних експериментів, цифрового відтворення даних нейронних мереж, їх використання оптимізації технологічних процесів і підвищення безпеки робіт. Комбінація зазначених методів дозволяє створити ефективні технологічні схеми видобутку молібденових руд із максимальним вилученням супутніх корисних компонентів, що сприятиме підвищенню економічної ефективності та екологічної безпеки гірничого виробництва.

Вирішення поставлених завдань базується на основі *ідеї роботи*, яка полягає у врахуванні закономірностей зміни термохімічних, масо-фазових перетворень та геомехамічних процесів у молібденових родовищах для підвищення ефективності комплексного видобування молібдену з супутнім вилученням інших корисних копалин включно із критичною сировиною.

Основні результати першого розділу опубліковано в наукових працях [2], [57], [60], [62].

## РОЗДІЛ 2

### ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОМПЛЕКСНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ МОЛІБДЕНОВИХ РУД. ВИБІР МЕТОДІВ І РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Формування моделі технології комплексного відпрацювання молібденових руд природного та техногенного походження

Формування моделі технології комплексного відпрацювання молібденових руд природного та техногенного походження передбачає системний підхід, що охоплює всі ключові етапи виробничого циклу – від видобутку сировини до отримання кінцевого продукту. Така модель інтегрує процеси геологорозвідувальних робіт, гео економічної оцінки, збагачення руди, хімічного вилуговування та металургійного вилучення молібдену у придатній для промислового використання формі.

Важливим аспектом моделі є поєднання природних родовищ та техногенних ресурсів, таких як хвости збагачення, золи та шлаки, у єдиний переробний ланцюг. Такий підхід забезпечує комплексне використання наявних матеріальних ресурсів і дозволяє підвищити загальну ефективність виробничого циклу. Він дає змогу максимально вилучати молібден та супутні метали з різних джерел, мінімізуючи втрати цінних компонентів [75, 76]. Крім того, інтеграція техногенних матеріалів з природною рудою зменшує потребу у видобутку нових рудних масивів. Це має істотне значення для сталого розвитку гірничої галузі, оскільки скорочує антропогенний вплив на довкілля та допомагає зберегти природні екосистеми. Таким чином, поєднання природних і техногенних джерел створює науково обґрунтовану основу для ресурсозберігаючого та екологічно безпечного видобутку молібдену.

Модель також передбачає оптимізацію технологічних процесів з метою зменшення енергетичних і матеріальних витрат. Впровадження сучасних методів збагачення, хімічного вилуговування та гідрометалургійного вилучення молібдену

дозволяє досягти високого ступеня вилучення цінних компонентів, включаючи супутні метали. Це забезпечує ефективне використання ресурсної бази та підвищує економічну доцільність виробництва. Одночасно застосування таких технологій значно зменшує обсяг відходів і скорочує негативний вплив на довкілля. Таким чином, модель інтегрує екологічну безпеку та економічну ефективність у процес комплексного відпрацювання молібденових руд.

Важливою складовою є впровадження замкнених систем водопостачання, точкового видобутку та контрольованих режимів переробки, що мінімізує скидання токсичних сполук у навколишнє середовище [63, 85]. Такий підхід дозволяє поєднувати економічну ефективність з екологічною безпекою та дотриманням міжнародних стандартів сталого розвитку.

Модель комплексного відпрацювання також передбачає використання чисельного моделювання геомеханічних процесів у рудних та техногенних масивах. Це дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан порід, оцінювати ризики обвалів або деградації хвостосховищ та забезпечувати безпечну експлуатацію виробничих об'єктів.

Для підвищення технологічної ефективності модель інтегрує термодинамічні та масообмінні підходи при хімічному вилуговуванні техногенної сировини, а також при гідрометалургійному вилученні молібдену [75, 77]. Аналіз змін вільної енергії, ентальпії та ентропії хімічних реакцій дозволяє прогнозувати повноту вилучення молібдену за різних температурних та концентраційних умов. Такий підхід дає змогу оптимізувати режим процесу та зменшити енергетичні витрати. Крім того, інтеграція масообмінних і термодинамічних моделей забезпечує контроль швидкості і ефективності перетворень у реакційних зонах. В результаті досягається підвищення виходу цінного металу при одночасному мінімізації впливу на довкілля.

Особливу увагу в моделі приділено екологічним заходам, включно з рекультивацією порушених територій, хімічною деактивацією відходів та повторним використанням продуктів вилучення. Такий комплексний підхід забезпечує мінімізацію негативного впливу на ґрунт, воду та атмосферу, а також

сприяє збереженню соціальної ліцензії на видобуток у регіонах з високою екологічною чутливістю.

Загалом, формування моделі технології комплексного відпрацювання молібденових руд природного та техногенного походження створює науково обґрунтовану основу для ефективного, ресурсозберігаючого та екологічно безпечного освоєння родовищ. Така інтеграція технологічних, геомеханічних і екологічних аспектів забезпечує сталий розвиток гірничої галузі та підвищує економічну доцільність видобутку критично важливих металів.

## **2.2 Формування принципів аналогічності на основі існуючих техніко-технологічних рішень відпрацювання молібденових родовищ**

В Україні, незважаючи на значні запаси молібдену, багато природних родовищ залишаються невідпрацьованими через технологічні, економічні та екологічні обмеження. У зв'язку з цим особливу актуальність набуває системний аналіз наявних техніко-технологічних рішень, застосованих на вже освоєних молібденових родовищах. Розроблений у цьому дослідженні підхід передбачає комплексне вивчення та систематизацію існуючих методів видобутку, збагачення та переробки молібденових руд, включаючи практику роботи з природними та техногенними ресурсами. На основі отриманих даних планується формування коефіцієнта аналогічності, який дозволяє прогнозувати ефективність застосування вже відпрацьованих гірничодобувних технологій до нових, планованих ділянок розробки. Такий підхід сприяє оптимізації проєктування гірничих робіт, зменшенню технологічних ризиків і підвищенню ефективності використання наявної ресурсної бази. Впровадження принципів аналогічності дозволяє інтегрувати науково-технічний досвід попередніх розробок у планування нових проєктів, забезпечуючи економічну та екологічну доцільність освоєння молібденових родовищ.

Принцип аналогічності у даному дослідженні реалізується за допомогою сучасних методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж та машинного

навчання, що дозволяють врахувати комплексну взаємодію геологічних, гірничо-технологічних та економічних факторів [86, 87].

Метод групового аргументу є сучасним математичним підходом у сфері машинного навчання та нейронних мереж, що використовується для інтеграції та аналізу багатовимірних даних [86, 88, 89]. Основна ідея методу полягає у групуванні показників та параметрів об'єктів у певні кластери або агрегати, які потім використовуються як аргументи для оцінки подібності між об'єктами. Такий підхід дозволяє зменшити розмірність задачі, виділити найбільш релевантні характеристики та підвищити точність прогнозних моделей. У контексті оцінки технологічних рішень для молібденових родовищ метод групового аргументу дозволяє формалізувати порівняння природних і техногенних об'єктів на основі їхніх геологічних, гірничо-технологічних та економічних параметрів.

Математично метод реалізується через функціонал похибки  $L$ , який мінімізується при навчанні моделі [86, 90]:

$$L = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (y_k - \hat{y}_k)^2, \frac{\partial L}{\partial w_{i,k}} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial w_{i,k}} \left[ \frac{dL}{d\hat{y}_k} - \frac{\partial L}{\partial v_{i,k}} \right], \quad (2.1)$$

де  $y_k$  — реальні значення,  $\hat{y}_k$  — прогнозовані,  $w_{i,k}$  — вагові коефіцієнти параметрів у груповому аргументі, а  $m$  — кількість навчальних об'єктів. Така форма дозволяє ефективно коригувати ваги параметрів у кожному кластері для досягнення оптимальної відповідності між історичними даними та прогнозованими результатами, що особливо важливо при формуванні коефіцієнта аналогічності.

Застосування методу групового аргументу у поєднанні з нейронними мережами забезпечує потужний інструмент для інтегрованого аналізу даних, де кластери параметрів виступають як проміжні агрегати, що впливають на вихід моделі [86]. Це дозволяє не лише визначати найбільш аналогічні технологічні рішення для планованих ділянок видобутку, а й прогнозувати ефективність їх застосування з урахуванням складності гірничо-геологічної структури та умов експлуатації. Завдяки цьому метод групового аргументу стає ключовим елементом

у системах прийняття рішень для оптимізації гірничодобувних технологій та підвищення економічної ефективності проєктів.

Відповідно до виразу 2.1 модель для основи методу групового аргументу передбачає формування багатовимірного векторного простору параметрів родовища  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , де  $x_i$  характеризує геологічні, гірничо-технологічні та економічні показники [85, 91]. На базі цього простору здійснюється кластеризація існуючих родовищ за подібністю їх характеристик, що визначається функцією коефіцієнта аналогічності  $S(X_i, X_j)$ , яка може бути визначена як:

$$S(X_i, X_j) = \frac{\sum_{k=1}^n w_k f_k(x_{i,k}, x_{j,k})}{\sum_{k=1}^n w_k}, \quad (2.2)$$

де  $w_k$  – ваговий коефіцієнт значущості параметра  $k$ , а  $f_k$  – функція порівняння (наприклад, відносна різниця або кореляційна метрика). Такий підхід дозволяє кількісно оцінювати ступінь схожості між новим об'єктом розробки та вже освоєними ділянками.

Для реалізації принципу аналогічності використовується штучна нейронна мережа (ШНС), де на вході мережі подається вектор  $X$ , а на виході формується прогноз ефективності застосування конкретного технологічного рішення на новій ділянці. Архітектура мережі може включати багат шаровий перцептрон або рекурентні нейронні мережі для врахування просторових і часових залежностей. Навчання мережі здійснюється методом зворотного поширення помилки (backpropagation) з мінімізацією функції втрат  $L$ , що відображає розбіжність між прогнозованими та експериментальними значеннями ефективності:

$$L = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2.3)$$

де  $y_i$  – реальний показник ефективності для  $i$ -го родовища, а  $\hat{y}_i$  – прогноз мережі. Використання методу групового аргументу в процесі навчання дозволяє враховувати не лише окремі показники, а й їхні взаємозв'язки, що значно підвищує точність прогнозу для нових ділянок.

Інтеграція масивів техніко-технологічних даних, включаючи гірничо-геологічні параметри, рентабельність видобутку та специфіку переробки, дозволяє сформувати єдиний цифровий простір знань, який слугує базою для прийняття

обґрунтованих рішень щодо вибору технологій. На основі побудованої нейронної моделі можна формувати коефіцієнт аналогічності  $K_a$  для нових ділянок, який визначає ймовірність успішного застосування існуючих технологічних рішень.

Таким чином, застосування нейронних мереж у поєднанні з методом групового аргументу забезпечує науково обґрунтовану методологію переносу досвіду на нові ділянки, підвищує точність прогнозування ефективності гірничо-технологічних рішень і сприяє зниженню ризиків при освоєнні молібденових родовищ [85 – 92]. Цей підхід дозволяє поєднувати економічну доцільність, технологічну ефективність та екологічну безпеку у процесі планування нових проектів. Схема інтегрованої нейронної моделі формування коефіцієнта аналогічності наведена на рис. 2.1.

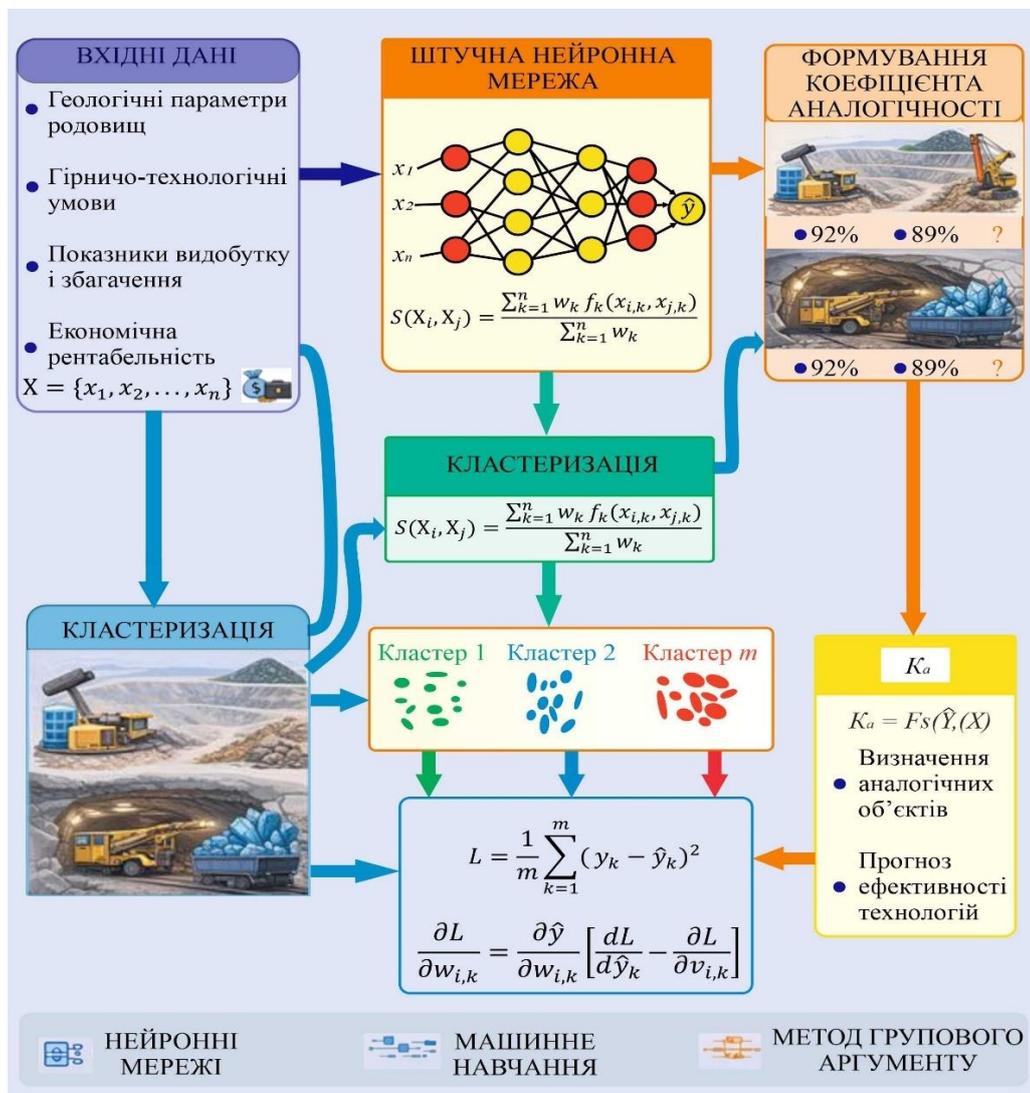
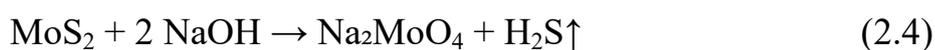


Рисунок 2.1 – Схема інтегрованої нейронної моделі формування коефіцієнта аналогічності

На рисунку узагальнено представлено поєднання відкритого та підземного способів розробки родовищ у межах єдиного інформаційно-аналітичного контуру. Модель включає блоки збору та попередньої обробки вхідних геолого-технологічних даних, їх кластеризацію та подальше опрацювання за допомогою штучних нейронних мереж. Результатом роботи моделі є інтегральний коефіцієнт аналогічності, який дозволяє кількісно оцінити доцільність застосування існуючих техніко-технологічних рішень до перспективних ділянок розробки родовищ.

### **2.3 Наукова основа гідрометалургійного вилучення молібдену при розробці природних та техногенних родовищ**

Гідрометалургійне вилучення молібдену базується на переведенні молібденовмісних мінералів із твердого стану у розчинну форму з подальшим концентруванням та отриманням товарних сполук. Виходячи із закладених основ у параграфі 1.2 та рисунку 1.3 на початковому етапі процесу здійснюється хімічне вилуговування, під час якого основний мінерал молібдену молібденіт ( $\text{MoS}_2$ ) вступає у реакцію з лужними або кислотними реагентами [73, 74]. За лужних умов відбувається утворення розчинного молібдату натрію відповідно до реакції (лужне вилуговування):



Ця реакція забезпечує селективний перехід молібдену в розчинну форму за рахунок утворення стабільних молібдат-іонів, які характеризуються високою хімічною стійкістю у водному середовищі. При цьому більшість супутніх мінеральних компонентів руди або техногенної сировини залишаються у твердій фазі, що підвищує селективність процесу вилуговування. Така вибірковість дозволяє мінімізувати розчинення небажаних домішок і зменшити навантаження на подальші стадії очищення продуктивних розчинів. У результаті створюються сприятливі умови для підвищення повноти вилучення молібдену та зниження загальних енергетичних і реагентних витрат процесу.

У випадку кислотно-окиснювального вилуговування молібденіт піддається інтенсивному окисненню пероксидом водню в кислому середовищі за наявності сірчаної кислоти, що забезпечує руйнування сульфідної ґратки мінералу (кислотне вилуговування) [73, 92]:



У формулі 2.2 позначення  $3\text{H}_2\text{O}_2$  у стехіометричному рівнянні реакції вказує на участь трьох молів пероксиду водню як окиснювального реагента. Така кількість  $\text{H}_2\text{O}_2$  є необхідною для забезпечення повного окиснення атомів молібдену та сірки у складі молібденіту до термодинамічно стабільних продуктів реакції. Пероксид водню при цьому виконує роль джерела активного кисню, що забезпечує перехід молібдену у вищий ступінь окиснення та сприяє руйнуванню сульфідної структури мінералу, підвищуючи ефективність процесу вилуговування.

Внаслідок перебігу окисно-відновних реакцій молібден переходить у вищий ступінь окиснення з утворенням гідратованого оксиду молібдену, який характеризується підвищеною реакційною здатністю. Така форма молібдену є сприятливою для подальшого розчинення, екстракції або перетворення у товарні молібденовмісні сполуки на наступних стадіях гідрометалургійної переробки.

Ефективність перебігу зазначених реакцій істотно залежить від термодинамічних і температурних умов процесу (термоенергетичне регулювання). Підвищення температури сприяє зростанню швидкості окисно-відновних реакцій та зменшенню значення зміни вільної енергії Гіббса ( $\Delta G < 0$ ), що термодинамічно обґрунтовує доцільність інтенсифікації вилуговування [73, 93]. Енергетичне регулювання також впливає на рівновагу реакцій розчинення та гідролізу, зокрема на реакцію утворення молібдат-іонів у водному середовищі:



Подальший перебіг гідрометалургійного процесу визначається інтенсивністю масообмінних явищ, які забезпечують дифузію реагентів до поверхні мінеральних зерен та відведення продуктів реакцій у рідку фазу. Утворені молібдат-іони ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) переходять у розчин, де встановлюється динамічна рівновага між швидкістю розчинення та швидкістю хімічних перетворень. Обмеження

масообміну призводить до накопичення продуктів реакції на поверхні частинок, що знижує загальну кінетику процесу вилуговування.

На завершальному етапі гідрометалургійної переробки здійснюється концентрування та цілеспрямоване виділення молібдену з продуктивних розчинів із застосуванням методів осадження, сорбції або рідинної екстракції. Вибір конкретного способу визначається хімічним складом розчину, концентрацією молібдену, наявністю супутніх елементів і вимогами до чистоти кінцевого продукту. Одним із поширених варіантів є осадження молібдену у вигляді малорозчинного кальцієвого молібдату, що забезпечує ефективне вилучення молібдену з водної фази. Такий підхід характеризується технологічною простотою, стабільністю перебігу реакції та можливістю подальшої переробки осаду з отриманням товарних молібденовмісних сполук [73, 94]. Осадження молібдену можливе, наприклад, у вигляді кальцієвого молібдату за реакцією:



Також осадження молібдену можливе у вигляді триоксиду молібдену після підкислення продуктивного розчину, що призводить до зниження розчинності молібдат-іонів і ініціює утворення твердої фази [73, 95, 96]. За таких умов молібден переходить із розчинної форми у вигляді гідратованого оксиду, який після термічної обробки перетворюється на кристалічний  $\text{MoO}_3$ . Даний спосіб забезпечує отримання продукту з високим ступенем чистоти та широко застосовується на завершальних стадіях гідрометалургійної переробки молібденовмісної сировини:



Сукупність наведених хімічних реакцій визначає загальну технологічну ефективність гідрометалургійного вилучення молібдену, формуючи умови його селективного переходу у розчин та подальшого виділення у товарній формі. Кінетичні та термодинамічні характеристики цих реакцій безпосередньо впливають на повноту вилучення молібдену та стабільність перебігу процесу за різних температурних і концентраційних режимів. Раціональний вибір реагентів, їх стехіометричних співвідношень і параметрів середовища дозволяє знизити питомі енергетичні витрати та мінімізувати утворення побічних продуктів. Таким чином,

комплексний аналіз реакційної системи створює науково обґрунтовану основу для оптимізації гідрометалургійних технологій вилучення й переробки молібденовмісної сировини .

## 2.4 Термічний та термодинамічний аналіз при вилучення молібдену

Для прогнозування повноти вилучення молібдену в гідрометалургійних процесах широко застосовують термодинамічні показники, зокрема зміну згаданої вільної енергії Гіббса ( $\Delta G$ ), ентальпії ( $\Delta H$ ) та ентропії ( $\Delta S$ ), взаємозв'язок між якими описується рівнянням [93, 97]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.8)$$

де:

$\Delta H$  – тепло, що поглинається або виділяється (Дж/моль);

$T$  – температура, К;

$\Delta S$  – зміна ентропії (Дж/(моль·К)).

Значення  $\Delta G$  дозволяє оцінити термодинамічну доцільність перебігу реакції: за умови  $\Delta G < 0$  реакція є спонтанною та може відбуватися без додаткового підведення енергії. Температура процесу  $T$ , виражена у кельвінах, істотно впливає на баланс між ентальпійною та її складовими, визначаючи напрямок і глибину хімічних перетворень. Таким чином, аналіз зміни термодинамічних потенціалів створює наукову основу для вибору оптимальних режимів вилучення молібденовмісної сировини.

Кількісна оцінка ефективності процесу здійснюється через ступінь конверсії молібдену  $\alpha$ , яка визначається як відношення кількості вилученого молібдену до його початкового вмісту в сировині [93, 97,98]. Даний показник визначається за відношенням кількості початкового та вилученого молібдену

$$\alpha = \frac{n_{\text{Мо, вилучений}}}{n_{\text{Мо, початковий}}} \quad (2.9)$$

де  $n$  – кількість молю молібдену у вихідній та вилученій сировині.

Ступінь конверсії  $\alpha$  характеризує повноту переходу молібдену у розчинну або товарну форму та дозволяє порівнювати ефективність різних технологічних схем. Використання молярних величин забезпечує коректність розрахунків незалежно від масштабів процесу та типу вихідної сировини. Зростання значення  $\alpha$  свідчить про підвищення ступеня вилучення молібдену та загальної результативності гідрометалургійної переробки.

Важливу роль у гідрометалургійних процесах відіграє масообмін, зокрема дифузія реагентів до поверхні мінеральних частинок і відведення продуктів реакції у розчин [93, 97]. Для опису цих явищ застосовується класичне рівняння переносу маси, яке пов'язує швидкість зміни концентрації молібдену в розчині з різницею між насиченою концентрацією на поверхні мінералу та поточною концентрацією у рідкій фазі:

$$\frac{dC}{dt} = k_a(C_s - C) \quad (2.10)$$

де:  $C$  – концентрація молібдену в розчині (моль/л)

$C_s$  – насичена концентрація на поверхні мінералу

$k_a$  – коефіцієнт масообміну (м/с)

Коефіцієнт масообміну  $k_a$  відображає інтенсивність дифузійних процесів і залежить від гідродинамічних умов, температури та гранулометричного складу сировини. Інтегрування цього рівняння дозволяє отримати аналітичний вираз для концентрації молібдену як функції часу ( $t$ ), що дає змогу прогнозувати кінетику вилуговування:

$$C(t) = C_s(1 - e^{-k_a t}) \quad (2.11)$$

Отримана залежність концентрації від часу дозволяє оцінювати швидкість протікання процесу та визначати оптимальну тривалість вилуговування (швидкість вилуговування та ефективність процесу.). Зі зростанням часу концентрація молібдену в розчині асимптотично наближається до насиченого значення, що відповідає вичерпанню потенціалу масообміну. Такий підхід є корисним для техніко-економічного обґрунтування процесу, оскільки дозволяє уникати надмірних

енергетичних і часових витрат. Таким чином, математичний опис масообміну забезпечує кількісну оцінку ефективності гідрометалургійних операцій.

Інтеграція термодинамічних та масообмінних підходів дозволяє сформуванню узагальнену модель, що описує зміну ступеня конверсії молібдену у часі за заданих технологічних умов [93, 99]. У цій моделі швидкість зростання конверсії визначається коефіцієнтом масообміну та функцією термодинамічної сприятливості процесу, яка залежить від температури та значення  $\Delta G$ :

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_a(1 - \alpha)f(T, \Delta G) \quad (2.12)$$

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

Такий підхід враховує як кінетичні обмеження, так і енергетичну доцільність перебігу реакцій. При наближенні  $\alpha$  до одиниці процес характеризується максимальною ефективністю та високим ступенем використання ресурсів. Оптимізація параметрів температури та масообміну в межах інтегрованої моделі дозволяє знизити питомі енергетичні витрати та забезпечити стабільність технологічного процесу. Відповідно, оптимізація температури ( $T$ ) і коефіцієнта масообміну ( $k_a$ ) дозволяє мінімізувати енергетичні витрати процесу вилуговування молібдену. Застосування цієї моделі створює науково обґрунтовану основу для прогнозування результатів гідрометалургійного вилучення молібдену як з природної, так і з техногенної сировини. У результаті підвищується керованість процесу та зростає його економічна й екологічна ефективність.

Інтегрована термодинамічно-масообмінна модель, що поєднує закономірності термодинаміки та процесу масообміну, дозволяє сформуванню узагальнене рівняння для прогнозування ступеня конверсії молібдену за заданих технологічних умов. У межах цієї моделі враховується вплив температури, енергетичної сприятливості хімічних реакцій та інтенсивності масопереносу на швидкість переходу молібдену у розчинну форму. Такий підхід забезпечує комплексний опис як кінетичних, так і енергетичних обмежень процесу гідрометалургійного вилучення. Модель створює наукову основу для оптимізації режимів вилуговування з урахуванням мінімізації енергетичних витрат і

підвищення повноти вилучення металу. Схематичне подання інтегрованої термодинамічно-масообмінної моделі наведено на рис. 2.2.

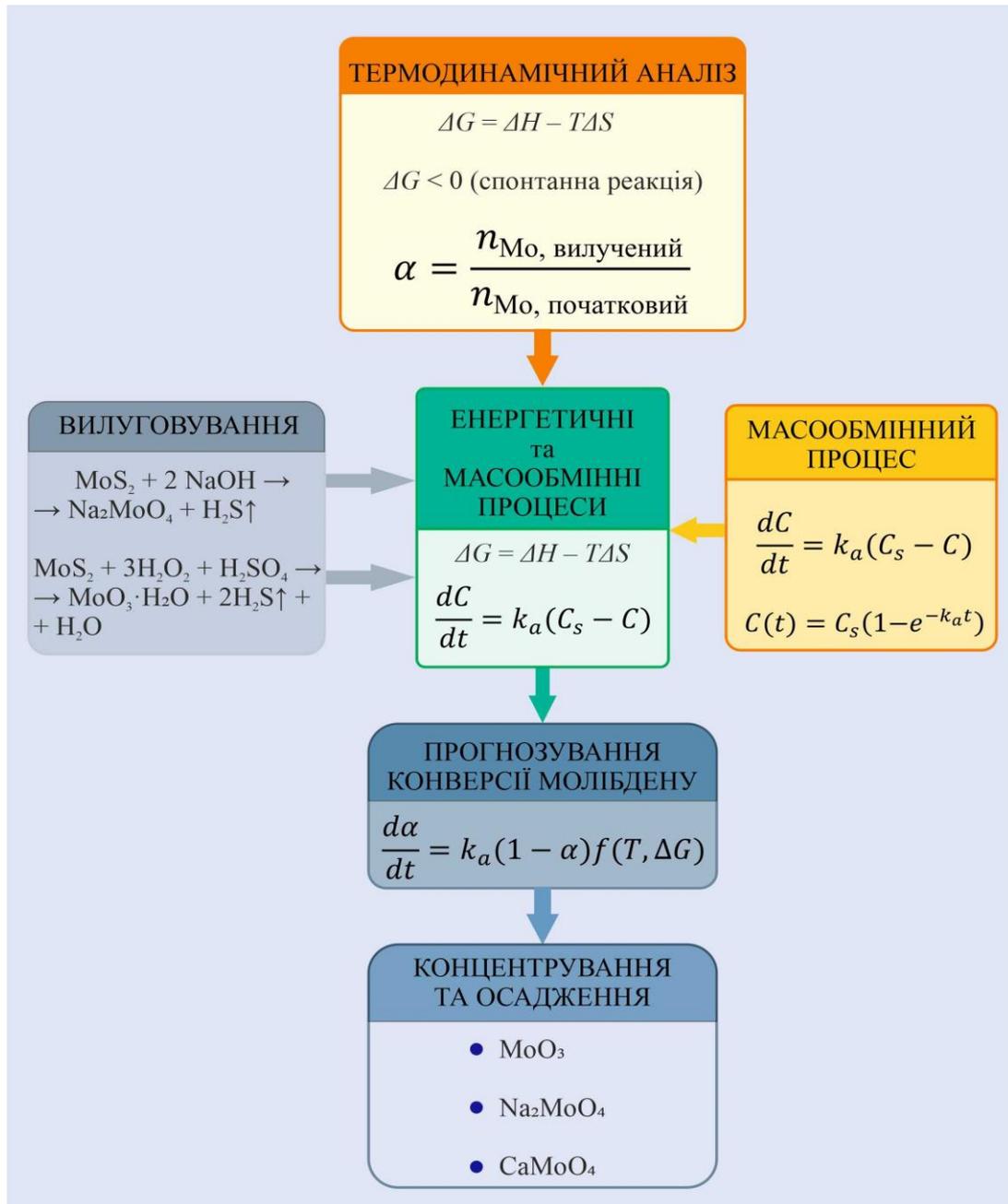


Рисунок 2.2 – Інтегрована модель технології комплексного відпрацювання молибденових руд природного та техногенного походження

Схема ілюструє поетапний процес вилучення молибдену з природних родовищ та техногенних ресурсів (хвостів збагачення, зол, шлаків). Модель включає наступні етапи: видобуток і підготовку сировини, дроблення та подрібнення, збагачення шляхом флотації або хімічного вилуговування,

гідрометалургійне вилучення молібдену, осадження та отримання товарного продукту ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ,  $\text{CaMoO}_4$ ), а також рекультивацію та екологічну нейтралізацію відходів. Інтеграція термодинамічних, масообмінних та кінетичних моделей забезпечує прогноз повноти вилучення молібдену, оптимізацію енергетичних і матеріальних витрат та контроль швидкості перетворень у реакційних зонах. Використання обчислювальних і аналітичних методів дозволяє поєднати природні і техногенні ресурси в єдиний переробний ланцюг, мінімізуючи екологічний вплив і підвищуючи ефективність технології.

Практичне значення розробленої моделі полягає в можливості обґрунтованого вибору оптимальних температурних режимів вилучення молібдену з різних типів сировини, зокрема з природних руд і техногенних утворень. Модель дозволяє здійснювати контроль тривалості технологічного процесу та оцінювати ефективність використання хімічних реагентів залежно від заданих умов. Її застосування сприяє підвищенню виходу товарного продукту за рахунок зростання повноти вилучення молібдену. Одночасно з цим зменшується при розробці техногенних родовищ обсяг утворюваних відходів і знижується навантаження на довкілля. Універсальність підходу забезпечує можливість використання моделі як для природних молібденових родовищ, так і для переробки техногенної сировини, зокрема хвостів збагачення, шлаків і золи.

## **2.5 Методи та інструментарій лабораторного дослідження складу молібденових руд**

Незважаючи на достатньо серйозну основу наведених аналітичних підходів важливим елементом є встановлення промислової придатності природних та техногенних родовищ, що містять молібденові сполуки. Відповідно, лабораторні дослідження складу молібденових руд виконувалися з метою встановлення концентрації молібдену в молібденомістких породах та оцінки їх відповідності виробничим кондиціям [2, 62, 100]. Основу методики становив відбір репрезентативних проб з подальшим мікроструктурним і фазовим аналізом. Для

досягнення високої просторової роздільної здатності та достовірної ідентифікації мінеральних фаз застосовувався електронний просвітлювальний мікроскоп (ПЕМ-У) загальний вигляд якого наведено на рис. 2.3.

Даний метод дозволяє досліджувати об'єкти на нанометровому рівні, виявляти тонкодисперсні мінеральні фази та субмікроскопічні включення молібдену, недоступні для оптичних методів аналізу. Завдяки високій просторовій роздільній здатності ПЕМ забезпечує детальне вивчення морфології, кристалічної будови та взаємного розташування мінеральних компонентів. Це, у свою чергу, підвищує точність і достовірність оцінки концентрації молібдену та його розподілу в межах досліджуваної породи.



Рисунок 2.3 – Фотофіксація загального вигляду електронного просвітлювального мікроскопу (ПЕМ-У)

Відбір проб молібденомістких порід здійснювався відповідно до загальноприйнятих геолого-мінералогічних вимог із забезпеченням репрезентативності зразків. Подальша підготовка включала подрібнення, формування тонких шарів подрібненої породи, у окремих випадках ультратонке шліфування та виготовлення електронно-прозорої фольги товщиною у деяких випадках яких складає 50–100 нм. Важливим елементом встановлення концентрації складових елементів досліджуваних порідних зразків виконувалася саме на згадану товщину, що є необхідною умовою для ефективного просвітлювання зразка електронним пучком електронним просвітлювальним мікроскопом ПЕМ-У.

Електронний просвітлювальний мікроскоп функціонує на основі формування та прискорення електронного пучка в електронній гарматі. Як джерело електронів використовувалася гармата з вольфрамисловою ниткою, яка генерує стабільний електронний потік. Електрони розганялися високою напругою (десятки–сотні кіловольт), унаслідок чого набували високої кінетичної енергії та малої довжини хвилі, що забезпечує надвисоку роздільну здатність досліджень.

Сформований електронний пучок проходить через систему електромагнітних конденсорних та об'єктивних лінз, які забезпечують його точне фокусування та стабільне напрямлення на досліджуваний зразок. Конденсорні лінзи дозволяють регулювати діаметр та щільність електронного пучка залежно від режиму спостереження. Об'єктивні лінзи формують первинне зображення зразка з високою просторовою роздільною здатністю. За допомогою апертур різного діаметра здійснюється керування кутом розсіювання електронів, інтенсивністю пучка та рівнем контрасту зображення. Застосування апертур також сприяє зменшенню впливу паразитних розсіяних електронів і підвищенню чіткості зображення. Такий комплексний підхід дозволяє оптимізувати умови спостереження для різних типів молібденовмісних мінеральних фаз та забезпечує відтворюваність результатів досліджень.

Під час проходження електронного пучка крізь зразок відбувалася його взаємодія з атомами речовини. Частина електронів проходила без відхилень, частина – розсіювалася або поглиналася. Інтенсивність та характер розсіювання

визначалися густиною матеріалу та атомним номером елементів, що входять до складу мінералів. Завдяки цьому формується контраст, який дозволяє ідентифікувати молібденові мінерали та оцінювати їх концентрацію у породі.

Просвітлені електрони після зразка збираються системою проєкційних лінз, які формують збільшене зображення досліджуваної ділянки. Збільшення в ПЕМ досягає сотень тисяч разів, що дає змогу виявляти нанорозмірні включення молібденових фаз. Реєстрація зображення здійснюється за допомогою флуоресцентного екрана та фотоплівки (у класичній конфігурації ПЕМ-У), що забезпечує візуальний контроль і подальший аналіз результатів.

Отримані мікроструктурні зображення використовувалися для кількісної та якісної оцінки вмісту молібдену в досліджуваних породах. Результати порівнювалися з відомими промисловими концентраціями молібденових руд, що дозволяло робити висновки щодо перспективності їх промислового освоєння. Застосування ПЕМ у поєднанні з ретельною підготовкою проб забезпечило високу достовірність лабораторних досліджень та обґрунтованість отриманих висновків.

## **2.6. Геомеханічна основа розробки природніх родовищ молібденових руд**

У даній роботі як природній прикладовий об'єкт дослідження розглядається Вербинське родовище молібдену, розташоване на північному заході Українського щита в межах Житомирської області та генетично пов'язане з Устинівським гранітоїдним масивом. Геологічна будова родовища характеризується розвитком кристалічних порід підвищеної міцності, що зумовлює специфіку формування напружено-деформованого стану при веденні гірничих робіт на різних глибинах. З огляду на це, родовище є репрезентативним прикладом для дослідження геомеханічних процесів, що супроводжують підземну розробку молібденових руд у твердих масивах з переважанням магматичних порід [76, 80, 83, 89, 101-103].

Гірський масив у межах дослідження розглядається як квазіоднорідне ізотропне або трансверсально-ізотропне середовище, напружений стан якого формується під дією комплексу природніх і техногенних факторів. Основний

внесок у напруження забезпечується гірським тиском, зумовленим власною вагою перекриваючих порід, який зростає зі збільшенням глибини розробки, а за необхідності також враховуються тектонічні складові регіонального характеру [83, 104]. Додаткове порушення напруженого стану масиву виникає внаслідок технологічних процесів, пов'язаних із формуванням гірничих виробок, поетапним відпрацюванням підповерхів у межах поверхової системи розробки та закладанням виробленого простору, що суттєво впливає на перерозподіл напружень і деформацій навколо очисних та підготовчих виробок.

Відповідно за класичною схемою встановлення напружено-деформованого стану гірського масиву вертикальне гірське напруження в масиві на глибині  $H$  визначається тиском від власної ваги перекриваючих порід і в першому наближенні описується лінійною залежністю [83, 105]:

$$\sigma_v(H) = \gamma H, \quad (2.13)$$

де:  $\gamma$  – об'ємна вага порід, яка для рудо-вміщуючих кристалічних масивів та ступеню метаморфізму порід.

Згідно з геологічною будовою згаданого родовища, прояви молібденового зруднення приурочені до апікальної частини малої інтрузії. Над кристалічним фундаментом у межах району залягає пухка товща осадових відкладів, представлена переважно пісками та кременями, потужністю від кількох до перших десятків метрів, у зв'язку з чим початок зруднення фіксується безпосередньо під корою вивітрювання на глибинах 15–30 м. Максимальна глибина геологічної розвідки сягає близько 500 м, що дозволяє віднести родовище до об'єктів помірних глибин, однак підрахунок запасів категорії  $C_2$  здійснювався переважно в інтервалі 120–300 м, де рудні тіла зберігають стабільну промислову концентрацію молібдену; саме цей діапазон глибин прийнято в роботі як базовий для геомеханічних і технологічних досліджень. Для характерних умов родовища вертикальні гірські напруження на глибинах 120 і 300 м остерігатиметься суттєве зростання навантаження (прогнозні вертикальні напруження складають близько 3,0 та 7,5 МПа) на гірничі виробки зі збільшенням глибини розробки [83, 105]. Відповідно,

горизонтальні напруження при цьому приймаються пропорційними вертикальним і визначаються співвідношенням:

$$\sigma_h = k\sigma_v, \quad (2.14)$$

де: коефіцієнт бокового тиску  $k$ , який відображає як літологічні особливості порід, так і регіональні тектонічні умови, що в сукупності формує вихідний напружений стан масиву перед проведенням гірничих робіт.

Після формування гірничої виробки в масиві відбувається істотний перерозподіл напружень, у результаті якого в зоні покрівлі концентруються головні стискаючі напруження  $\sigma_1 \rightarrow \max$ , що формують несучу склепінчасту зону навколо виробки (рис. 2.5). Для виробки кругового перерізу цей ефект може бути аналітично описаний класичним розв'язком Кірша, згідно з яким максимальні окружні напруження на контурі виробки визначаються співвідношенням [105, 106]:

$$\sigma_\theta(r = a) = \sigma_v(1 + 2k),$$

де:  $\sigma_v$  – вертикальне гірське напруження, а  $k$  – коефіцієнт бокового тиску.

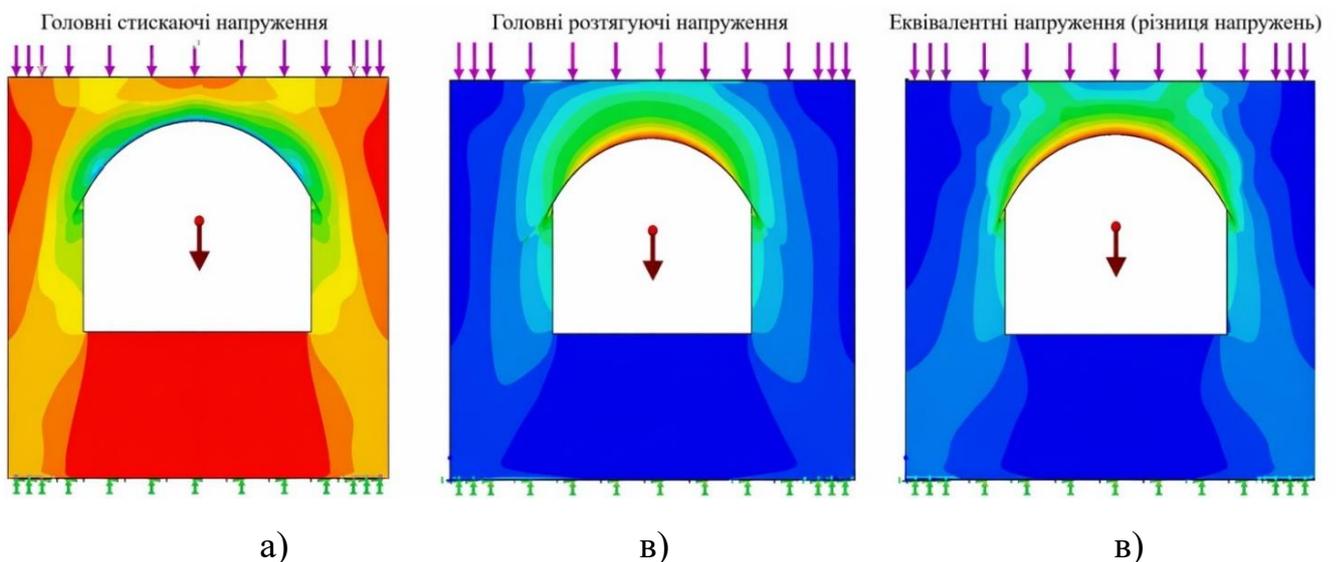


Рисунок 2.4 – Епюри розподілу напружень при моделюванні напружено-деформованого стану гірського масиву навколо гірничої виробки

Водночас у бортах і нижній частині виробки переважають головні розтягуючі напруження  $\sigma_3 < 0$ , що формує потенційно небезпечні зони, схильні до ініціації

тріщин, відшарування порід і розвитку зсувних поверхонь [105]. Для комплексної оцінки стійкості масиву використовується еквівалентне напруження за критерієм Мізеса

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (2.15)$$

Наведена залежність (2.15) враховує спільну дію всіх головних напружень; при виконанні умови  $\sigma_{eq} \geq \sigma_y$  масив переходить у пружно-пластичний стан, що супроводжується розвитком незворотних деформацій у приконтурній зоні виробки.

Зв'язок між напруженнями та деформаціями в умовах лінійної пружності описується законом Гука для об'ємних тіл [105, 107]. У загальному вигляді тензор напружень  $\sigma_{ij}$  і тензор деформацій  $\varepsilon_{ij}$  пов'язані співвідношенням:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij}], \quad (2.15)$$

де  $E$  – модуль Юнга, що характеризує жорсткість матеріалу, а  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона, який описує поперечні скорочення при подовженні.

Для вертикальної деформації можна записати спрощене співвідношення:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E}, \quad (2.16)$$

Залежність (2.16) показує прямий пропорційний зв'язок між вертикальним напруженням  $\sigma_v$  та вертикальною деформацією  $\varepsilon_v$ . Це означає, що при збільшенні глибини виробки вертикальні деформації зростатимуть також будуть близько до прямо пропорційних із напруженнями. Проте після досягнення межі міцності матеріалу виникають пластичні деформації, що призводить до різкого збільшення конвергенції виробок.

Поверхово-підповерхова система розробки, що планується до впровадження в шахті при розробці Вербицького родовища впливає на розподіл напружень у масиві. При поетапному відпрацюванні кожен підповерх заввишки приблизно 30 м створює локальне розвантаження та вторинні концентрації напружень у покрівлі наступного підповерху [105, 106-108]. Цей ефект можна подати як суперпозицію:

$$\sigma_{tot}(H, n) = \sigma_{in-situ}(H) - \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i, \quad (2.17)$$

де  $\sigma_{\text{in-situ}}(H)$  – природні напруження на глибині  $H$ ,  $\Delta\sigma_i$  – зміни напружень від відпрацьованих підповерхів.

Роль закладання виробленого простору (планується впровадити технологію із закладанням) полягає у зменшенні концентрацій напружень у покрівлі та скороченні зони пластичних деформацій [105]. Закладка моделюється як пружне середовище з модулем  $E_z$ , що дозволяє записати вертикальні напруження як:

$$\sigma_z = E_z \varepsilon_z \quad (2.18)$$

Ефективність закладки оцінюється коефіцієнтом

$$\eta = \frac{E_z}{E_{\text{rock}}}.$$

Якщо  $\eta \geq 0.1$ , система вважається геомеханічно стабільною, а масив залишається стабільним при переході з глибин 120 м до 300 м.

Загальна закономірність із глибиною полягає в тому, що з ростом глибини розробки збільшується гірський тиск, головні напруження та зона пластичності навколо виробок. Це робить більш важливим поетапне відпрацювання підповерхів і обґрунтовує необхідність чисельного моделювання методом FEM або FDM для точного прогнозування поведінки масиву [90, 105-109].

Отже, дослідження Вербинського родовища дозволяє системно оцінити взаємозв'язок між геологічними умовами, природними та техногенними напруженнями, а також механізмами деформацій у твердих кристалічних масивах. Поетапне відпрацювання підповерхів у поєднанні із закладанням виробленого простору є ключовим фактором для забезпечення геомеханічної стабільності шахтної системи. Використання аналітичних співвідношень для розрахунку напружень і деформацій у поєднанні з чисельним моделюванням дає можливість прогнозувати розвиток зон пластичності, визначати ефективність закладки та оптимізувати параметри розробки [110]. Сформована методологія створює основу для комплексного управління напружено-деформованим станом гірського масиву при підземній розробці молібденових руд.

## 2.6 ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. Модель комплексного відпрацювання молібденових руд природного та техногенного походження забезпечує інтеграцію технологічних, геомеханічних і екологічних аспектів видобутку. Вона дозволяє максимально ефективно використовувати як природні, так і техногенні ресурси, оптимізувати технологічні процеси, підвищити ступінь вилучення молібдену та супутніх металів, мінімізувати енергетичні витрати й негативний вплив на довкілля.

2. Завдяки поєднанню чисельного моделювання, термодинамічних і масообмінних підходів модель комплексного відпрацювання створює науково обґрунтовану основу для сталого та економічно доцільного освоєння родовищ.

3. Застосування нейронних мереж у поєднанні з методом групового аргументу дозволяє створити науково обґрунтовану модель оцінки ефективності технологічних рішень для молібденових родовищ. Воно забезпечує інтеграцію геолого-технологічних, економічних та експлуатаційних параметрів, формує коефіцієнт аналогічності та дозволяє прогнозувати доцільність використання наявного досвіду на нових ділянках. Такий підхід підвищує точність планування, зменшує технологічні ризики та сприяє економічній і екологічно безпечній розробці родовищ.

4. Гідрометалургійне вилучення молібдену забезпечує селективний перехід молібденовмісних мінералів у розчин із подальшим концентруванням та виділенням товарних сполук. Ефективність процесу визначається термодинамічними, кінетичними та масообмінними факторами, вибором реагентів і режимів вилуговування. Раціональна організація цих стадій дозволяє максимізувати вихід молібдену, мінімізувати енергетичні витрати та побічні продукти, створюючи науково обґрунтовану основу для оптимізації технології.

5. Інтегрована термодинамічно-масообмінна модель гідрометалургійного вилучення молібдену дозволяє прогнозувати ступінь конверсії металу, оптимізувати температурні та масообмінні режими, підвищувати повноту вилучення та ефективність використання реагентів. Модель забезпечує контроль швидкості

процесу, зменшує енергетичні витрати й обсяг відходів, що робить її придатною для переробки як природної, так і техногенної сировини.

6. Лабораторні дослідження молібденомістких порід із застосуванням електронного просвітлювального мікроскопа (ПЕМ-У) дозволяють точно визначати концентрацію молібдену та його розподіл у породі на нанометровому рівні. Висока просторово-якісна роздільна здатність і ретельна підготовка проб забезпечують достовірність результатів і дають змогу оцінити промислову придатність природних і техногенних родовищ для подальшого освоєння.

7. Дослідження Вербинського родовища показує, що геомеханічна поведінка кристалічного масиву під час підземної розробки молібденових руд залежить від природних і техногенних напружень, глибини залягання та конфігурації виробок. Поетапне відпрацювання підповерхів у поєднанні із закладанням виробленого простору забезпечує стабілізацію напружено-деформованого стану, зменшує концентрації напружень і зони пластичних деформацій. Використання аналітичних співвідношень та чисельного моделювання дозволяє прогнозувати поведінку масиву та оптимізувати параметри розробки для конкретних геологічних умов родовища.

8. Комплексний підхід до розробки молібденових родовищ природного та техногенного походження поєднує геомеханічні, технологічні, термодинамічні та масообмінні аспекти, що забезпечує ефективне використання ресурсів, максимальне вилучення молібдену, зниження енергетичних витрат і мінімізацію впливу на довкілля. Інтеграція чисельного моделювання, аналітичних методів, лабораторних досліджень з високою роздільною здатністю та застосування нейронних мереж дозволяє прогнозувати поведінку гірського масиву, оптимізувати параметри технологічного процесу і забезпечувати стабільність та безпечність підземної розробки.

Основні результати другого розділу опубліковано в наукових працях [2], [62], [100].

### РОЗДІЛ 3

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИДАТНОСТІ ПРИРОДНИХ І ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ ДО КОМПЛЕКСНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ МОЛІБДЕНОВИХ РУД

### 3.1. Система відбору проб для достовірності проведення досліджень

Для забезпечення достовірності досліджень природних та техногенних родовищ, утворених після процесів вуглезбагачення, важливо створити спеціалізовану систему відбору проб. Варто зазначити що природні родовища не є суто молібденовими і вимагають комплексної переробки після їх вилучення із надр. Вони як і техногенні родовища після збагачення вугілля мають складну структуру, що формується через накопичення збагачувальних відходів з різним гранулометричним та хімічним складом. Тому система відбору проб повинна враховувати ці особливості, щоб проби були репрезентативними та відображали реальний стан матеріалу.

Відбір проб із таких родовищ потребує застосування спеціалізованих методів, які дозволяють врахувати неоднорідність і ступінь розподілу корисних компонентів у відходах збагачення. Часто застосовують послідовне або стратифікований пробовідбір, що дає змогу отримати усереднені показники і знизити похибки аналізу. Важливо також враховувати зміну складу відходів у просторі й часі, що диктує необхідність регулярного оновлення проб [62, 100, 111, 112, 113].

Оптимальний обсяг та частота відбору проб у таких умовах визначаються на основі статистичних моделей, що враховують мінімізацію варіації результатів при збереженні економічної доцільності. Особливу увагу у системі відбору проб приділяється процедурі зберігання та транспортування, адже даний матеріал, а особливо проби з техногенних родовищ після вуглезбагачення часто має схильність до зміни фізико-хімічних властивостей під впливом навколишнього середовища. Використання герметичних контейнерів і контрольованих умов зберігання дозволяє зберегти початковий стан проб і уникнути забруднень.

Для підвищення якості і стандартизації досліджень важливо впроваджувати автоматизовані системи контролю. Це дозволить знизити людський фактор, покращити точність і повторюваність процесу, а також забезпечує документальне підтвердження кожного етапу пробовідбору. Застосування сучасних технологій сприяє оперативності й ефективності досліджень.

Отже, розробка і впровадження системи відбору проб як для природних, так і техногенних родовищ після вуглезбагачення є ключовим етапом для отримання достовірних і точних результатів. Оскільки, це дозволяє ефективно оцінювати потенціал родовищ, планувати їх подальше використання, а також мінімізувати негативний вплив на довкілля, забезпечуючи сталий розвиток гірничодобувної галузі згідно із нормами екологічної безпеки та принципами циркулярної економіки.

У нашій практиці ми застосовували просту та ефективну процедуру контролю якості відбору, підготовки та аналізу проб. Вона базується на систематичному включенні до кожної партії з 20 проб, що були піддані лабораторному аналізу, по одній пустій, дублікатній і еталонній пробі. Це дозволило контролювати точність і достовірність досліджень на кожному етапі. У процесі обробки результатів половина із проб була відкинута як граничні із верхніми та нижніми значеннями. Саме тому у даній роботі присутні лише 10 досліджених та описаних дослідних зразків [100, 112, 113].

У нашому випадку згідно із методичними рекомендаціями, пусті проби відбиралися з гомогенізованих валових проб масою не менше 20 кг, які близькі за складом до порід родовища, і не містили значущих кількостей корисних компонентів, що підтверджено багатьма аналізами в різних лабораторіях на рівні виробничого підприємства. При аналізі проб із природних молібденових родовищ у даній роботі використано загальнодоступні аналітичні дані що були отримані різними геологічними службами України. Дублікатні проби бралися випадковим чином у польових умовах, шляхом поділу просторового поділу відвалу за відповідними якісними та кількісними характеристиками. За контрольні проби були прийняті уже перевірені за складом відходи геологічною службою підприємства (ПрАТ «Львівська вугільна компанія»).

Використання таких контрольних проб (пустих, дублікатних та еталонних), за нашою думкою дало можливість при застосуванні достатньо складного методу

просвітлювального дослідного матеріалу за допомогою електронного мікроскопа ПЕМ-У (див. підрозділ 2.5 та рис. 2.3), отримати адекватні результати щодо вмісту молібдену разом із критичною сировиною та забезпечити постійний і надійний контроль якості підготовки основних проб та аналізів, допомагаючи виявляти систематичні та випадкові помилки. Це дозволяє підтримувати достовірність результатів протягом усього періоду розвідки, здебільшого за рахунок власної лабораторії.

Для проведення дослідження використано відходи вуглезбагачення техногенних родовищ Західної України, зокрема хвости збагачення, шлаки та золу, що накопичилися в процесі виробничої діяльності ПрАТ «Львівська вугільна компанія». Зазначена сировина характеризується складним мінералогічним і хімічним складом, у якому молібденіт виступає основним мінералом-носієм молібдену, а також присутні супутні метали й домішки.

З метою забезпечення точності та відтворюваності експериментальних результатів відібрані зразки пройшли попередню підготовку, що включала стадії дроблення, подрібнення та гомогенізації. Увесь процес відбору проб був ретельно задокументований; фотоматеріали, представлені на рисунку 1, ілюструють загальний вигляд відходів, особливості морфології частинок і їхній гранулометричний склад, що є важливим для подальшої інтерпретації результатів аналізу та вибору технологічних рішень [100, 113].

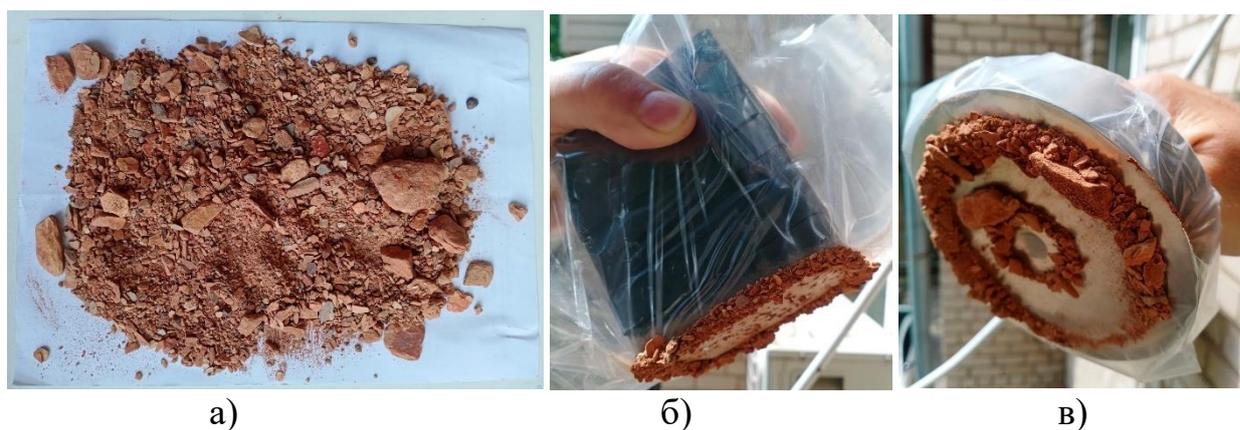


Рисунок 3.1 – Фотофіксація відбору проб відходів збагачення вугілля: (а) загальний вигляд зразка; (б) слабка магнітна сепарація за допомогою феритового магніту; (в) високоінтенсивна магнітна сепарація за допомогою неодимового магніту

Перед подальшою переробкою відходи було піддано попередній візуальній та фізико-хімічній характеристиці, після чого здійснено магнітну сепарацію в лабораторних умовах як етап підготовки матеріалу. Застосування магнітного розділення було спрямоване на диференціацію відходів за мінералогічним складом і магнітною сприйнятливістю, що дозволило виділити фракції, збагачені залізовмісними мінералами та асоційованими з ними мікроелементами, зокрема молібденом (рисунок 1а).

Як показано на рисунку 1а, несортований матеріал представлений переважно фрагментами сланцю з чітко вираженою шаруватою структурою та широким діапазоном розмірів частинок – від субміліметрових до фрагментів розміром у кілька сантиметрів. Морфологія частинок має лускатий характер із гострими лінійними краями та різними відтінками червоно-охристого забарвлення; у ряді випадків спостерігається цементация дрібних фрагментів глинистою речовиною. Матеріал характеризується низькою механічною міцністю, особливо вздовж площин спайності, а поверхня частинок значною мірою вкрита дрібнодисперсним пилом. Сукупність візуальних ознак свідчить про часткове окислення органічно збагачених компонентів, зокрема горючих сланців, що містять кероген, що є типовим для техногенних відходів вуглезбагачення.

Магнітна сепарація, схема якої наведена на рисунках 1б та 1в, дозволила розділити матеріал на три фракції: немагнітну, слабомагнітну та сильномагнітну. Розділення здійснювалося із застосуванням систем слабких феритових магнітів і високоміцного неодимового магніту, що забезпечувало чітку диференціацію матеріалу за характером магнітної реакції. У результаті було сформовано три умовні групи відходів: неметалічну фракцію з мінімальним вмістом металів, слабо металічну фракцію з низькими концентраціями цінних елементів та сильно металічну фракцію, збагачену молібденом і супутніми критичними металами.

Сильномагнітна фракція вирізнялася підвищеним вмістом окислених частинок охристого кольору та була ідентифікована як збагачена залізовмісними фазами. Саме

ця фракція була обрана як основний об'єкт для подальших досліджень та пропозиції формування технологій гідрометалургійного вилуговування і можливого їх перенесення на промислові підприємства. Важливим результатом дослідження встановлення висновку, що отримані сполуки молібдену в техногенних відходах збагачення вугілля зазвичай представлені дрібнодисперсними мінеральними фазами, асоційованими з оксидами та заліза (Додаток Б.2.). Усереднені значення хімічного складу магнітних, сильномагнітних та немагнітних фракцій досліджуваних зразків відходів вуглезбагачення наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Усереднені значення хімічного складу магнітних, сильномагнітних та немагнітних фракцій досліджуваних зразків відходів вуглезбагачення

Склад	Одиниці виміру	Ідентифікація шламового зразка		
		немагнітний	магнітний	сильномагнітний
SiO <sub>2</sub>	%	62,20000	43,90000	41,30000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	23,70000	17,70000	16,90000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6,58000	23,60000	30,80000
MgO	%	1,75000	0,61000	0,58000
SO <sub>3</sub>	%	1,37000	1,93000	2,62000
BaO	%	0,03300	0,10000	0,11000
Mo	%	0,00003	0,01000	0,06000
V	%	0,00300	0,00300	0,01000
Cu	%	0,00150	0,00300	0,00200
Ge	%	0,00100	0,00070	0,00150
Li	%	0,00003	0,00003	0,00005
Mn	%	0,00015	0,00010	0,00010
Σ	%	<b>95,63871</b>	<b>87,85683</b>	<b>92,38365</b>

Отримані результати наведені у таблиці переконливо доводять, що зміна концентрації молібдену у виділених фракціях при варіюванні магнітної сили джерела зумовлена селективністю вилучення мінеральних фаз, з якими асоційований молібден. За використання феритових магнітів з відносно низькою напруженістю магнітного поля відбувається переважно відокремлення сильно магнітних компонентів (магнетит, частково піротин), у складі яких молібден присутній у незначних кількостях або у вигляді домішок, що забезпечує лише помірне зростання його концентрації. Натомість застосування високоміцних неодимових магнітів, які формують значно інтенсивніше магнітне поле, сприяє залученню до магнітної фракції слабомагнітних та тонкодисперсних фаз, у тому числі залізовмісних оксидів, з якими молібден пов'язаний генетично або парагенетично [100, 112, 113]. У результаті підвищення магнітної сили джерела, як правило, супроводжується зростанням концентрації молібдену у магнітному концентраті, однак за надмірної інтенсивності поля можливе зниження селективності процесу за рахунок захоплення баластних мінералів, що потребує оптимізації режимів магнітної сепарації.

Усереднені значення хімічного складу немагнітної, магнітної та сильномагнітної фракцій відходів вуглезбагачення свідчать про чітко виражену залежність вмісту молібдену від магнітних властивостей матеріалу: у немагнітній фракції його концентрація є мінімальною і становить 0,00003 %, що відповідає фоновим значенням, тоді як у магнітній фракції відбувається різке зростання вмісту Мо до 0,01000 %, тобто більш ніж у 300 разів порівняно з немагнітною складовою, а максимальне значення зафіксовано у сильномагнітній фракції – 0,06000 %, що приблизно у 2000 разів перевищує його концентрацію в немагнітному продукті; встановлена закономірність чітко корелює зі зростанням вмісту  $Fe_2O_3$  від 6,58 % у немагнітній фракції до 30,8 % у сильномагнітній, що свідчить про тісний генетичний і фазовий зв'язок молібдену із залізовмісними мінералами, зокрема магнетитом, гематитом або їх техногенними різновидами, у складі яких молібден може перебувати в ізоморфній формі або у вигляді тонкодисперсних включень.

Відповідно, застосування магнітної сепарації є дієвим способом підвищення вмісту молібдену у масиві порід, що зумовлено поетапним залученням до процесу мінеральних фаз із різною магнітною сприйнятливістю; за умов дії слабких магнітних полів з напруженістю  $H < 10\text{--}20$  кА/м та магнітною індукцією  $B < 0,01\text{--}0,05$  Тл формується немагнітна фракція, представлена переважно кварцом і алюмосилікатами, які практично не реагують на магнітне поле та характеризуються мінімальним вмістом молібдену, тоді як використання феритових магнітів із напруженістю поля  $H \approx 50\text{--}150$  кА/м і магнітною індукцією  $B \approx 0,1\text{--}0,3$  Тл забезпечує вилучення феромагнітних і частини слабомагнітних залізовмісних мінералів (магнетиту та техногенних Fe-фаз), у складі яких концентрація молібдену істотно зростає; подальше підвищення інтенсивності магнітного впливу до  $H \approx 300\text{--}1000$  кА/м за застосування високоміцних неодимових магнітів Nd-Fe-B з індукцією  $B \approx 0,5\text{--}1,2$  Тл (локально до 1,4 Тл) приводить до формування сильномагнітної фракції, що містить слабомагнітні та тонкодисперсні фази, ізоморфно пов'язані із залізовмісними мінералами, і саме в цій зоні спостерігається максимальне концентрування молібдену.

Виходячи із вищенаведеного можна зробити науковий висновок, що *зміна концентрації молібдену у виділених фракціях при варіюванні магнітної сили джерела визначається селективністю магнітного вилучення мінеральних фаз, з якими він асоційований: слабкі магнітні поля забезпечують вилучення переважно сильномагнітних компонентів із низьким вмістом Мо, тоді як інтенсивні поля сприяють залученню слабомагнітних і тонкодисперсних фаз, що зумовлює підвищення його концентрації та вилучення молібдену у поєднанні з іншими корисними компонентами (Al, Fe, Mg, Ba, рідкоземельні метали тощо) без потреби в попередній агломерації чи високотемпературному випалі.* Реалізація такого підходу створює передумови для комплексного використання техногенних запасів із мінімальним екологічним навантаженням і зниженими витратами на підготовку сировини.

Дана підхід дає можливість підвищити вміст молібдену у масиві видобутих порід, що підвищує її економічну привабливість до промислового використання.

Виходячи із наведених у додатку Б 1.2 значень загальний математичний вираз взаємозв'язку рівня намагніченості зовнішнього поля, який також корелює з концентрацією  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , описується рівнянням другого порядку. У загальному вигляді воно має вигляд:

$$Mo_i(\varepsilon_{Fe}) = a_i \varepsilon_{Fe}^2 + b_i \varepsilon_{Fe} + c_i$$

де:  $Mo_i$  – вміст молібдену у пробі  $i$ , %;  $\varepsilon_{Fe}$  – рівень намагніченості поля (0 – немагнітна, 1 – магнітна, 2 – сильномагнітна фракція);  $i$  – номер проби;  $a_i, b_i, c_i$  – емпіричні коефіцієнти враховують вплив просторової вибірки проб та ступінь термічної обробки сировини. Візуалізація суміщених узагальнених залежностей зміни вмісту молібдену отриманих результатів дослідження проб від намагніченості поля та концентрації оксиду заліза наведено на рисунку 3.2.

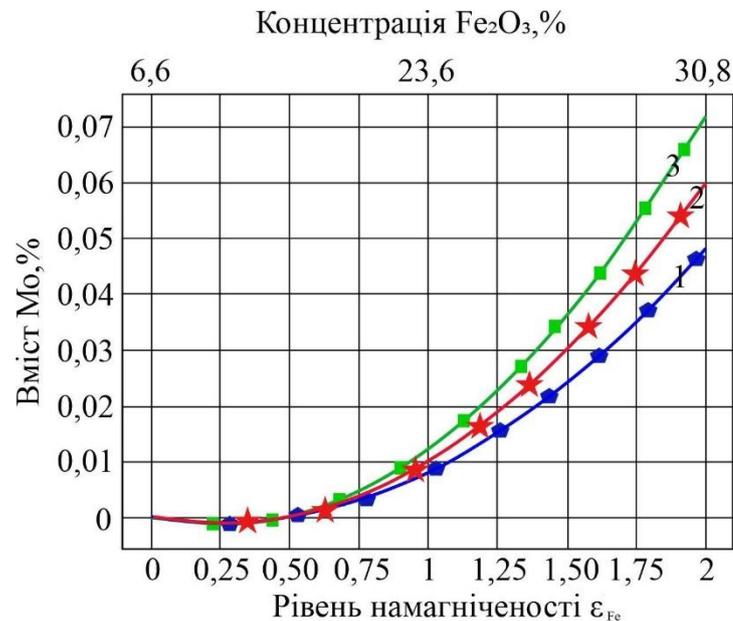


Рисунок 3.2 – Графіки суміщених узагальнених залежностей зміни вмісту молібдену від намагніченості поля: 1 – мінімальні значення; 2 усереднені значення; 3 – максимальні значення

Інтервал між кривими  $Mo_{min}$  і  $Mo_{max}$  визначає зону ймовірного збагачення молібдену (Додаток Б 1.2). Перехід до магнітної фракції супроводжується різким зростанням концентрації  $Mo$ , а сильно магнітна фракція характеризується

максимальним накопиченням молібдену, що вказує на його асоціацію з залізовмісними фазами.

Виходячи із вищенаведеного можна зробити науковий висновок, що концентрація молібдену ( $Mo_i$ ) у техногенних родовищах після вуглезбагачення описується квадратичною залежністю другого порядку від рівня намагніченості вуглевідходів ( $\epsilon_{Fe}$ ), яка, у свою чергу, корелює з концентрацією заліза та емпіричними коефіцієнтами ( $a_i, b_i, c_i$ ), що враховують просторову вибірку проб і ступінь термічної обробки сировини. Даний підхід дає можливість підвищити вміст молібдену у масиві видобутих порід, що підвищує її економічну привабливість до промислового використання.

Технологічне значення положення полягає у доцільності магнітного збагачення як етапу комплексного вилучення молібдену та інших корисних компонентів ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Mn$ , рідкоземельні елементи) із техногенних родовищ. Запропонована модель дозволяє передбачити оптимальні умови відбору фракцій, забезпечуючи максимальне вилучення  $Mo$  без попередньої агломерації чи високотемпературного випалу, а її реалізація створює передумови для комплексного та екологічно безпечного використання техногенних запасів.

У технічній та геолого-економічній літературі існує декілька підходів до визначення промислових концентрацій молібдену в рудопроявах, які залежать від генетичного типу родовища, мінералогічного складу руд, а також технологічних і економічних умов їх розробки. Для порфірових молібденових родовищ, що є основним джерелом цього металу у світі та масово відпрацьовуються у США, Китаї та Чилі, нижня межа промислової рентабельності зазвичай становить 0,05–0,10 %  $Mo$ , тоді як вміст на рівні 0,10–0,25 %  $Mo$  відповідає якісним промисловим рудам, а концентрації понад 0,25 %  $Mo$  відносять до високоякісних, але відносно рідкісних. Основною промисловою мінеральною формою молібдену є молібденіт ( $MoS_2$ ), який слугує головною сировиною для його промислового вилучення [114, 115].

З урахуванням наведених порогових значень, а також практики комплексного освоєння молібденовмісних руд та особливостей молібденових проявів в Україні [Додаток Б.1.], автор пропонує узагальнити класифікацію руд за вмістом молібдену, яка дозволяє більш диференційовано оцінювати їх промисловий потенціал: багаті:  $>0,5\%$  Мо; рядові:  $0,2\text{--}0,5\%$  Мо; бідні:  $0,1\text{--}0,2\%$  Мо; убогі:  $0,02\text{--}0,1\%$  Мо. Останні руди, у більшості випадків, отримують промислове значення, як джерело попутного вилучення молібдену. Запропонована класифікація узгоджується з сучасними уявленнями про економічну доцільність переробки молібденовмісної сировини та враховує можливість зниження порогових промислових концентрацій за рахунок технологічних факторів (часто як супутній компонент) [114-116].

Водночас для поліметалічних руд типу Cu–Mo, W–Mo або Pb–Zn–Mo, а також для відходів гірничо-добувної діяльності промислово значущими можуть вважатися значно нижчі концентрації молібдену (на рівні  $0,01\text{--}0,05\%$  Мо) за умови його вилучення як попутного компонента разом з основним металом, тоді як у техногенних родовищах і відходах збагачення економічний інтерес можуть становити навіть вмісти  $0,005\text{--}0,03\%$  Мо (назвемо їх порогові концентрації) за наявності великих обсягів матеріалу, розвиненої інфраструктури, застосування відповідним технологій видобування та комплексної переробки з вилученням не лише молібдену, а й супутніх металів і органічної складової. За таких умов зниження порогових промислових концентрацій стає можливим завдяки відкритому способу розробки, відсутності витрат на видобуток, використанню відвалів, а також залученню супутніх критичних елементів у єдиний технологічний цикл.

Відповідно, можна зробити висновок, що застосування магнітної сепарації як етапу попередньої переробки дозволяє суттєво підвищити концентрацію молібдену в окремих фракціях техногенних відходів вуглезбагачення та досягти порогових промислових значень. Такий підхід забезпечує селективне виділення молібденвмісних фаз, асоційованих із залізовмісними мінералами, що створює передумови для їх подальшого ефективного гідрометалургійного вилучення.

Отримані результати підтверджують доцільність використання магнітної сепарації як інструменту підвищення ресурсної цінності техногенних родовищ вуглезбагачення та їх залучення до промислового освоєння.

Після вилучення молібденвмісних сполук залишковий матеріал сильномагнітної фракції було залучено як вторинну мінерально-органічну сировину для синтезу гумату калію, як побічного продукту [100, 113]. Незважаючи на вилучення металів, цей залишок зберіг значну частку органічної речовини, зокрема гумінових сполук, що підтверджено візуальною оцінкою та результатами аналізу втрати маси при прожарюванні. Такі властивості забезпечують його придатність для лужної екстракції та подальшого перетворення на гумат калію, орієнтований на сільськогосподарське використання.

Запропонований підхід до послідовної переробки дозволяє реалізувати комплексне використання відходів вуглезбагачення шляхом поєднання вилучення цінних неорганічних компонентів і утилізації біологічно активної органічної складової. Це підвищує ресурсну ефективність технології та відповідає принципам циркулярної економіки.

Проте подальше підвищення концентрації молібдену у техногенних родовищах потребує застосування керованих фізико-хімічних впливів, зокрема реалізації фазових перетворень мінеральної складової під дією термічної обробки. Нагрівання матеріалу в муфельних печах створює умови для трансформації молібденвмісних та асоційованих з ними мінеральних фаз, зміни їхньої кристалічної структури й реакційної здатності, що сприяє перерозподілу молібдену між фазами та його концентрації в більш технологічно придатних формах. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність подальшого вилуговування, зменшити витрати реагентів і забезпечити більшу повноту вилучення молібдену, що в цілому підвищує економічну привабливість переробки техногенних відходів вуглезбагачення.

### 3.2. Контрольовані фазові перетворення в техногенних та природних матеріалах для підвищення концентрації молібдену у породних масивах

Для дослідження зразків техногенних і природних матеріалів з метою реалізації контрольованих фазових перетворень та підвищення концентрації молібдену у дослідних пробах застосовано високотемпературну муфельну піч FCF 16/150M. Технічні характеристики муфельної печі FCF 16/150M наведено в додатку Б.3. Попередньо подрібнену породу (див. рис. 3.1а) зволожували шляхом додавання 5–10 % води, після чого формували стандартні конусоподібні зразки. Сформовані проби розміщували у металевих тиглях, що забезпечувало стабільність геометричного положення зразків і мінімізацію похибок, пов'язаних із їх переміщенням або переорієнтацією під час нагрівання. Фотофіксація камери муфельної печі та сформованих породних зразків наведено на рисунку 3.3.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Фотофіксація процесу проведення дослідження фазових перетворень молібденомістких порід: а) – загальний вигляд камери муфельної печі FCF 16/150M із розміщеними зразками; б) – сформовані стандартні конусоподібні зразки на кеглях

Термічну обробку здійснювали в режимі безперервного нагрівання зі швидкістю 10 °C/хв до максимальної температури 1500 °C без ізотермічного витримування, у межах одного температурного інтервалу. Фіксацію морфологічних

змін зразків розпочинали з температури 500 °С. Подальшу реєстрацію зображень виконували при кожному підвищенні температури на 5 °С або при досягненні наперед заданих критичних порогів геометричних змін, а саме: 5 % зміни площі проєкції, 12 % зміни кутового параметра та 5 % зміни коефіцієнта форми.

Візуальне відтворення процесу дослідження проведено з використанням системи високотемпературного аналізу зображень ЕМІ III Hesse Instruments (високотемпературний мікроскоп), що дозволяє відстежувати зміни геометрії матеріалу під час нагрівання [117]. Кінцевою метою було наочне встановлення характерних температур термічних перетворень та деформаційних процесів у матеріалу мулистих шламів відходів вуглезбагачення. Аналіз здійснювали відповідно до норм DIN 51730 (1998-4) та ISO 540 (1995-03-15) із застосуванням методу конусів та цифрової обробки зображень. Візуальний і кількісний аналіз отриманих результатів наведено на рисунку 3.4.

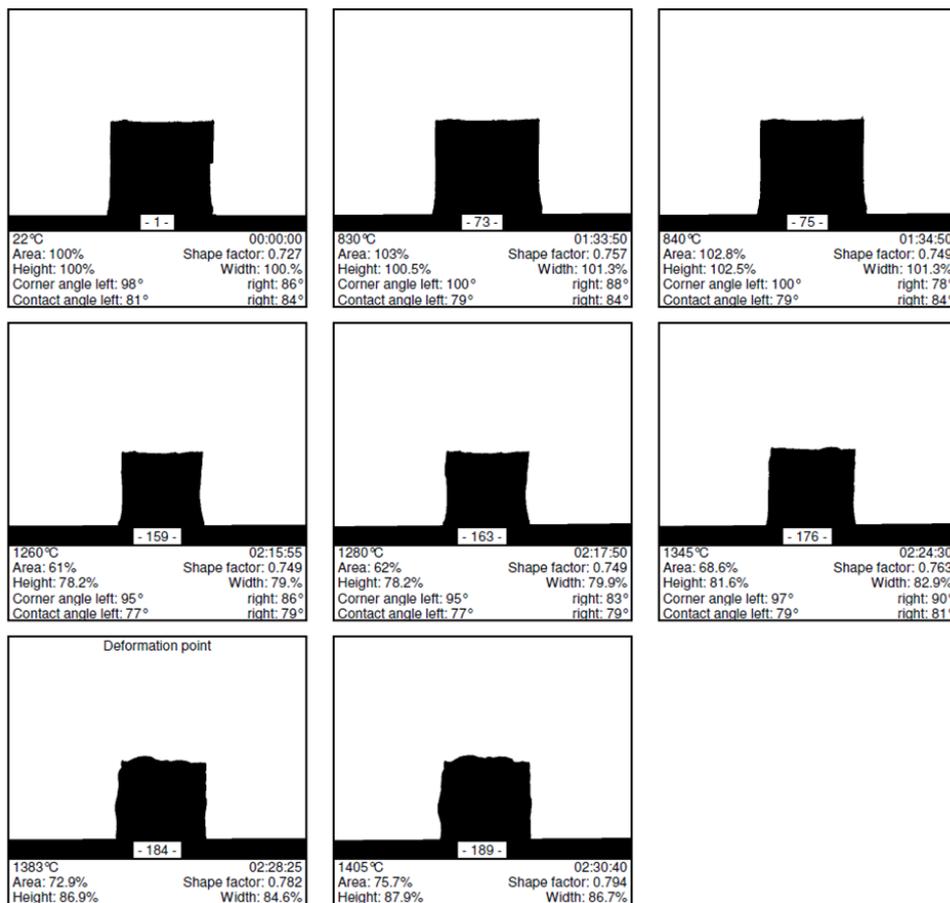


Рисунок 3.4 – Цифровий аналіз зображень зразка відходів під час термічної активації відповідно до номера дослідження та прикладених температур

Візуальний і кількісний аналіз отриманих зображень свідчить про поступовий перехід зразків від початкової конусоподібної форми до більш ізометричних конфігурацій, що зумовлено розвитком процесів спікання, розм'якшення та часткового плавлення матеріалу при високих температурах. У межах експерименту отримано понад 150 зображень, що забезпечило формування масиву з понад 1600 точок вимірювань, використаних для подальшої обробки та статистичного аналізу деформаційних характеристик.

На рисунку 3.3 представлені послідовні знімки зразка відходів вуглезбагачення під час високотемпературного нагрівання у муфельній печі. Кожне вікно показує форму та геометричні параметри проби на різних етапах нагрівання, включно з температурою ( $^{\circ}\text{C}$ ), часом експерименту, площею зразка (%), коефіцієнтом форми (shape factor), висотою, шириною та кутами контакту в лівому і правому кутках.

Початкові знімки при температурі  $22^{\circ}\text{C}$  демонструють вихідну геометрію зразка з площею 100 % і майже прямими кутами. З підвищенням температури до  $830\text{--}840^{\circ}\text{C}$  спостерігається незначне збільшення площі та коефіцієнта форми, що свідчить про початкові термічні розширення та зміни поверхневих властивостей. При температурах понад  $1200^{\circ}\text{C}$  спостерігається суттєва зміна площі (зменшення до  $61\text{--}62\%$ ) та висоти, що вказує на протікання деформаційних процесів і часткове осідання зразка. Найбільші зміни зафіксовані при  $1383^{\circ}\text{C}$ , позначеній як точка деформації, коли структура проби зазнає значних фазових перетворень і початкової пластичності. Подальше підвищення температури до  $1405^{\circ}\text{C}$  демонструє стабілізацію форми з частковим відновленням площі і висоти, що відображає завершення основних фазових змін і підготовку матеріалу до наступних фазових перетворень (спікання зразків).

Саме тому, наведене візуальне відтворення стосується фази сублімації  $\text{Mo}$  із зразків (температура понад  $750^{\circ}\text{C}$ ). Оцінку деформаційних процесів здійснювали за траєкторією зміщення лівого кутка зразка, що дозволило з достатньою точністю встановити температуру початку інтенсивної пластичної деформації, як було зазначено, яка становила  $1383^{\circ}\text{C}$ . Дана точка фактично є початковою точкою втрати

молібдену із досліджуваних зразків. Водночас інші характерні температури, зокрема температура початку спікання, формування кулеподібної та півсферичної форм, а також температура плинності, не були однозначно визначені в межах проведеного експерименту. Це, ймовірно, зумовлено складним багатокомпонентним мінералогічним складом досліджуваних матеріалів, а також накладанням твердофазних і рідкофазних перетворень, що ускладнює чітку ідентифікацію окремих стадій термічної деструкції та переформування структури. Узагальнені результати дослідження контрольованих фазових перетворення при термічній обробці до 1500 °C наведено у додатку Б.4.

Таким чином, рисунок 3.3 ілюструє динаміку геометричних змін зразка в процесі термічної обробки та дозволяє визначити ключові температури початку деформації й фазових перетворень, що є важливими для оптимізації нагрівання техногенних матеріалів з метою підвищення концентрації молібдену.

Відповідно, можна зробити висновок, що за температур вище 750–800 °C основні хімічні перетворення в досліджуваних зразках практично завершуються, а подальші зміни зумовлюються переважно фізико-хімічними та фазовими процесами. Зокрема, при підвищенні температури до близько 900 °C окиснення молібденітної складової ( $\text{MoS}_2$ ) відбувається повністю, після чого розпочинається сублімація оксиду молібдену ( $\text{MoO}_3$ ). За цих умов спостерігається зростання втрат маси зразка, що пов'язане не з вигоранням органічної речовини, а з утворенням і виносенням летких оксидних сполук.

У температурному інтервалі 1100–1300 °C процес сублімації  $\text{MoO}_3$  інтенсифікується, внаслідок чого відбувається його активний перехід у газову фазу. Це призводить до відносного збагачення твердого залишку кремнеземом, оксидами алюмінію та заліза, а також до ущільнення і спікання мінеральної матриці зразка. Формування спеченої зольної структури зменшує реакційну здатність матеріалу та ускладнює подальше вилучення цільового компонента.

Подальше підвищення температури до 1300–1500 °C супроводжується нестабільністю  $\text{MoO}_3$  у твердій фазі через його високу леткість. За цих умов можливе часткове плавлення зольної фази, а молібден або інтенсивно втрачається

внаслідок випаровування, або фіксується у складі складних молібденових сполук. З огляду на це, зазначений температурний інтервал є технологічно не вигідним для процесів, орієнтованих на ефективне вилучення молібдену.

У зв'язку з викладеним особливої актуальності набуває інтерпретація температурних інтервалів термічних ефектів і фазових перетворень сполук молібдену за результатами термічного аналізу в температурному діапазоні до 750 °С. Саме в зазначених температурних режимах відбуваються ключові процеси руйнування органічної складової та окиснення сульфідних форм молібдену без істотних втрат цільового компонента внаслідок сублімації летких оксидів. Основні стадії термічного руйнування органічної та сульфідної складових молібденовмісних відходів вуглезабагачення в у згаданому температурному інтервалі, а також характерні для них втрати маси та зміна форм перебування молібдену, узагальнено та наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Основні стадії термічного руйнування органічної та сульфідної складових молібденовмісних відходів у температурних режимах до 750 °С

Температура, °С	Основні процеси	Втрати маси	Органіка	MoS <sub>2</sub> → MoO <sub>3</sub>	Сульфідна складова
300	Легка деградація, виділення вологи та летких органічних речовин	~2–5 %	Часткове руйнування	Початкове окиснення незначне	Сульфідна складова здебільшого зберігається
450	Активне руйнування органіки, випаровування залишків летких речовин	~5–10 %	Значне руйнування	Починається часткове утворення MoO <sub>3</sub>	MoS <sub>2</sub> ще переважає, невелика частка окиснена
600	Повне руйнування органіки, інтенсивне окиснення MoS <sub>2</sub>	~10–15 %	Повне руйнування	Суттєве утворення MoO <sub>3</sub>	Сульфідна складова активно окисляється
750	Максимальне окиснення, термічна стабілізація оксидів	~15–20 %	Відсутня	Практично повне перетворення MoS <sub>2</sub> → MoO <sub>3</sub>	Сульфідні майже повністю окиснені до оксидів та SO <sub>2</sub> /сульфатів

Наведені результати та опис основних перетворень, показують що при підвищенні температури втрати маси зразків поступово зростають, що пов'язано з випаровуванням вологи, виділенням летких органічних речовин та частковим руйнуванням сульфідів із виділенням  $\text{SO}_2$ . Органічна складова руйнується переважно між 300 і 600  $^{\circ}\text{C}$ , досягаючи майже повного згоряння при 750  $^{\circ}\text{C}$ .

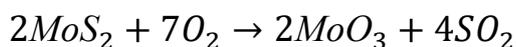
Вибірка результатів контрольованих фазових перетворень при термічній дії на дослідні зразки до температури 750  $^{\circ}\text{C}$  наведена у додатку Б.5. Вони демонструють поетапний характер руйнування органічної складової, окиснення сульфідної молібденовмісної фази та зміну складу твердого залишку залежно від температури. Для наочності та зручності аналізу отримані дані були усереднені, і середні значення основних параметрів, втрат маси, ступеня руйнування органіки, окиснення  $\text{MoS}_2$  та залишку сульфідної складової, подані у табл. 3.3. Такий підхід дозволяє узагальнити експериментальні спостереження, виявити закономірності термічних перетворень та визначити оптимальні температурні режими підготовки молібденовмісних відходів до гідрометалургійного вилуговування.

Таблиця 3.3.

Основні стадії термічного руйнування органічної та сульфідної складових молібденовмісних відходів у температурних режимах до 750  $^{\circ}\text{C}$

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Втрати маси, %	Руйнування органіки, %	Окиснення $\text{MoS}_2 \rightarrow$ $\text{MoO}_3$ , %	Сульфідна складова, % залишку
300	2,24	5,55	1,36	98,64
450	5,24	40,55	5,37	94,63
600	10,29	80,65	40,75	59,25
750	15,29	100,00	94,80	5,20

Хімічна основа даного процесу ґрунтується на окисненні молібденіту (дисульфиду молібдену,  $\text{MoS}_2$ ), що призводить до утворення оксиду молібдену ( $\text{MoO}_3$ ) та діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ) [73, 75, 118]. Реакція відбувається за схемою:



Цей процес є ключовим етапом термічної підготовки молібденовмісних відходів перед гідрометалургійним вилуговуванням. При окисненні  $\text{MoS}_2$  сульфід молібдену перетворюється на стабільний оксид  $\text{MoO}_3$ , а сірка виділяється у вигляді діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), що супроводжується частковими втратами маси зразка. Активне окиснення починається приблизно при  $450^\circ\text{C}$  і інтенсивно протікає в діапазоні  $450\text{--}600^\circ\text{C}$ , досягаючи практично повного завершення при  $750^\circ\text{C}$ . Узагальнені графіки реалізації контрольованих фазових перетворень при термічній дії на породний масив, що забезпечує окиснення  $\text{MoS}_2$  до  $\text{MoO}_3$  та підвищення концентрації молібдену наведено на рисунку 3.5.

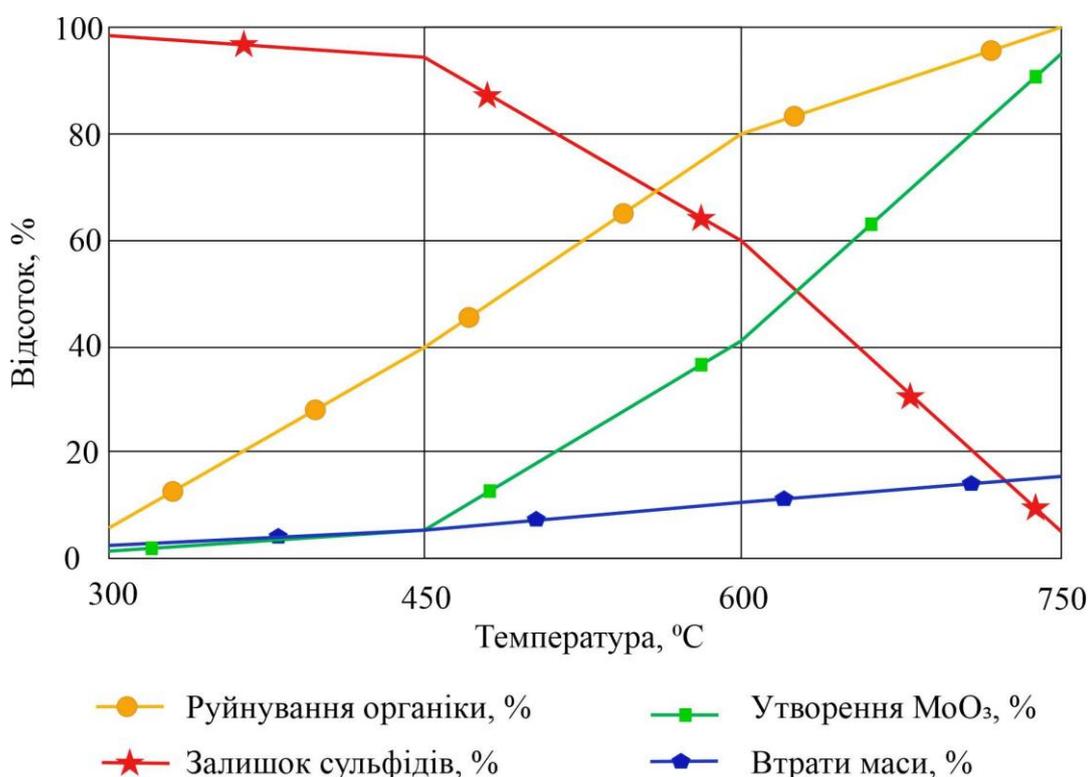


Рисунок 3.5 – Узагальнені графіки реалізації контрольованих фазових перетворень при термічній дії на породний масив, що забезпечує окиснення  $\text{MoS}_2$  до  $\text{MoO}_3$  та підвищення концентрації молібдену

Виходячи із наведених викладок, беззаперечно видно, що термічна обробка у цьому температурному інтервалі дозволяє максимально зберегти молібден у твердій фазі, підвищуючи його доступність для подальшого вилуговування, одночасно усуваючи органічні домішки та частково дезактивуючи сульфідну матрицю. Підвищення температури вище  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до сублімації  $\text{MoO}_3$ , що знижує вихід цільового компонента і ускладнює контрольоване вилучення молібдену в промислових умовах.

Відповідно можна зробити науковий висновок, що встановлено, що *результати контрольованих фазових перетворень при термічній дії до  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  показують руйнування органічної складової та окиснення сульфідних фаз із виділенням  $\text{SO}_2$  і втратою маси, тоді як за температур вище  $750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  хімічні перетворення практично завершуються й домінують фазові процеси, пов'язані з повним окисненням  $\text{MoS}_2$  та сублімацією  $\text{MoO}_3$ , в інтервалі  $1100\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  інтенсивний перехід  $\text{MoO}_3$  у газову фазу зумовлює збагачення твердого залишку тугоплавкими оксидами та спікання мінеральної матриці, а при  $1300\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  висока леткість оксиду молібдену й часткове плавлення зольної фази призводять до незворотних втрат молібдену.* Встановлені межі фазових перетворень дають можливість визначити межі застосування гідрометалургійного видобування молібдену із масивів та температурний діапазон технологічно неефективного для його вилучення.

Оцінку максимально можливої концентрації оксидної форми молібдену можна коректно виконати на основі наведеного графіка та стехіометрії перетворення  $\text{Mo}$  у  $\text{MoO}_3$  використовуючи дані результатів проведених досліджень наведених у додатку Б.5. У вихідному стані після магнітної сепарації концентрація молібдену в породному масиві становила  $0,06\text{ мас. \%}$ . Згідно з результатами термічної обробки при температурі близько  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ступінь окиснення молібденіту до  $\text{MoO}_3$  досягає приблизно  $95\text{ \%}$ , при цьому сульфідна складова зменшується до  $0\text{--}5\text{ \%}$ , а загальні втрати маси зразка становлять близько  $15\text{ \%}$ . Саме цей температурний рівень є оптимальним, оскільки забезпечує максимальне утворення  $\text{MoO}_3$  без суттєвих втрат оксиду внаслідок сублімації.

Виходячи з отриманих експериментальних даних, наведених у додатку Б.5, а також результатів зміни концентрації молібдену під час контрольованих фазових перетворень при термічній дії на дослідні зразки до температури 750 °С, представлених у додатку Б.6, встановлено, що зміна концентрації молібдену в досліджуваному температурному інтервалі найбільш адекватно описується експоненціальною залежністю. Коефіцієнт детермінації  $R^2$  у межах 0,90–0,95, що підтверджує правильність вибраного математичного механізму та дозволяє врахувати більш швидке зростання концентрації у високотемпературній частині діапазону. На основі прикладних розрахунків коефіцієнта температурного зростання  $k$  (додаток Б.5) узагальнена залежність може бути подана у вигляді:

$$C_{\text{Mo}}(T) = C_0 e^{k(T-t_0)},$$

де:  $C_0$  – початкова концентрація Мо після магнітної сепарації (при 300 °С),  $k$  – експоненціальна константа зростання, підбирається для найкращого збігу результату дослідження,  $T$  – кінцева температура (початкова фаза сублімації Мо), °С,  $t_0$  – початкова температура контрольованих термічних фазо-масових перетворень.

Візуалізацію узагальнених суміщених залежностей зміни вмісту молібдену, отриманих за результатами дослідження зразків, представлено на рисунку 3.6. Наведені залежності відображають вплив термічно індукованих фазових переходів на перерозподіл молібдену в досліджуваних матеріалах. Отримані графічні закономірності також демонструють взаємозв'язок між фазовими трансформаціями та супутніми масовими перетвореннями зразків.

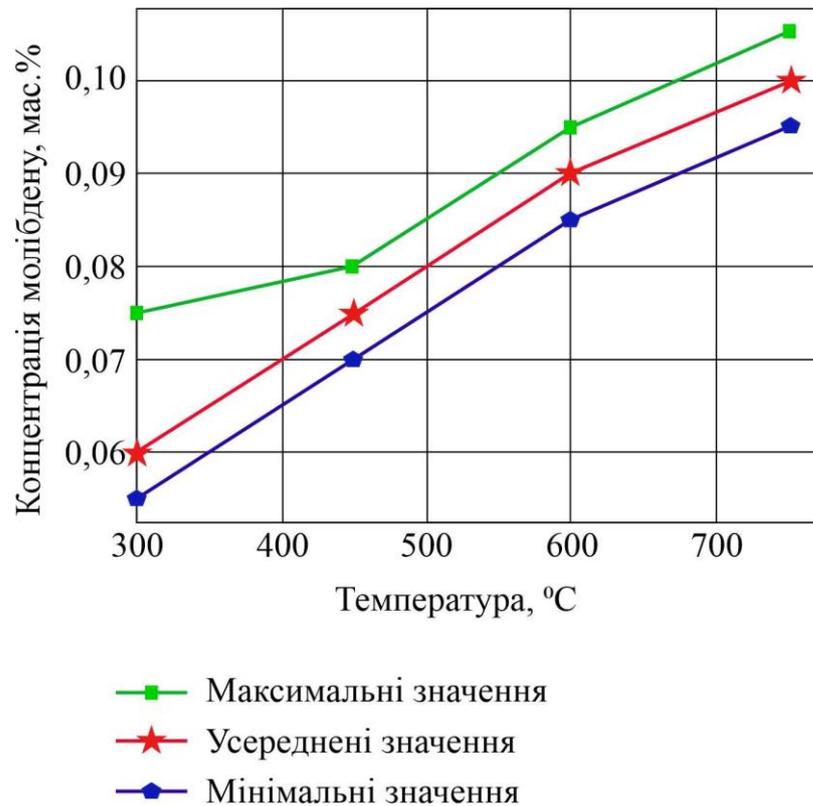


Рисунок 3.6 – Узагальнені графіки реалізації контрольованих фазових перетворень при термічній дії на породний масив до 750 °C: 1 – мінімальні значення; 2 – середні значення; 3 – максимальні значення

З урахуванням молярних мас молібдену та триоксиду молібдену перехід від елементарного Мо до  $\text{MoO}_3$  супроводжується зростанням маси відповідної фази приблизно у 1,5 рази. Виходячи із прикладових розрахунків масових переходів наведених у додатку Б.6, початковий вміст 0,06 мас. % молібдену відповідає приблизно 0,09 мас. %  $\text{MoO}_3$  у перерахунку на ту саму масу матеріалу. Врахування фазо-масових перетворень, що супроводжуються зменшенням маси зразка на 15 %, призводить до зростання ефективної концентрації  $\text{MoO}_3$  до близько 0,106 мас. %. З урахуванням неповного, але близького до максимального ступеня окиснення молібдену (близько 95 %), максимальна досяжна концентрація  $\text{MoO}_3$  становить приблизно 0,10 мас. %.

Відповідно, до наведених викладок, можна зробити науковий висновок, що на межі магнітної сепарації *оцінка інтенсивності фазо-масових перетворень найкраще описується експоненціальною залежністю, у якій зростання*

концентрації молібдену ( $C_{Mo}(T)$ ) визначається як добуток початкової концентрації молібдену  $C_0$  на експоненту, аргумент якої формує добуток температурної константи зростання, підібраної для забезпечення найкращого збігу, та різниці між кінцевою температурою  $T$  та початковою температурою  $t_0$  фазових перетворень досліджуваних зразків. Це дає можливість прогнозувати зміни концентрації молібдену у породному масиві при різних режимах термічної обробки та оптимізувати умови контрольованих фазо-масових перетворень для підвищення виходу  $MoO_3$ .

Отже, у результаті контрольованих фазо-масових перетворень при термічній дії за температури близько  $750\text{ }^{\circ}C$  відбувається майже повне окиснення молібдену до  $MoO_3$  та одночасне зменшення загальної маси зразка, що забезпечує зростання концентрації оксидної форми молібдену з початкових 0,06 до приблизно 0,10 мас. %. Таким чином, розуміння механізму окиснення та температурної залежності перетворення  $MoS_2$  у  $MoO_3$  є критично важливим для розробки ефективних технологічних схем підготовки молібденовмісних відходів до гідрометалургійного вилуговування.

Отримані результати демонструють ефективність методу аналізу зображень для точного відстеження геометричних змін матеріалів відходів вуглезбагачення у функції температури. Це становить важливий інструмент оцінки термічної поведінки техногенних та природних матеріалів, що має безпосереднє практичне значення для контролю фазових перетворень і оптимізації умов термічної обробки з метою підвищення концентрації молібдену у породних масивах та забезпечення більш повного вилучення цінного металу у промисловому процесі.

Проведені дослідження переконливо доводять, що у досліджуваних зразках відходів вуглезбагачення та молібденових рудопроявах навіть за незначних (порогових) концентрацій молібдену, унаслідок поєднання магнітної сепарації з керованими фазовими перетвореннями під дією зовнішнього температурного поля до  $750\text{ }^{\circ}C$ , можливе формування збагачених продуктів, які за своїм хімічним складом і структурними характеристиками відповідають категорії багатих руд.

Отримані концентрати характеризуються підвищеним вмістом молібдену та зниженим вмістом баластних компонентів, що істотно підвищує їх економічну привабливість і створює передумови для ефективного вилучення молібдену із застосуванням гідрометалургійних технологій.

Крім того, обмеження температурного впливу рівнем до 750 °С дозволяє запобігти втратам молібдену унаслідок сублімації оксиду  $\text{MoO}_3$  та небажаному спіканню мінеральної матриці, що є критично важливим для збереження реакційної здатності матеріалу на подальших стадіях вилуговування. Таким чином, запропонований підхід забезпечує раціональне поєднання енергетичної ефективності, технологічної керованості процесу та високого ступеня вилучення цільового компонента.

Станом на сьогодні в Україні проведено лише попередні розвідувальні роботи щодо природних молібденових родовищ, тоді як техногенні родовища відходів вуглезбагачення взагалі не розглядалися з позицій їх потенційної придатності до промислового вилучення молібдену. Унаслідок цього вітчизняна гірничо-металургійна галузь не має практичного досвіду освоєння ні природних, ні техногенних об'єктів такого типу, а також відпрацьованих технологічних схем їх переробки.

За цих умов особливої актуальності набуває аналіз наявних світових технологічних рішень у сфері збагачення та гідрометалургійного вилучення молібдену, а також розробка принципів їх аналогового перенесення та адаптації до геолого-мінералогічних, техногенних і економічних умов України. Реалізація такого підходу дозволить сформувані науково обґрунтовані передумови для залучення техногенних родовищ до мінерально-сировинної бази країни та створення власних джерел забезпечення економіки України молібденом як стратегічно важливим і критичним елементом.

### 3.3. Формування принципів аналогічності при розробці молібденових масивів

Оскільки на сучасному етапі в Україні відсутній практичний досвід промислового відпрацювання як природних, так і техногенних родовищ при видобуванні молібдену, доцільним є використання та адаптація напрацьованих світових практик реалізації відповідних технологічних процесів. Також до аналізу слід прийняти національний досвід, який застосовується при відпрацюванні інших руд. Такий підхід дозволяє мінімізувати технологічні ризики та скоротити часові й ресурсні витрати на формування власних рішень у цій сфері.

Водночас безпосереднє перенесення зарубіжного досвіду без урахування геологічних, гірничо-технічних та економічних особливостей українських родовищ є методологічно необґрунтованим. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки формалізованого інструментарію, що забезпечує кількісну оцінку подібності умов відпрацювання та обґрунтованість застосування відповідних технологічних схем.

З урахуванням постулатів, викладених у підрозділі 2.2, а також концептуальних положень, візуально відображених на рисунку 2.1, пропонується сформувати нейронну мережу на основі згрупованих наявних вихідних даних із використанням методу групового урахування аргументів (методу групового елемента). Застосування принципів машинного навчання дає змогу виявити приховані закономірності між параметрами родовищ, технологічними рішеннями та досягнутими виробничими результатами у світовій практиці [86-91, 118-119].

Результатом функціонування запропонованої нейромережевої моделі є розробка критеріїв можливості перенесення світових практик видобування молібдену в українські умови на основі введеного коефіцієнта аналогічності. Це, у свою чергу, дозволяє встановити ступінь потенційного впровадження відповідних технологічних рішень для ефективної розробки як техногенних, так і природних молібденових родовищ з урахуванням національних особливостей гірничодобувної галузі [86, 87].

Відповідно до постулатів функціонування методу групового урахування аргументів (МГУА), доцільно розглянути вихідні складові, які формують

концептуальну основу побудови нейронних мереж і алгоритмів машинного навчання. Зазначений метод ґрунтується на поетапному формуванні моделей з елементарних функціональних блоків, автоматичному відборі найбільш інформативних змінних та оптимізації структури моделі за критеріями точності й узагальнювальної здатності, що забезпечує адаптацію до складних, нелінійних і багатофакторних процесів та створює передумови для ефективного застосування інтелектуальних методів аналізу даних [88].

Система критеріїв  $X_i$  формується як сукупність кількісних та якісних показників, що забезпечують комплексну оцінку умов залягання, технологічних особливостей і ефективності відпрацювання родовищ молібденових руд. Вхідний вектор параметрів аналогічності подається у вигляді [86, 88, 91]:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

де кожен параметр  $X_i$  описує одну з ключових характеристик родовища або технології видобування молібденових руд і відображає відповідний аспект геологічної будови, гірничо-технічних умов або технологічних процесів. Формування такого вектора дозволяє представити складну багатофакторну систему у формалізованому вигляді, придатному для подальшого математичного аналізу, моделювання та порівняння об'єктів.

До складу параметрів  $X_i$  можуть входити показники, що характеризують морфологію рудного тіла (потужність, кут падіння, глибина залягання), фізико-механічні властивості вміщуючих порід і руди (міцність, тріщинуватість, щільність), якісні характеристики мінеральної сировини (вміст молібдену, мінералогічний склад, ступінь окиснення), а також гірничо-технологічні параметри (система розробки, спосіб управління гірським тиском, параметри буропідривних робіт, рівень механізації та продуктивність обладнання). Крім того, до системи критеріїв можуть бути включені економічні та екологічні показники, які визначають доцільність і ефективність промислового освоєння родовища.

Представлення характеристик родовища у вигляді вектора  $X$  створює основу для визначення ступеня аналогічності між різними об'єктами, що дозволяє

застосовувати методи багатокритеріального аналізу, кластеризації та машинного навчання для вибору раціональних технологічних рішень. Це забезпечує можливість формалізованого порівняння досліджуваного родовища з еталонними або вже освоєними об'єктами-аналогами та сприяє обґрунтованому прогнозуванню параметрів ефективної системи розробки молібденових руд з урахуванням геологічних, технологічних і економічних факторів. Причому дані відповідності є прийнятними як для природніх так і техногенних родовищ.

*Геологічні критерії* ( $X_g$ ) визначають сукупність характеристик, що відображають умови формування, залягання, структурну позицію та просторове розміщення молібденовмісних природніх і техногенних родовищ, які формуються внаслідок ендегенних геологічних процесів або як результат переробки та накопичення мінеральної сировини в межах техногенних систем. Для природніх родовищ молібдену характерна приуроченість до зон активної тектоніки та областей розвитку пізніх фаз кислого магматизму, представлених гранітами, гранодіоритами та кварцовими монцонітами, де рудоносні інтрузивні тіла мають штоковий, апікальний або жильний характер і супроводжуються розвиненою системою тріщин і розломів, що контролюють локалізацію молібденової мінералізації, представленої переважно молібденітом у парагенезисі з кварцем, піритом, халькопіритом, а також, у окремих випадках, з вольфрамітом і флюоритом.

Для техногенних родовищ, сформованих у процесі видобування, збагачення та переробки руд, геологічні критерії визначаються умовами формування техногенних масивів, їх гранулометричним складом, мінералогічними характеристиками, умовами складування та вторинними процесами трансформації мінеральної речовини. Такі об'єкти, представлені відвалами, хвостосховищами або накопичувачами відходів збагачення, характеризуються наявністю молібденовмісних мінеральних фаз, що зберігають генетичний зв'язок із первинною рудною сировиною, а також особливостями просторового розміщення, неоднорідністю складу, шаруватістю та різним ступенем ущільнення матеріалу. Важливим фактором є також вплив вторинних геохімічних процесів, зокрема окиснення, вилуговування та перерозподілу

компонентів, що можуть змінювати форму знаходження молібдену та його технологічну доступність.

Вміщуючим середовищем природних родовищ виступають гранітоїдні, вулканогенно-осадові та метаморфічні товщі, які характеризуються підвищеною тріщинуватістю та проникністю, що забезпечує циркуляцію гідротермальних флюїдів і формування метасоматичних змін, таких як калішпатизація, серицитизація, кварцювання та грейзенізація. У техногенних родовищах аналогічну роль відіграє структурна неоднорідність техногенного масиву, його пористість, проникність і ступінь дезінтеграції, які визначають умови міграції розчинів, можливість вторинного збагачення та ефективність подальшої переробки [88, 89]. Таким чином, геологічні критерії для природних і техногенних родовищ відображають як первинні умови формування рудної мінералізації, так і вторинні процеси її трансформації та концентрації. У загальному вигляді геологічні критерії оцінки молібденового родовища мають вигляд:

$$X_g = \{X_{g1}, X_{g2}, X_{g3}, X_{g4}, X_{g5}, X_{g6}, X_{g7}\}$$

де:  $X_{g1}$  – тип родовища (порфірове, штокверкове, скарнове);  $X_{g2}$  - глибина залягання рудного тіла, м;  $X_{g3}$  — потужність рудної зони, м;  $X_{g4}$  — тектонічна порушеність масиву (індекс тріщинуватості);  $X_{g5}$  – характеристика бічних порід;  $X_{g6}$  – багатоводність родовища;  $X_{g7}$  - запаси та якість рудного тіла.

*Мінералогічні критерії* ( $X_m$ ) визначають склад, структуру та кількісні співвідношення рудних і нерудних мінералів, що формують молібденові родовища, мінералогічною основою яких є молібденіт ( $MoS_2$ ), який зустрічається у вигляді тонких лусочок, листуватих агрегатів і вкраплень розміром 0,05–2,0 мм, рідше — до 5 мм, при цьому середній вміст молібдену в руді коливається в межах 0,05–0,30 % Мо і може локально зростати до 0,5–1,0 % Мо у зонах підвищеної концентрації. Супутня сульфідна мінералізація представлена переважно піритом ( $FeS_2$ ), частка якого становить 1–5 % об'єму руди, та халькопіритом ( $CuFeS_2$ ) з концентрацією 0,1–1,5 %, що обумовлює можливість попутного вилучення міді, а також, у деяких випадках, вольфрамітом або шеелітом з вмістом до 0,05–0,10 %  $WO_3$ , які мають важливе

індикаторне значення при прогнозуванні рудоносності. Основну масу нерудної частини формує кварц, частка якого становить 50–70 % об'єму руди та визначає прожилкову і штокверкову структуру, тоді як серед породоутворювальних мінералів вуглебагачення можуть бути присутні інші корисні компоненти, концентрація яких може досягати промислових значень при попередньому їх збагаченні [87-91, 118, 119]. Характерною особливістю молибденових родовищ є чітко виражена мінералогічна зональність, яка проявляється у зміні мінерального складу від центральних частин рудної системи, з підвищеним вмістом молибденіту (0,2–0,5 % Мо), до периферійних зон, де зростає частка піриту та знижується концентрація молибдену до 0,02–0,05 % Мо, що дозволяє використовувати даний критерій для прогнозування промислово перспективних ділянок і обґрунтування напрямів подальшої геолого-технологічної оцінки родовища. У загальному вигляді мінералогічні критерії оцінки молибденового родовища мають вигляд:

$$X_m = \{X_{m1}, X_{m2}, X_{m3}, X_{m4}\}$$

де:  $X_{m1}$  – середній вміст молибдену в руді, %;  $X_{m2}$  – форма знаходження молибдену (молибденіт, пов'язаний / вільний);  $X_{m3}$  – гранулометричні характеристики мінеральних агрегатів;  $X_{m4}$  – наявність супутніх корисних копалин включно із критичною сировиною.

*Технологічні критерії* ( $X_t$ ) визначають сукупність параметрів, що характеризують промислову придатність молибденових руд до видобутку та переробки, ефективність технологічних процесів і рівень вилучення корисного компонента. Одним із визначальних показників є згаданий середній вміст молибдену в руді. Вибір способу розробки визначається глибиною залягання та коефіцієнтом розкриття, який для відкритих робіт економічно доцільний у межах 3,0–5,0 м<sup>3</sup>/т при глибині кар'єру до 250–400 м, тоді як підземний видобуток застосовується на глибинах 300–800 м із використанням камерно-стовпових або підповерхових систем і коефіцієнтом вилучення запасів 0,75–0,90. Для техногенних родовищ перевагою є те, що дані родовища уже знаходяться на поверхні. З урахуванням лускуватої структури молибденіту оптимальна крупність подрібнення перед флотацією становить 70–85 % класу – 0,074 мм, що забезпечує ефективне розкриття мінеральних

зерен без переподрібнення, яке може знижувати селективність процесу. Основним методом збагачення є флотація, яка забезпечує вилучення молібдену на рівні 85–95 %, іноді до 97 %, при цьому вміст молібдену в концентраті становить 45–55 %, а вихід концентрату - 0,2–1,5 % від маси руди; у випадку комплексних руд застосовується послідовна схема вилучення мідного і молібденового концентратів. Реагентний режим флотації передбачає використання неполярних колекторів у витратах 50–200 г/т, спінювачів – 10–40 г/т і регуляторів середовища для підтримання рН на рівні 8,5–10,5, що забезпечує ефективну селекцію молібденіту та пригнічення супутніх сульфідів. Якість концентрату характеризується обмеженим вмістом домішок, що відповідає технологічним вимогам подальшої металургійної переробки. Важливими показниками технологічної ефективності також є питома водоспоживання на рівні 2,5–4,0 м<sup>3</sup>/т із можливістю оборотного використання води до 70–85 % та питома витрата електроенергії 25–45 кВт·год/т, основна частка якої припадає на процес подрібнення, тоді як технологічні втрати молібдену з хвостами зазвичай не перевищують 5–10 %, що свідчить про високий рівень ефективності збагачення і можливість додаткового вилучення металу з техногенних відходів [88, 91]. У загальному вигляді мінералогічні критерії оцінки молібденового родовища мають вигляд:

$$X_t = \{X_{t1}, X_{t2}, X_{t3}, X_{t4}, X_{t5}\}$$

$X_{t1}$  – спосіб розробки (відкритий / підземний / комбінований);  $X_{t2}$  – система розкриття та підготовки;  $X_{t3}$  – схема збагачення (флотація, гідрометалургія, хімічне вилуговування);  $X_{t4}$  – рівень комплексного вилучення металів, %;  $X_{t5}$  – енергоємність технологічного процесу.

*Екологічні критерії* ( $X_e$ ) визначають рівень впливу процесів видобування та збагачення молібденових руд на компоненти навколишнього природного середовища, зокрема водні ресурси, атмосферне повітря та земельні угіддя, і є важливою складовою оцінки екологічної безпеки гірничого виробництва. Основним потенційно небезпечним чинником при переробці природних та техногенних родовищ є утворення залишкових відходів у яких можуть залишатися сульфід сірки, що створює

ризик розвитку процесів кислотного дренажу, у зв'язку з чим необхідним є підтримання рівня рН дренажних вод не нижче 6,5–7,5 та обмеження концентрації розчиненого молібдену у виробничих і оборотних водах до 0,07 мг/л відповідно до встановлених санітарно-екологічних нормативів. Атмосферний вплив пов'язаний із утворенням пилу під час буро-підричних робіт, дроблення та транспортування рудної маси, при цьому допустима концентрація зважених частинок у робочій зоні не повинна перевищувати 4,0 мг/м<sup>3</sup>, а застосування систем зрошення, пилопригнічення та герметизації технологічного обладнання повинно забезпечувати зниження пиловиділення на рівні не менше 70–90 %, одночасно рівень шумового навантаження на межі санітарно-захисної зони обмежується значеннями 55 дБ у денний та 45 дБ у нічний період. Порушення земельних ресурсів при розробці родовищ характеризується формуванням значних обсягів відвалів і хвостосховищ із питомим утворенням відходів на рівні 1,5–2,5 т на 1 т отриманого концентрату, що обумовлює необхідність поетапної рекультивації територій із відновленням не менше 80–90 % порушених земель, а також впровадження оборотних систем водопостачання з рівнем повторного використання води 70–85 %, що забезпечує істотне зниження техногенного навантаження на довкілля та підвищує загальну екологічну ефективність функціонування гірничодобувного підприємства [86, 88, 120, 121]. У загальному вигляді мінералогічні критерії оцінки молібденового родовища мають вигляд:

$$X_e = \{X_{e1}, X_{e2}, X_{e3}\}$$

де:  $X_{e1}$  – обсяги утворення відходів, т/рік;  $X_{e2}$  – ступінь впливу на ґрунті та підземні води;  $X_{e3}$  – можливість рекультивації та повторного використання техногенних масивів.

Відповідно, ефективна розробка молібденових родовищ у сучасних умовах потребує комплексного підходу, що базується на інтегрованому врахуванні геологічних, мінералогічних, технологічних та екологічних критеріїв, оскільки ізольований аналіз окремих груп параметрів не забезпечує досягнення оптимальних

техніко-економічних і природоохоронних показників. У зв'язку з цим доцільним є застосування системної концепції оптимізації, в межах якої родовище розглядається як складна багатофакторна система «геологія – мінералогія – технологія – екологія – економіка», а всі критерії виступають взаємопов'язаними змінними, що визначають ефективність освоєння ресурсної бази. Такий підхід дозволяє забезпечити узгодження параметрів гірничих робіт, процесів переробки та природоохоронних заходів на основі єдиної методологічної та математичної основи.

Метою оптимізації є максимізація функції корисності, що характеризується техніко-економічними показниками, зокрема чистою приведеною вартістю (NPV) та коефіцієнтом вилучення молібдену, за умови дотримання встановлених екологічних обмежень. У загальному вигляді дана задача формалізується як багатокритеріальна оптимізаційна модель, де цільова функція, яка залежить від геологічних параметрів  $G$ , мінералогічних характеристик  $M$ , технологічних показників  $T$  на екологічних факторів  $E$ , при обмеженні  $E \leq E_{\text{доп}}$ , і є відображення функції:

$$F = f(G, M, T, E) \rightarrow \max(NPV, R_{Mo})$$

Реалізація такого підходу забезпечує формування науково обґрунтованих рішень щодо вибору раціональних параметрів розробки родовища, що базуються на комплексному аналізі геологічних, технологічних, економічних та екологічних факторів. Це дозволяє підвищити рівень вилучення корисного компонента, оптимізувати структуру виробничих процесів і забезпечити максимальну економічну ефективність освоєння ресурсної бази. Одночасно забезпечується мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище шляхом дотримання нормативних обмежень, зниження техногенного навантаження та впровадження ресурсощадних і екологічно безпечних технологічних рішень.

Оптимізація геологічних, мінералогічних, технологічних та екологічних критеріїв є складною багатофакторною задачею, вирішення якої можливе лише в межах єдиної інтегрованої інформаційно-аналітичної системи, що поєднує методи тривимірного геологічного моделювання, геостатистичного аналізу, інструменти

Data Science та алгоритми екологічного прогнозування. Використання 3D-блокових моделей родовища, сформованих на основі геологорозвідувальних даних, дозволяє просторово відобразити розподіл вмісту молібдену, фізико-механічних властивостей порід і структурних неоднорідностей масиву. Застосування геостатистичних методів, зокрема кригінгу та стохастичного моделювання, забезпечує підвищення достовірності оцінки запасів і дозволяє визначити зони з максимальним економічним потенціалом для першочергового відпрацювання. Паралельно використання методів Data Science і машинного навчання дає змогу встановити приховані закономірності між геологічними, мінералогічними та технологічними параметрами, що дозволяє прогнозувати показники вилучення молібдену, енерговитрати та якість кінцевого концентрату [88, 120]. Інтеграція екологічного прогнозування забезпечує оцінку впливу гірничих робіт на гідросферу, атмосферу та геомеханічний стан масиву, що дозволяє своєчасно коригувати технологічні параметри з метою мінімізації екологічних ризиків.

Застосування інтегрованого підходу дозволяє одночасно підвищити ефективність використання мінерально-сировинної бази та забезпечити екологічну безпеку виробництва. Зокрема, оптимізація параметрів відпрацювання родовища та режимів збагачення сприяє підвищенню коефіцієнта вилучення молібдену за рахунок раціонального вибору бортового вмісту, крупності подрібнення та реагентних режимів флотації. Одночасно забезпечується зниження енергетичних витрат шляхом оптимізації ступеня подрібнення, вибору енергоефективного обладнання та адаптивного керування технологічними процесами на основі цифрових моделей. Впровадження екологічно орієнтованих рішень, зокрема оборотного водопостачання, оптимізації хвостосховищ і прогнозування міграції забруднюючих речовин, дозволяє зменшити техногенне навантаження на навколишнє середовище та забезпечити відповідність нормативним вимогам. У сукупності це створює передумови для забезпечення довгострокової стійкості гірничого підприємства, підвищення його економічної конкурентоспроможності та зниження екологічних ризиків протягом усього життєвого циклу розробки родовища.

Для забезпечення порівнюваності різнорідних параметрів, що характеризують геологічні, технологічні, економічні та екологічні аспекти функціонування гірничого підприємства, використовується процедура нормалізації, яка дозволяє привести всі показники до безрозмірної шкали. Нормалізована форма параметра визначається за залежністю:

$$\varphi_i = 1 - \frac{|X_i - X_i^{et}|}{X_i^{max} - X_i^{min}}$$

де:  $X_i^{et}$  – значення відповідного параметра для еталонного або аналогового підприємства, що характеризується оптимальними техніко-економічними показниками, а  $X_i^{max}$  і  $X_i^{min}$  — відповідно максимальне і мінімальне значення параметра у світовій базі даних. Отримане нормалізоване значення  $\varphi_i$  змінюється в межах від 0 до 1, де значення, близькі до 1, відповідають оптимальному або еталонному рівню параметра, а значення, близькі до 0, свідчать про значне відхилення від раціональних умов функціонування. Використання нормалізованих показників дозволяє сформулювати інтегральні критерії оптимізації, застосовувати багатофакторні моделі прогнозування та забезпечити об'єктивне порівняння ефективності різних технологічних і гірничих рішень.

Відповідно, на першому етапі коефіцієнт аналогічності  $K_{ан}$  визначається у вигляді лінійно-зваженої суми часткових критеріїв, що відображає інтегральну міру подібності досліджуваного об'єкта до еталонного за сукупністю параметрів. Математично ця залежність має вигляд:

$$K_{ан} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \varphi_i, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

де  $\varphi_i$  – нормоване значення  $i$ -го критерію аналогічності, яке характеризує ступінь відповідності досліджуваного об'єкта базовому за окремою ознакою (геологічною, технологічною, економічною, екологічною тощо)  $i$ , як правило, набуває значень у діапазоні від 0 до 1;  $w_i$  – ваговий коефіцієнт важливості  $i$ -го критерію, який відображає його відносний внесок у загальну оцінку аналогічності;  $n$  – загальна кількість критеріїв.

Відповідно, нелінійна нейромережева форма (узагальнена) з урахуванням складних взаємозв'язків між критеріями коефіцієнт аналогічності техніко-технологічних рішень  $K_{ан}$  остаточний вигляд має форму у вигляді багатокомпонентної функції:

$$K_{ан} = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = \mathcal{NN}(\sum_{i=1}^n w_i \cdot \varphi_i),$$

де:  $K_{ан}$  – коефіцієнт аналогічності техніко-технологічних рішень;  $X_i$  – вхідні параметри, що характеризують гірничо-геологічні, технічні та технологічні умови родовища;  $\varphi_i$  – нормалізовані показники аналогічності за окремими критеріями;  $w_i$  – вагові коефіцієнти значущості відповідних параметрів;  $n$  – кількість параметрів оцінювання;  $\mathcal{NN}(\cdot)$  нелінійна багатошарова функція, реалізована засобами нейронних мереж та штучного інтелекту.

Відповідно, виходячи із наведених викладок можна зробити науковий висновок, що коефіцієнт аналогічності ( $K_{ан}$ ), що слугує критерієм відповідності для формування системи розкриття, підготовки, розробки молибденових руд та визначається багатокомпонентною функцією за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту ( $\mathcal{NN}(\cdot)$ ) і ґрунтується на багатокомпонентних базах даних наявних техніко-технологічних впроваджень підприємств ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ), нормалізованих за ваговими показниками аналогічності ( $\varphi_i, w_i$ ), котрі уже провадять видобування молибденових руд із природних та техногенних родовищ. Це дозволяє з високим рівнем відповідності запропонувати техніко-технологічних супровід комплексного видобування молибденових руд із супутнім вилученням інших корисних копалин виходячи із наявного світового та національного досвіду роботи підприємств із аналогічними гірничо-геологічними умовами.

Інтерпретація коефіцієнта аналогічності показує придатність досліджуваного природного або техногенного родовища до застосування існуючих технологічних, технічних і організаційних рішень, що були апробовані на об'єктах-аналогах. Чим вищим є значення коефіцієнта  $K_{ан}$ , тим більшою є подібність геологічних,

мінералогічних, технологічних та екологічних характеристик об'єкта, а отже, тим меншою є необхідність у суттєвій модифікації параметрів видобування, переробки та управління виробничими процесами. У абсолютних величинах  $K_{ан}$  має визначення:

- $K_{ан} \geq 0,85$  – висока аналогічність, можливе пряме впровадження технологій;
- $0,65 \leq K_{ан} < 0,85$  – часткова аналогічність, потрібна адаптація;
- $K_{ан} < 0,65$  – низька аналогічність, необхідна розробка нових рішень.

Обчислення коефіцієнта здійснюється із застосуванням методів нейронних мереж і машинного навчання, навчених на багатокomпонентних базах даних техніко-технологічних впроваджень підприємств, які вже здійснюють видобування молібденових руд у світі. Нелінійна функція  $\mathcal{NN}$  дозволяє врахувати складні взаємозв'язки між параметрами, що не піддаються класичному аналітичному опису.

Значення коефіцієнта  $K_{ан}$ , близьке до 1, свідчить про високий рівень аналогічності умов і технологій, що дає змогу з високою достовірністю рекомендувати техніко-технологічний супровід комплексного видобування молібденових руд із супутнім вилученням інших стратегічно важливих компонентів.

### 3.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. Достовірність оцінки природних і техногенних родовищ після вуглезбагачення забезпечується застосуванням науково обґрунтованої системи пробовідбору, що враховує їх структурну та хімічну неоднорідність. Використання стратифікованого відбору, контрольних проб і стандартизованих процедур підготовки дозволяє отримати репрезентативні результати та забезпечує надійну основу для визначення вмісту молібдену й обґрунтування подальших технологічних рішень щодо комплексної переробки сировини.

2. Магнітна сепарація є ефективним методом попереднього збагачення техногенних відходів, що забезпечує селективне концентрування молібдену у сильномагнітній фракції завдяки його зв'язку із залізовмісними мінералами. Встановлена залежність між намагніченістю матеріалу, вмістом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та концентрацією молібдену підтверджує можливість підвищення його вмісту до промислово значущих рівнів, що створює передумови для ефективного гідрометалургійного вилучення та економічно доцільної комплексної переробки сировини.

3. Контрольована термічна обробка техногенних і природних молібденовмісних матеріалів у температурному діапазоні до  $750\text{ }^\circ\text{C}$  забезпечує повне руйнування органічної складової та інтенсивне окиснення молібденіту ( $\text{MoS}_2$ ) до оксиду молібдену ( $\text{MoO}_3$ ) без суттєвих втрат цільового компонента внаслідок сублимації. Це створює оптимальні умови для підвищення доступності молібдену та ефективної підготовки матеріалу до подальшого гідрометалургійного вилучення.

4. Доведено, що підвищення температури понад  $750\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$  є технологічно недоцільним, оскільки супроводжується сублимацією леткого оксиду молібдену ( $\text{MoO}_3$ ), інтенсифікацією фазових перетворень, спіканням мінеральної матриці та частковим плавленням зольної фази, що призводить до незворотних втрат молібдену та зниження ефективності його подальшого вилучення. Найбільш інтенсивні втрати спостерігаються в інтервалі  $1100\text{--}1500\text{ }^\circ\text{C}$ , де домінують процеси

переходу молібдену в газову фазу та формування стійких мінеральних структур, що ускладнює їх гідрометалургійну переробку.

5. Встановлено, що зміна концентрації молібдену під час контрольованих фазових перетворень з високою ступенем достовірності описується експоненціальною залежністю від температури, що дозволяє прогнозувати ступінь збагачення матеріалу та оптимізувати режими термічної обробки. Поєднання магнітної сепарації та контрольованого нагрівання до 750 °С забезпечує формування збагачених продуктів із підвищеним вмістом молібдену та покращеними технологічними характеристиками, що створює науково обґрунтовані передумови для ефективного застосування гідрометалургійних технологій вилучення молібдену з природних і техногенних родовищ.

6. Ефективне впровадження технологій видобування молібдену в Україні можливе за умови адаптації світового та національного досвіду з урахуванням специфічних геологічних, мінералогічних, технологічних, економічних та екологічних особливостей природних і техногенних родовищ. Формалізація цих умов у вигляді системи критеріїв та параметричного вектора  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  створює наукову основу для об'єктивного порівняння родовищ, прогнозування ефективності технологічних рішень і обґрунтованого вибору раціональних параметрів їх промислового освоєння.

7. Застосування нейромережевої моделі на основі методу групового урахування аргументів і використання коефіцієнта аналогічності  $K_{ан}$ , визначеного за нормалізованими багатокритеріальними показниками, забезпечує кількісну оцінку відповідності досліджуваних родовищ об'єктам-аналогам. Це дозволяє обґрунтовано визначити можливість прямого впровадження, адаптації або розробки нових технологічних рішень, підвищити ефективність комплексного видобування молібдену, мінімізувати технологічні ризики та забезпечити економічно і екологічно доцільне освоєння як природних, так і техногенних ресурсів.

Основні результати третього розділу опубліковано в наукових працях [62], [100], [112], [113], [118], [119]

## РОЗДІЛ 4

### ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИДОБУВАННЯ МОЛІБДЕНОВИХ РУД В УКРАЇНІ

#### **4.1. Фактори, що обмежують застосування запропонованих технологій гідрометалургійного вилуговування техногенних і природніх молібденових руд**

Застосування технологій гідрометалургійного вилуговування техногенних і природніх молібденових руд супроводжується низкою технологічних та сировинних обмежень. Ефективність процесу значною мірою залежить від мінералогічного складу руди, ступеня дисперсності молібденовмісних фаз, а також наявності супутніх компонентів, які можуть ускладнювати селективність вилуговування. Для техногенних відходів додатковою проблемою є неоднорідність складу матеріалу, змінність фізико-хімічних властивостей та можливість утворення вторинних сполук, що знижують вилучення цільового компоненту. Крім того, підвищений вміст глинистих і карбонатних домішок може призводити до збільшення витрат реагентів, погіршення фільтраційних характеристик пульпи та ускладнення подальших стадій очищення продуктивних розчинів.

Суттєвими обмежувальними чинниками також виступають економічні та екологічні аспекти впровадження гідрометалургійних технологій. Значні витрати на реагенти, енергетичні ресурси та утилізацію відпрацьованих розчинів можуть знижувати рентабельність переробки бідних або складних за складом руд. Одночасно процеси вилуговування потребують суворого контролю за поведінням із рідкими відходами та запобіганням міграції токсичних елементів у навколишнє середовище [45, 116, 122]. Додаткові труднощі пов'язані з необхідністю адаптації лабораторно обґрунтованих режимів до промислових масштабів, що вимагає проведення дослідно-промислових випробувань та розроблення ефективних схем замкненого водообігу. У зв'язку з цим актуальним є подальше вдосконалення технологічних параметрів процесу та пошук комбінованих методів переробки, спрямованих на підвищення комплексності використання сировини.

Недостатній рівень комплексних досліджень і обмежений практичний досвід освоєння молібденових родовищ та рудопроявів в Україні суттєво стримують розвиток відповідних технологій їх видобування й переробки. У зв'язку з цим виникає потреба у систематизації встановлених обмежень щодо практичного застосування результатів дисертаційних досліджень, а також у визначенні перспективних напрямів їх подолання та подальшого вдосконалення технологічних рішень.

*Мінералогічні та геохімічні особливості сировини.* Ефективність гідрометалургійного вилуговування молібденових руд значною мірою визначається мінералогічним складом вихідної сировини та формою знаходження молібдену. Наявність складних сульфідних асоціацій, тонковкраплених або інкапсульованих молібденовмісних фаз у породній масі істотно ускладнює доступ реагентів до цільового компоненту та знижує ступінь його вилучення [62, 73, 113, 123]. Для техногенних відходів додатковим обмеженням є їх висока неоднорідність, яка обумовлює нестабільність технологічних параметрів процесу та потребує індивідуального підбору режимів вилуговування.

*Фізико-механічні властивості матеріалу.* Гранулометричний склад, пористість, вологість та міцність руд і відходів істотно впливають на кінетику вилуговування та ефективність масообмінних процесів. Підвищений вміст глинистих фракцій або дрібнодисперсних частинок може призводити до погіршення фільтраційних характеристик пульпи, утворення щільних осадів і зниження проникності реагентів. У свою чергу, висока міцність природних руд потребує додаткових енерговитрат на подрібнення, що знижує загальну економічну ефективність технології.

*Реагентний та технологічний фактор.* Процеси вилуговування молібдену часто потребують використання агресивних або високовартісних реагентів, а також суворого контролю параметрів температури, кислотності та окисно-відновного потенціалу середовища. Наявність супутніх металів і домішок може призводити до підвищеної витрати реагентів та утворення складних багатокомпонентних розчинів, що ускладнює подальше вилучення молібдену з продуктивних розчинів. Крім того,

масштабування лабораторних результатів до промислового рівня потребує додаткових дослідно-промислових випробувань і оптимізації технологічних схем.

*Економічні обмеження.* Рентабельність гідрометалургійного вилуговування значною мірою залежить від вмісту молібдену у вихідній сировині, витрат на реагенти, енергоресурси, підготовку матеріалу та очищення продуктивних розчинів. Для бідних або складних за складом техногенних матеріалів собівартість переробки може перевищувати економічно допустимі значення. Додаткові фінансові витрати пов'язані з необхідністю створення спеціалізованої інфраструктури, систем замкненого водообігу та очисних споруд.

*Екологічно-санітарні обмеження.* Застосування гідрометалургійних технологій вилуговування молібденових руд супроводжується утворенням значних обсягів рідких і твердих відходів, які можуть містити токсичні сполуки важких металів, залишкові реагенти та продукти їх взаємодії. За відсутності ефективних систем очищення та утилізації відпрацьованих розчинів підвищується ризик забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, а також формування техногенного навантаження на прилеглі території [109, 118, 123]. Додатковими обмежувальними чинниками виступають вимоги щодо забезпечення санітарної безпеки персоналу та необхідність впровадження складних систем екологічного моніторингу, що підвищує загальні витрати на реалізацію технологій.

*Нормативні бар'єри.* Суттєвим стримувальним фактором впровадження технологій переробки молібденових руд є недосконалість нормативно-правової бази, яка регламентує використання техногенної та природної мінеральної сировини. Зокрема, в Україні відсутні чітко регламентовані підходи до класифікації молібденових руд і техногенних утворень, що ускладнює їх геолого-економічну оцінку та вибір ефективних технологічних схем переробки. Окрім цього, чинні нормативні документи часто не повною мірою узгоджені з міжнародними та європейськими стандартами у сфері раціонального використання надр, поводження з відходами та екологічної безпеки, що створює додаткові труднощі для впровадження інноваційних технологічних рішень.

*Недостатність та недосконалість даних геологорозвідувальних робіт.*

Обмеженість достовірної інформації щодо запасів, якості та просторового розповсюдження молібденовмісної сировини суттєво ускладнює обґрунтування доцільності застосування гідрометалургійних технологій. Значна частина наявних геологорозвідувальних матеріалів була сформована за застарілими методиками та не враховує сучасні вимоги до комплексної оцінки мінеральної сировини, зокрема визначення форм знаходження молібдену та його технологічної придатності до вилуговування. Недостатня деталізація геолого-технологічних параметрів родовищ і техногенних об'єктів ускладнює прогнозування ефективності переробки та підвищує технологічні ризики під час промислового освоєння.

*Відсутність стимулів з боку держави.* Розвиток технологій гідрометалургійної переробки молібденовмісної сировини значною мірою стримується недостатнім рівнем державної підтримки інноваційних проєктів у сфері комплексного використання мінеральних ресурсів. Відсутність ефективних механізмів фінансового стимулювання, податкових пільг, інвестиційних програм та грантової підтримки знижує зацікавленість промислових підприємств у впровадженні нових технологій. Крім того, недостатній розвиток державних стратегій щодо освоєння критично важливої мінеральної сировини обмежує можливість залучення інвестицій і формування довгострокових програм розвитку галузі.

#### **4.2. Технологія підземного видобування молібденових руд на прикладі Вербинського рудопроаяву**

За результатами геолого-пошукових робіт у межах Українського щита встановлено численні рудопроаяви молібдену, що належать до мідно-молібденової, молібденової та вольфрам-молібденової формацій. Зруденіння представлене переважно штокверками, жилами та прожилково-вкрапленими зонами. Найбільш перспективною є Устинівська площа Пержанського рудного поля, де виділено чотири штокверкові рудопроаяви (Вербинський, Устинівський, Річицький і Високий) із

підрахованими запасами категорії С2 та перспективними ресурсами. У межах Середнього Придніпров'я також встановлено Східно-Сергіївський рудопрояв, представлений лінійно-штокверковими та штокверковими золото-молібденовими зонами, для якого оцінено перспективні ресурси до глибини 300 м (кат. Р1) і 300–500 м (кат. Р2). Найбільші рудопрояви молібдену позначено на рисунку 4.1 [110, 124].

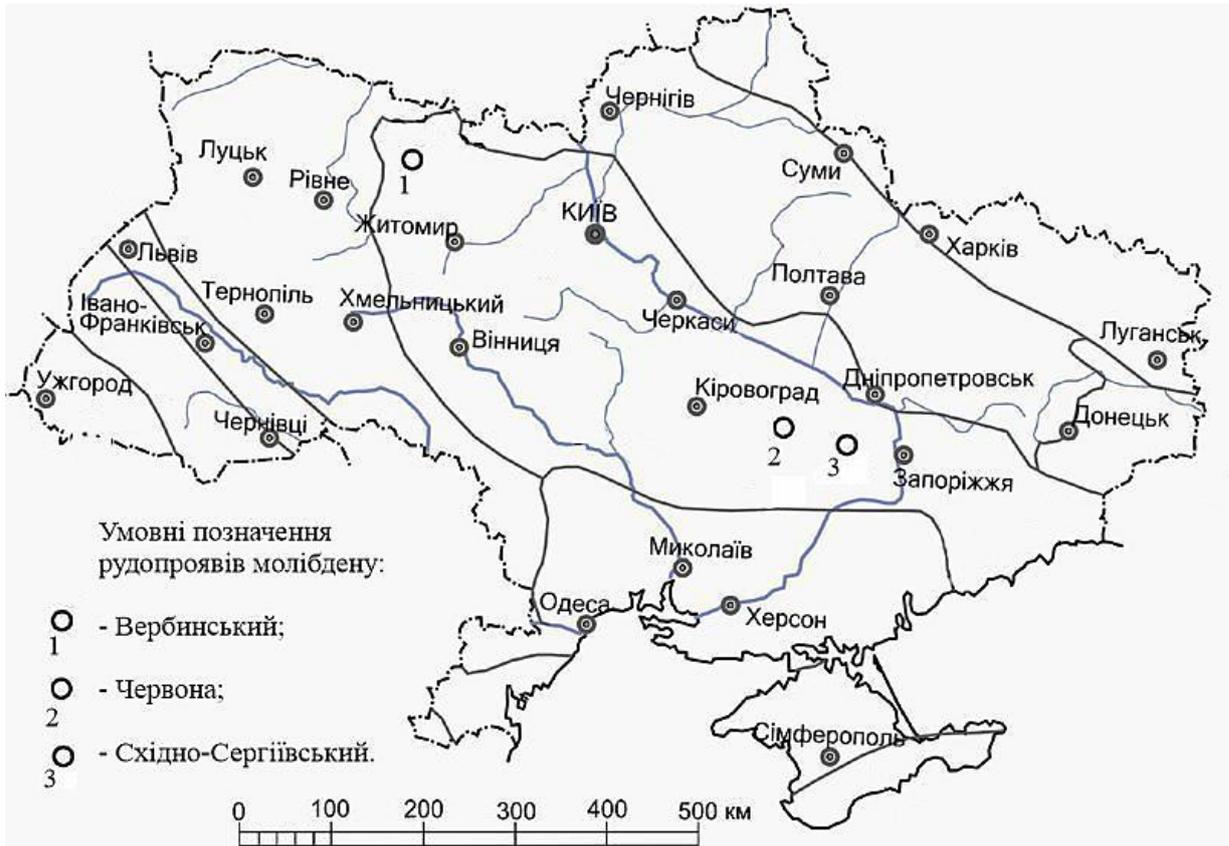


Рисунок 4.1 – Схема розташування основних рудопроявів молібдену України

Найбільш детально геологічно вивченим є Вербинський рудопрояв, що обумовлює його вибір як базового об'єкта для обґрунтування системи розробки молібденового покладу. Рудні тіла пов'язані з інтрузивами кислого складу (граніти, гранодіорити) та приурочені переважно до апікальних частин інтрузій і зон тектонічних порушень. Глибина їх залягання змінюється від 20 до 500 м, при цьому найбільш перспективними для промислового освоєння є інтервали 120–300 м, що визначає доцільність застосування підземного способу видобування. Гідрогеологічні умови характеризуються помірними водопритоками на рівні 5–30 м<sup>3</sup>/год на горизонт із можливим зростанням до 50–80 м<sup>3</sup>/год у межах розломних зон, де основні водоносні горизонти пов'язані з тріщинно-жильними структурами. Вмісні породи

загалом є стійкими, однак у зонах грейзенізації та серицитизації виникає потреба у застосуванні посиленого кріплення та заходів з регулювання гірського тиску.

4.2.1. *Вибір системи розробки молібденового родовища на основі коефіцієнта аналогічності ( $K_{ан}$ )*. Виходячи із викладок підрозділу 3.4. та досвіду застосування технологій відпрацювання руд зі схожими гірничо-геологічними умовами, для Вербинського рудопрояву молібдену обґрунтовано прийнято підповерхово-камерну систему розробки із закладанням виробленого простору. Застосування цієї системи підтверджено практикою експлуатації родовищ із аналогічними параметрами залягання, фізико-механічними властивостями вмісних порід і гідрогеологічними умовами, зокрема при видобутку залізних руд на шахтах ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат» та уранових руд на шахтах ДП «СхідГЗК». Розрахунок коефіцієнта аналогічності ( $K_{ан}$ ) наведено у додатку Б.7. Його значення ( $K_{ан} \approx 0,81$ ) підтверджує високий рівень відповідності геологічних, технологічних і гірничотехнічних умов досліджуваного об'єкта до родовищ-аналогів, що свідчить про можливість ефективного застосування даної системи з мінімальною адаптацією її параметрів. Це забезпечує підвищення коефіцієнта вилучення запасів, стабільність гірничих виробок, зниження геомеханічних ризиків та створює передумови для економічно ефективного і екологічно безпечного освоєння молібденового покладу.

Наведені розрахунки у додатку Б.7 підтверджують правильність викладок підпункту 3.4., що при розробці нових молібденових родовищ математичний механізм на основі встановленого коефіцієнта аналогічності ( $K_{ан}$ ) є дієвим підходом до обґрунтування вибору раціональних систем розробки та технологічних параметрів видобування. Його застосування дозволяє забезпечити об'єктивну кількісну оцінку відповідності гірничо-геологічних умов досліджуваного родовища до об'єктів-аналогів, що вже перебувають у промисловій експлуатації. Це, у свою чергу, створює науково обґрунтовану основу для прийняття ефективних інженерних рішень, спрямованих на підвищення рівня вилучення корисного компонента та забезпечення економічної доцільності освоєння молібденових покладів.

4.2.2. *Геомеханічне обґрунтування технології відпрацювання запасів*. Виходячи з положень, наведених у підрозділі 2.6, оцінку зміни напружено-деформованого стану

масиву гірських порід пропонується здійснювати на основі визначення зон непружних деформацій (ЗНД), що формуються у межах рудного тіла, а також у породах висячого і лежачого боку. Такий підхід дозволяє встановити області концентрації напружень і потенційної втрати стійкості масиву в умовах проведення гірничих виробок. З урахуванням геологічної будови досліджуваного об'єкта встановлено, що породи висячого і лежачого боку характеризуються близькими фізико-механічними властивостями, що обґрунтовує можливість їх розгляду як середовищ з однаковими напружено-деформованими характеристиками в межах прийнятої розрахункової моделі.

Для дослідження напружено-деформованого стану прийнято типову геометрію підземної виробки з шириною у проходці  $B_{пр} = 3,8$  м і висотою  $H_{пр} = 3,65$  м. З метою мінімізації впливу крайових ефектів та забезпечення коректності чисельного моделювання, розміри розрахункової області прийнято рівними  $20 \times 20 \times 20$  м за шириною, висотою та довжиною відповідно, що дозволяє адекватно відтворити напружений стан масиву у зоні впливу виробки.

Враховуючи, що для умов Вербинського родовища молибденових руд характерною є значна тектонічна порушеність і розвинена літологічна тріщинуватість, при виконанні статичного аналізу в модулі SolidWorks Simulation міцнісні характеристики масиву визначалися з урахуванням його структурного ослаблення. Зокрема, розрахункове значення межі міцності масиву гірських порід на стискання визначалося шляхом введення коефіцієнта структурного ослаблення, який враховує вплив тріщинуватості та порушеності масиву, за залежністю:

$$\sigma_{мас} = \sigma_{ст} \cdot K_c, \text{ МПа}, \quad (4.1)$$

де:  $\sigma_{ст}$  – межа міцності порід на одноосьовий стиск у зразку, МПа;  $K_c$  – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, який для умов Вербинського родовища прийнято рівним 0,4.

Застосування зазначеного підходу дозволяє більш достовірно врахувати реальні геомеханічні умови залягання рудного тіла та отримати обґрунтовані результати щодо

формування зон непружних деформацій і оцінки стійкості масиву гірських порід у зоні впливу гірничих виробок. Узагальнені фізико механічні властивості моделі масиву наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

## Фізико механічні властивості моделі масиву

Назва породи або руди	Фізико-механічні властивості					
	Модуль пружності, $\times 10^{10}$ Па	Коефіцієнт Пуассона	Модуль зсуву, $\times 10^{10}$ Па	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Межа міцності на розтягання, $\times 10^6$ Па	Межа міцності на стискання, $\times 10^6$ Па
Молібденова руда	4,8	0,25	1,92	2700	4,8	48
Породи (граніти) всячого та лежачого боків	5,6	0,25	2,24	2600	56	56

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо гірничої виробки визначальним параметром є величина природного гірського тиску, що формується під дією ваги перекриваючих порід. Даний тиск використовується як основне навантаження при постановці задачі статичного аналізу та визначає початковий напружений стан геологічного середовища. Величина гірського тиску визначається відповідно до гіпотези гідростатичного розподілу напружень як добуток середньої об'ємної ваги гірських порід на глибину залягання виробки [105, 108, 125]:

$$P_m = \gamma \cdot H, \text{ Па}, \quad (4.2)$$

де  $\gamma$  – середня щільність гірських порід, що дорівнює  $\gamma = 27 \text{ кН/м}^3$ ;  $H$  – глибина розташування гірничої виробки, м.

Чисельне моделювання виконувалося методом скінченних елементів із використанням просторової сітки, що забезпечує дискретизацію геометричної області на окремі розрахункові елементи. Сітка скінченних елементів була сформована з урахуванням геометрії виробки та забезпечувала підвищену щільність елементів у приконтурній зоні, де очікується максимальна концентрація напружень і формування зон непружних деформацій. Прийняті граничні умови та схема прикладення навантажень забезпечують адекватне відтворення реального напружено-деформованого стану масиву гірських порід у зоні впливу підземної виробки. Схема скінченно-елементної сітки, а також прийняті граничні умови та прикладені навантаження наведені на рисунку 4.2.

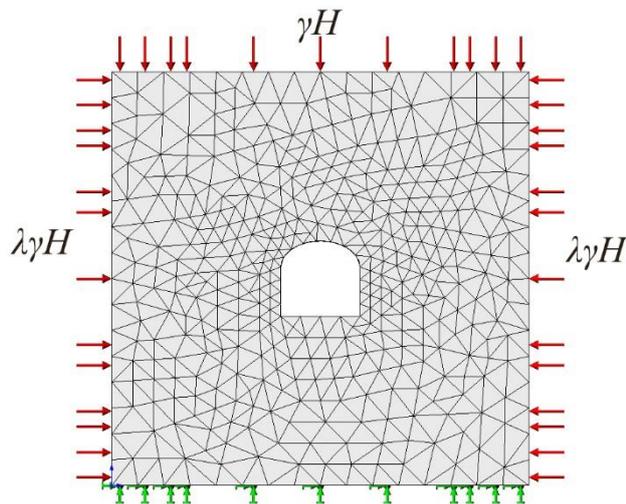


Рисунок 4.2. – Схема формування сітки скінченних елементів, обмежень та навантаження моделі

Результати моделювання зон непружних деформацій (ЗНД) у масиві рудного тіла та в масиві бічних порід навколо гірничої виробки на горизонтах 120, 210 та 300 м наведено на рисунку 4.3.

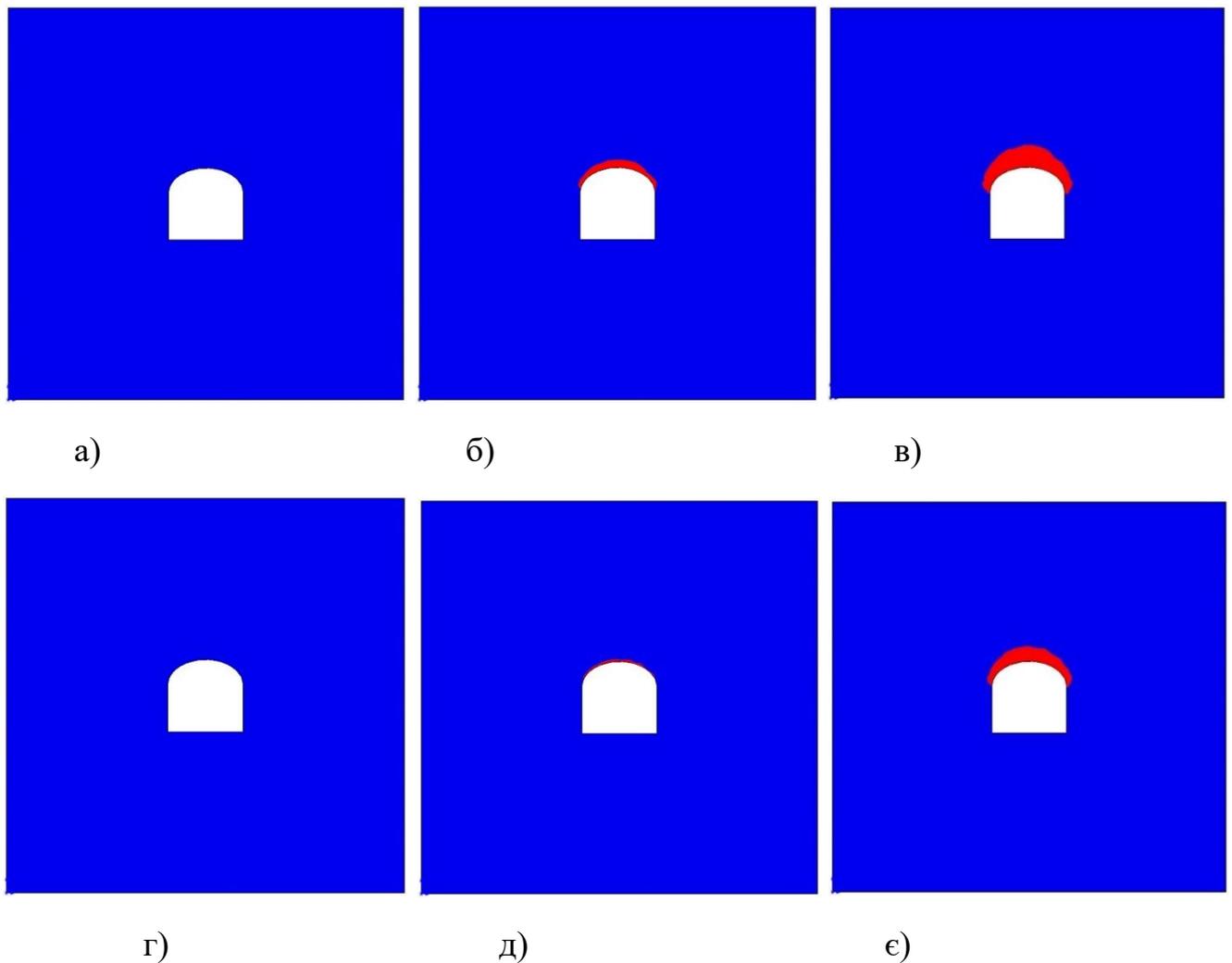


Рисунок 4.3 – Результати моделювання зон непружних деформацій (ЗНД), що формується навколо гірничої виробки, у масиві рудного тіла: а) – горизонт 120 м; б) горизонт – 210 м; б) горизонт – 300 м; у масиві бічних порід: г) – горизонт 120 м; д) горизонт – 210 м; є) горизонт – 300 м

На рисунку 4.3 наведено результати чисельного моделювання формування зон непружних деформацій (ЗНД) у масиві гірських порід навколо підземних виробок на різних горизонтах (120, 210 та 300 м). Синім кольором показано пружний стан масиву, а червоним – області розвитку непружних деформацій, що концентруються переважно у покрівлі виробки. У масиві руди (рисунок 4.3, а, б, в) та бічних порід (рисунок 4.3, г, д, є) спостерігається зростання розмірів і інтенсивності ЗНД із збільшенням глибини залягання виробки: для руди величина ЗНД у покрівлі

становить  $U = 0$  м (120 м), 0,4 м (210 м) та 1,2 м (300 м), для бічних порід –  $U = 0$  м (120 м), 0,15 м (210 м) та 0,85 м (300 м).

За результатами чисельного моделювання отримано графіки залежності величини зони непружних деформацій (ЗНД) у покрівлі гірничих виробок від глибини їх розташування, що наведено на рисунку 4.4. Аналіз отриманих залежностей свідчить про закономірне збільшення розмірів ЗНД зі зростанням глибини, що обумовлено підвищенням гірського тиску та відповідним зростанням напружено-деформованого стану масиву. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів кріплення та забезпечення стійкості гірничих виробок на різних глибинах їх експлуатації.

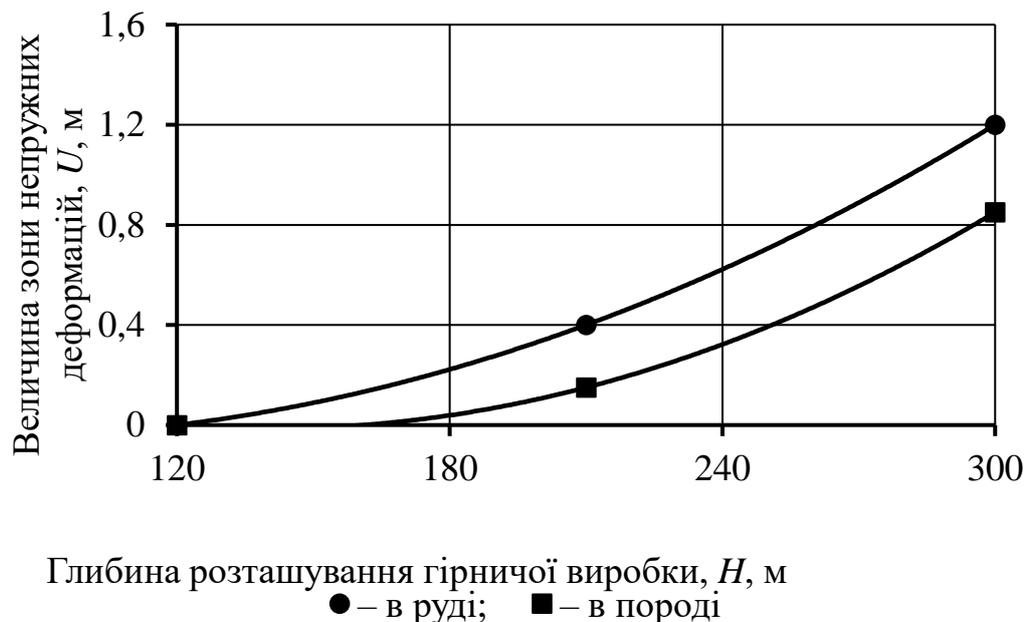


Рисунок 4.4. – Графіки залежності величини ЗНД у покрівлі гірничих виробок залежно від глибини їх розташування

Провівши апроксимацію максимальних значень отримано емпіричні формули розрахунку величини ЗНД, що сформууються у покрівлі виробок, залежно від глибини їх розташування.

Величина ЗНД для гірничих виробок, що проводяться:

– у масиві рудного тіла:

$$U = 0,000025H^2 - 0,0037H + 0,09, \text{ м, при } R^2 = 0,9993; \quad (4.3)$$

– у масиві бічних порід:

$$U = 0,00003H^2 - 0,0095H + 0,65, \text{ м, при } R^2 = 0,9991, \quad (4.4)$$

де  $H$  – глибина розташування гірничої виробки, що дорівнює 120–300 м;  $R^2$  – величина достовірності апроксимації.

У загальному вигляді величина ЗНД для гірничих виробок ( $U$ ) з високим ступенем достовірності описується наступною квадратичною залежністю:

$$U = \vartheta_1 H^2 - \vartheta_2 H + \vartheta_3 \quad (4.5)$$

$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$  – емпіричні коефіцієнти квадратичної апроксимації, що визначають характер зміни величини зони непружних деформацій (ЗНД).

У отриманій залежності (4.5) коефіцієнт  $\vartheta_1$  характеризує інтенсивність нелінійного зростання величини ЗНД зі збільшенням глибини та відображає вплив зростаючого гірського тиску,  $\vartheta_2$  визначає лінійну складову зміни ЗНД, пов'язану з перерозподілом напружень у приконтурній зоні виробки, а  $\vartheta_3$  є вільним членом рівняння, що характеризує початкову величину ЗНД за умов мінімального впливу глибини. Значення цих коефіцієнтів встановлюються на основі результатів чисельного моделювання або експериментальних досліджень і можуть змінюватися залежно від фізико-механічних властивостей порід, гірничо-геологічних умов та параметрів проведення гірничих виробок.

Відповідно до наведених викладок, можна зробити висновок, що величини зони непружних деформацій ( $U$ ) за апроксимується квадратичною кривою від глибини розробки та емпіричних коефіцієнтів ( $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ ), які, відповідно, відображають вплив зростаючого гірського тиску зі збільшенням глибини, лінійну складову зміни ЗНД, пов'язану з перерозподілом напружень у приконтурній зоні виробки та початкову величину ЗНД за умов мінімального впливу глибини. Це дає можливість здійснювати прогностну оцінку розмірів зони непружних деформацій залежно від

глибини проведення гірничих виробок та використовувати отримані залежності для обґрунтування параметрів їх кріплення і забезпечення стійкості в конкретних гірничо-геологічних умовах.

Проведені дослідження показали, що поверхові та підповерхові виробки розташовані у зоні міцних порід, про що свідчать встановлені мінімальні деформації масиву. За таких умов найбільш ефективним є застосування анкерного кріплення для забезпечення стійкості підготовчих виробок. Довжину анкера, з урахуванням величини зони непружних деформацій (ЗНД), доцільно визначати за формулою [126]:

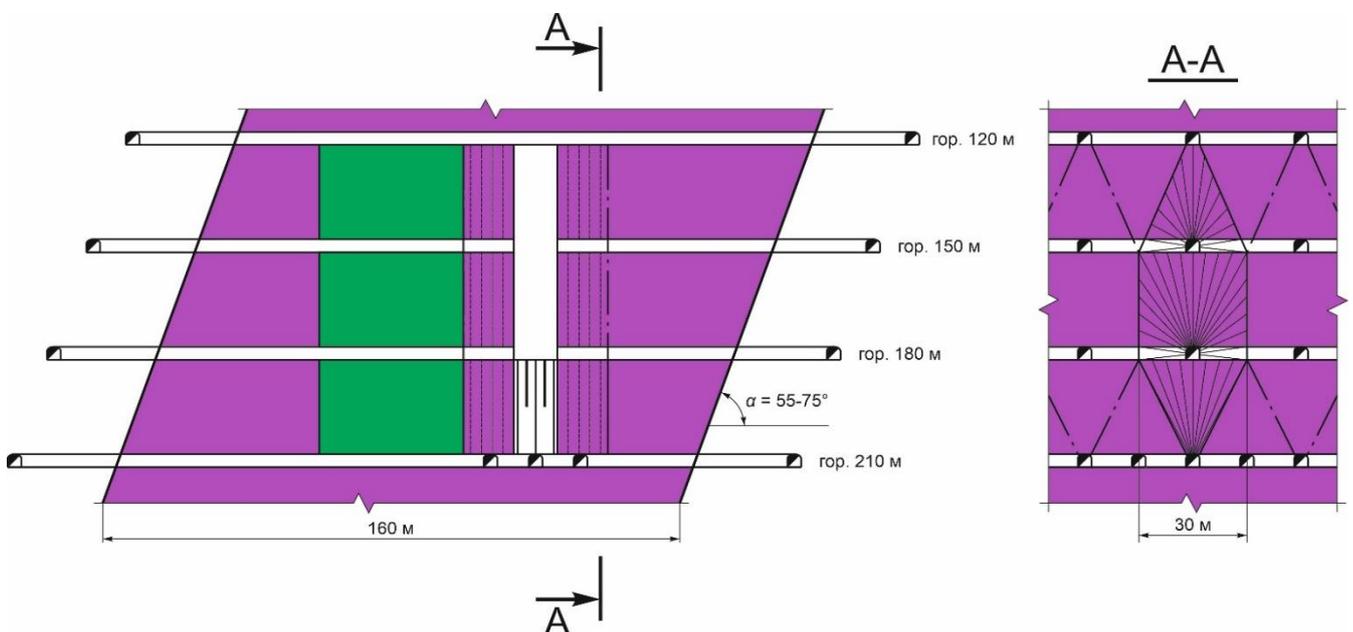
$$l_a = U + l_z + l_n, \text{ м}, \quad (5)$$

де  $l_z$  – величина заглиблення анкера в стійку зону масиву гірських порід, становить 0,3–0,5 м;  $l_n$  – довжина частини анкера, що виступає зі шпур, яка залежить від його конструкції та товщини опорно-підтримуючих елементів, становить 0,05 – 0,2 м.

Як відомо, напруження, що формуються в масиві гірських порід навколо гірничої виробки, спрямовані у бік її геометричного центру, що визначає раціональну орієнтацію анкерів під відповідним кутом до контуру виробки з метою забезпечення ефективного сприйняття навантажень і підвищення стійкості оголень. Така просторово орієнтована система анкерного кріплення сприяє формуванню стійкого армованого шару порід у приконтурній зоні та зменшує ризик розвитку локальних деформацій. З метою запобігання відшаруванню та випадінню дрібних фрагментів породи або руди доцільно додатково застосовувати металеву сітку (рабиця), яка повинна перекривати до 80 % активного периметра гірничої виробки, забезпечуючи комплексне утримання нестійких ділянок масиву.

*4.2.3. Обґрунтування параметрів підповерхово-камерної системи розробки із закладанням виробленого простору для умов Вербинського рудопрояву.* На основі встановленої області зрушень навколо гірничих виробок та обраного способу їх кріплення з'являється можливість визначити основні технологічні параметри ведення очисних робіт, що забезпечують стійкість масиву та безпечні умови експлуатації. Це, у свою чергу, дозволяє обґрунтовано прийняти підповерхово-

камерну систему розробки із закладанням виробленого простору, яка забезпечує ефективний контроль напружено-деформованого стану масиву та мінімізує розвиток небезпечних деформацій. Застосування закладки сприяє підвищенню стійкості оголених поверхонь, зменшенню впливу гірського тиску на контур виробок і створює передумови для раціонального та безпечного відпрацювання рудного покладу [124, 125]. Основні параметри технологічної схеми відпрацювання запасів молібденової руди у верхньому поверсі з розбиванням на три підповерхи (глибина залягання 120 – 210 м) для Вербинського рудопрояву наведено на рисунку 4.5.



Рисунку 4.5 – Технологічна схема відпрацювання запасів молібденової руди у верхньому поверсі для Вербинського молібденового рудопрояву

Зображена технологічна схема відображає реалізацію підповерхово-камерної системи розробки молібденових руд із закладанням виробленого простору поверховим способом, що передбачає поетапне відпрацювання рудного масиву з його попередньою розбивкою на підповерхи встановленої висоти. Така організація очисних робіт забезпечує раціональний розподіл напружено-деформованого стану масиву, підвищує стійкість оголених поверхонь і створює сприятливі геомеханічні умови для безпечного ведення гірничих робіт. Відбійка руди здійснюється

буровибуховим способом із формуванням свердловинних зарядів відповідно до прийнятих параметрів бурового віяла, що дозволяє забезпечити ефективне руйнування рудного масиву та оптимальні показники дроблення. Для забезпечення стійкості підготовчих і очисних виробок передбачено застосування анкерного кріплення, яке формує армовану приконтурну зону, підвищує несучу здатність порід і обмежує розвиток зон непружних деформацій.

Розробка родовища здійснюється поверховою системою з формуванням робочих горизонтів на відмітках 120, 150, 180 та 210 м. Рудний поклад відпрацьовується окремими поверхами з подальшим поділом їх на підповерхи, що забезпечує поетапне вилучення запасів та керованість гірничого тиску. Доступ до рудного тіла здійснюється через центральні вертикальні виробки, які виконують функції транспортування гірничої маси, подачі матеріалів і провітрювання.

Відбійка руди виконується буровибуховим способом із формуванням віялових і похилих свердловин, що пробурюються з підповерхових виробок. Кути нахилу свердловин становлять приблизно  $-15 - +90^\circ$  від лінії горизонту, що дозволяє забезпечити ефективне дроблення масиву та спрямоване переміщення гірничої маси до приймальних виробок. Розміри очисного блока становлять близько 160 м за простяганням і 30 м за шириною, що відповідає умовам стійкості масиву та параметрам буровибухового руйнування.

Після вилучення руди вироблений простір заповнюється закладальними сумішами, що формують штучний масив і забезпечують підтримання стійкості гірських порід, зниження деформацій і втрат корисної копалини. Закладання здійснюється пошарово у міру просування очисних робіт, що дозволяє мінімізувати прояви гірничого тиску та підвищити безпечність ведення робіт. Такий підхід є ефективним при розробці потужних крутих покладів молібденових руд і сприяє комплексному використанню мінеральних ресурсів.

Добута молібденова руда є мінеральною сировиною, що підлягає подальшій переробці із застосуванням гірничо-металургійних, збагачувальних та

гідрометалургійних технологій, спрямованих на вилучення цінних компонентів і отримання товарної продукції встановленої якості. Ефективність цих процесів значною мірою визначається гранулометричним складом, фізико-механічними та мінералогічними характеристиками рудної маси, які формуються на стадії видобування та безпосередньо впливають на показники подрібнення, вилуговування і подальшої гідрометалургійної переробки.

#### **4.3 Техніко-технологічне обґрунтування гідрометалургійного вилуговування молібдену із техногенних та природних родовищ**

У сучасних умовах зростання попиту на критичні та стратегічні метали, зокрема молібден, особливої актуальності набуває питання ефективного залучення до переробки як природних, так і техногенних мінеральних ресурсів. Значні обсяги відходів гірничо-збагачувальних виробництв, шлаків, хвостів і низьковмісних руд містять промислово цінні концентрації молібдену, однак традиційні пірометалургійні технології є енергоємними, екологічно навантаженими та часто економічно недоцільними для їх переробки. У зв'язку з цим зростає інтерес до гідрометалургійних методів, які забезпечують більш гнучке керування процесами вилучення металу та розширюють сировинну базу молібденового виробництва.

Гідрометалургійне вилуговування молібдену характеризується можливістю селективного розчинення цільового компонента за відносно помірних температур і тисків, а також адаптацією технологічних параметрів до мінерало-хімічних особливостей сировини різного генезису. Ефективність таких процесів значною мірою визначається техніко-технологічними умовами їх реалізації, включаючи вибір реагентів, режимів вилуговування, попередню підготовку матеріалу та схеми очищення продуктивних розчинів [100, 113, 127]. Техніко-технологічне обґрунтування застосування гідрометалургійного вилуговування молібдену з техногенних і природних родовищ є необхідним етапом для формування науково обґрунтованих та економічно доцільних технологічних рішень. Загальну

технологічну лінію переробки молібденової сировини техногенного та природного походження гідрометалургійним вилуговуванням наведено на рисунку 4.6.

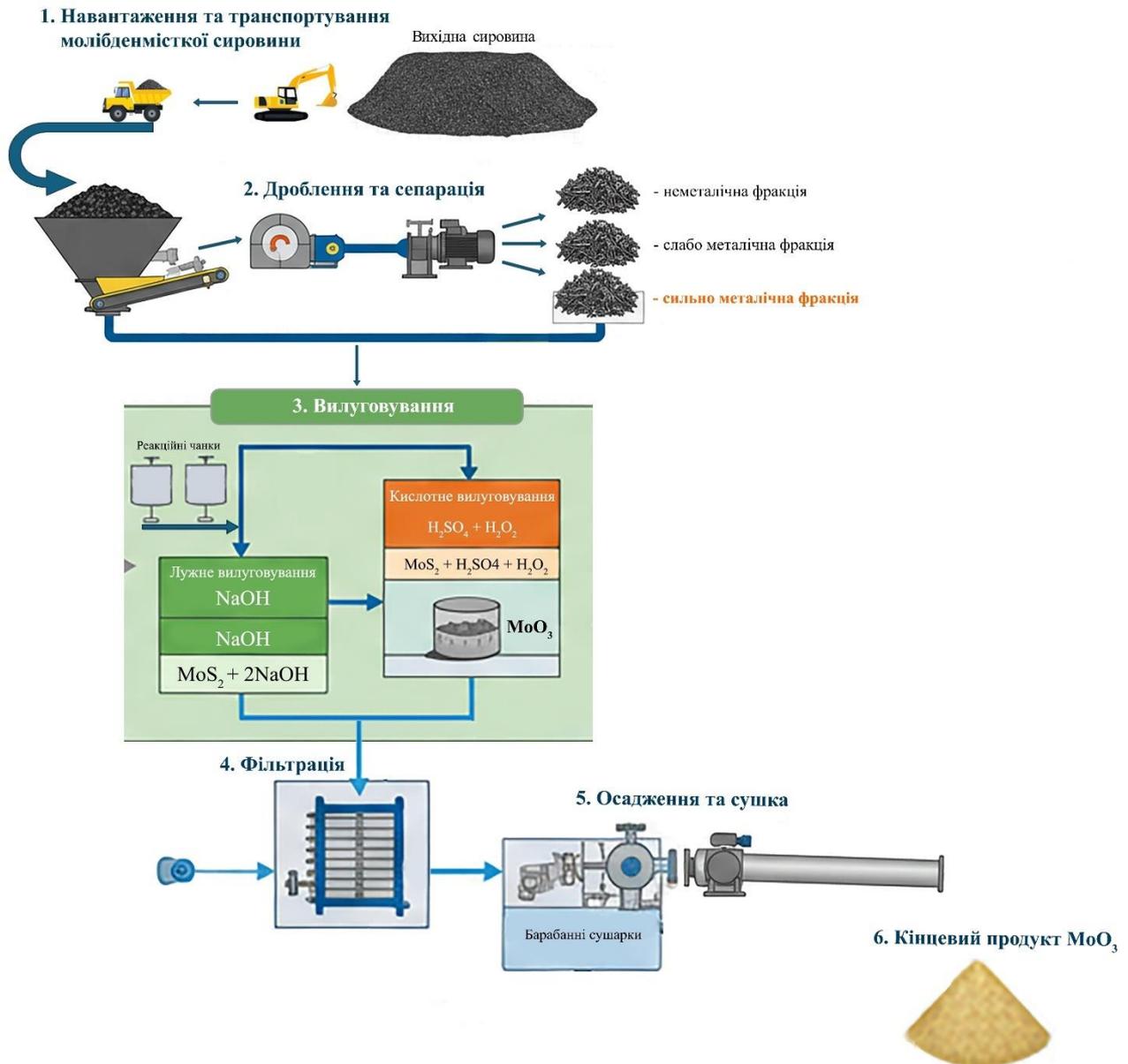


Рисунок 4.6 – Загальна технологічна лінія переробки молібденової сировини техногенного та природного походження гідрометалургійним вилуговуванням

Технологічна лінія переробки молібденвмісної сировини з техногенних та природних родовищ розпочинається з етапу навантаження вихідного матеріалу, що формується у відвалах або хвостосховищах. Навантаження сировини здійснюється за допомогою ковшових або роторних екскаваторів із подальшим розміщенням її у транспортні засоби. Основною метою даного етапу є підготовка матеріалу до

подальшої переробки та зменшення об'ємів накопичених відходів шляхом їх залучення у технологічний цикл.

Після навантаження молібденовмісна сировина транспортується до переробного майданчика з використанням автосамоскидів або конвеєрного транспорту, що забезпечує безперервність і ритмічність подачі матеріалу. Вибір конкретного способу транспортування визначається відстанню перевезення, продуктивністю технологічної лінії та фізико-механічними властивостями сировини. Застосування механізованих транспортних систем дозволяє мінімізувати втрати матеріалу, знизити енерговитрати та підвищити загальну ефективність функціонування переробного комплексу.

На наступному етапі технологічної схеми здійснюється дроблення та сепарація молібденвмісної сировини, під час яких відходи вуглезбагачення або рудна маса піддаються механічному подрібненню з подальшим фракційним і магнітним розділенням. У результаті цих операцій матеріал класифікується на неметалічну, слабо-металічну та сильно-металічну фракції, що дозволяє оптимізувати подальші процеси гідрометалургійного вилуговування та суттєво зменшити обсяг інертних компонентів, які не залучаються до хімічної переробки. Для реалізації даного етапу можуть застосовуватися щокові, конусні або молоткові дробарки, вібраційні сита, магнітні сепаратори та гідроциклони. Зокрема, для первинного дроблення доцільним є використання щокових дробарок типу ЩД-10 або ЩД-25 з продуктивністю 2–25 т/год, тоді як для середнього та дрібного дроблення застосовуються конусні дробарки КСД-900 або КМД-1200. Фракційне сортування здійснюється на віброситах типу ГСЛ-52 чи ГІТ-42, а вилучення металевих включень — за допомогою барабанних або підвісних магнітних сепараторів. Для класифікації тонкодисперсних часток розміром менше 0,1 мм використовуються гідроциклони типу ГЦК-250 або ГЦК-500.

Підготовлена таким чином сировина надходить на стадію гідрометалургійного вилуговування, яке залежно від мінерало-хімічних характеристик матеріалу може реалізовуватися за лужною або кислотною схемою. У разі лужного вилуговування із застосуванням розчинів гідроксиду натрію

молібден переводиться у розчинну форму молібдатів у реакційних чанах із механічним перемішуванням і контрольованим температурним режимом. Для цього використовуються сталеві реакційні чанки з футеруванням об'ємом 5–50 м<sup>3</sup>, оснащені міксерами зі швидкістю обертання 50–200 об/хв, системами дозування NaOH на основі мембранних насосів та реакторами з паровою сорочкою, що забезпечують підтримання температури до 90 °С.

Альтернативно застосовується кислотне вилуговування із використанням сірчаної кислоти та перекису водню, яке забезпечує окислення молібдену та руйнування сульфідних фаз. Процес реалізується в кислотостійких реакторах із титанових сплавів або нержавіючої сталі марки 316L, оснащених системами дозування H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, перистальтичними насосами та перемішувачами з електричним або паровим підігрівом. Температурний режим процесу підтримується на рівні до 120 °С, що сприяє підвищенню кінетики реакцій і ступеня вилучення молібдену.

Технічний супровід процесів вилуговування включає системи приготування та зберігання реагентів, автоматизовані вузли їх дозування, а також контрольно-вимірювальні прилади для моніторингу температури, рН, окисно-відновного потенціалу та концентрації розчинених компонентів. Реакційні апарати оснащуються мішалками з регульованою швидкістю обертання, системами підігріву та теплоізоляції, а також аварійними клапанами і вентиляційними установками для відведення газоподібних продуктів реакцій. Управління цими процесами здійснюється за допомогою локальних систем автоматизації або SCADA-платформ, що забезпечують централізований контроль і архівацію технологічних параметрів.

Після завершення процесу вилуговування здійснюється фільтрація пульпи з метою відокремлення нерозчинного залишку від продуктивного молібденвмісного розчину. Для цього застосовуються фільтр-преси, вакуумні барабанні фільтри або центрифуги, які забезпечують ефективне очищення розчину від тонкодисперсних часток. Зокрема, можуть використовуватися фільтр-преси типу ФПМ-20 або ФПМ-50 з робочим тиском до 1,6 МПа, вакуумні фільтри ВФ-1 і ВФ-2 з продуктивністю

5–20 м<sup>3</sup>/год, а також центрифуги типу ЦН-20 або ЦН-50 зі швидкістю обертання до 3000 об/хв.

Очищений продуктивний розчин надходить на стадію концентрування, де шляхом випаровування, кристалізації або керованого осадження формується молібденовмісний концентрат у вигляді кальцій молібдату (CaMoO<sub>4</sub>) або молібденового ангідриду (MoO<sub>3</sub>). Реалізація цього етапу здійснюється із застосуванням випарних установок або кристалізаторів, зокрема багатокорпусних випарників типу ВУ-3 продуктивністю до 3 т/год, а також апаратів періодичної дії об'ємом 10–30 м<sup>3</sup>. Процеси осадження проводяться в автоматизованих реакторах із системами контролю кислотно-лужного стану та окисно-відновного потенціалу (рН/ORP), після чого сформований осад відокремлюється за допомогою фільтраційного обладнання.

Отриманий молібденовмісний концентрат піддається подальшому осадженню та сушінню з використанням барабанних, псевдозріджених або конвективних сушильних установок, у результаті чого формується сухий товарний продукт. Застосування барабанних сушарок типу СБ-1 або СБ-2 з діаметром барабана 1,5–2,5 м і робочою температурою 200–400 °С, а також псевдозріджених сушарок типу СПЗ-10 забезпечує рівномірне видалення вологи та стабілізацію фізико-хімічних властивостей матеріалу. Конвективні тунельні сушарки з газовим підігрівом використовуються для інтенсифікації процесу сушіння та підвищення енергоефективності виробництва, що забезпечує придатність кінцевого продукту до транспортування і тривалого зберігання.

Паралельно з основним виробничим циклом здійснюється очищення відпрацьованих технологічних розчинів шляхом нейтралізації, фільтрації та рециркуляції води у замкнених технологічних контурах. Для цього застосовуються реактори нейтралізації з мішалками об'ємом 10–50 м<sup>3</sup>, фільтраційні установки картриджного або мембранного типу для вилучення осадів, а також системи циркуляції й рециркуляції води на основі насосних станцій. Тверді залишки та шлами, що утворюються в процесі переробки, підлягають пресуванню та брикетуванню з використанням пресів типу ПБ-1 або ПБ-2 і можуть бути залучені

до процесів рекультивації порушених територій. Застосування мобільних установок для ущільнення та ізоляції шламів дозволяє знизити екологічне навантаження та підвищити рівень комплексного використання техногенних ресурсів.

Таким чином, запропонована технологічна схема гідрометалургійного вилуговування молібдену з техногенних та природних родовищ забезпечує комплексний підхід до переробки сировини з урахуванням її мінерало-хімічних особливостей, технічних можливостей обладнання та екологічних вимог. Раціональне поєднання операцій підготовки, вилуговування, очищення, концентрування та утилізації відходів створює передумови для підвищення ступеня вилучення молібдену та зниження ресурсних і енергетичних витрат. Водночас кінцева ефективність запропонованих техніко-технологічних рішень визначатиметься їхніми економічними показниками, які можуть бути об'єктивно оцінені на прикладі промислового впровадження розроблених технологій у конкретних виробничих умовах.

#### **4.4. Практична реалізація та економічна оцінка технологічних рішень**

Результати дисертаційних досліджень увійшли до запропоновано до впровадження при обґрунтуванні параметрів технологічних схем комплексної розробки молібдену, що міститься у техногенних відходах ПАТ «Львівська вугільна компанія». Для цих умов було запропоновані рекомендації та затверджено методичку щодо оцінки високоефективного використання техногенних родовищ вуглезбагачення (Додаток А1, А2, А3). Відходи цієї компанії є перспективним джерелом вторинної сировини, оскільки поряд із молібденом містять інші цінні компоненти, що можуть бути вилучені в межах єдиного технологічного циклу. Врахування фізико-хімічних особливостей техногенних утворень дозволяє розробити ефективні підходи до їх переробки, що сприятиме підвищенню ресурсоефективності та зменшенню екологічного навантаження.

Автор також брав участь у розробці технологічних рішень для утилізації відходів гірничодобувного комплексу в умовах урбанізованих територій (Додаток

А4). Для цих умов розглядалося супутнє видобування алюмосилікатів разом із молібденом та іншими корисними компонентами з метою утилізації зазначених відходів та підвищення економічної ефективності їх переробки. Здобуті алюмосилікати використовувалися як термоізоляційні матеріали для будівель різного технологічного призначення [114, 128].

Для оцінки економічної ефективності вилучення молібдену з техногенних відходів ПАТ «Львівська вугільна компанія» запропоновано аналітичний підхід, який базується на визначенні абсолютного вилучення молібдену, потенційного доходу від його реалізації та економічної ефективності на тонну відходів (Додаток Б.8). Абсолютне вилучення молібдену  $M_{Mo}$  визначається за формулою:

$$M_{Mo} = R_{Mo} \cdot \eta \quad (4.7)$$

де:  $R_{Mo}$  – загальні запаси молібдену у відходах,  $\eta$  – коефіцієнт вилучення, що характеризує ефективність застосованої технології збагачення і гідрометалургійного вилучення. Ця величина відображає реальну кількість молібдену, яку можна отримати з наявних техногенних матеріалів, і є ключовим показником для планування виробничих процесів.

Потенційний дохід від реалізації вилученого молібдену  $D$  визначається як добуток абсолютного вилучення та ринкової ціни на метал:

$$D = M_{Mo} \cdot P_{Mo} \quad (4.8)$$

де:  $P_{Mo}$  – ціна за тонну молібдену на ринку. Цей показник дозволяє оцінити фінансовий ефект від впровадження технології вилучення молібдену з відходів, враховуючи поточні ринкові умови.

Витрати на переробку техногенних матеріалів  $P$  обчислюються як добуток обсягу перероблюваних відходів  $V_{waste}$  на собівартість обробки 1 тонни відходів  $c$ :

$$P = V_{waste} \cdot c \quad (4.9)$$

Ця величина включає витрати на підготовчі операції (подрібнення, класифікацію, сушіння), фізико-механічне збагачення (гравітаційне, магнітне, флотаційне) та гідрометалургійне вилучення молібдену. Врахування всіх цих компонентів дозволяє отримати реальні показники економічної доцільності процесу.

Відповідно, економічна ефективність на 1 т відходів  $E$  визначається як відношення потенційного доходу до обсягу перероблених відходів [129, 130]:

$$E = \frac{D}{V_{\text{waste}}} \quad (4.10)$$

Цей показник дозволяє оцінити середню фінансову вигоду від переробки 1 тонни техногенних матеріалів і використовується для порівняння різних технологічних сценаріїв. Значення  $E$  зростає при підвищенні коефіцієнта вилучення молібдену, збільшенні його концентрації у відходах або при одночасному вилученні супутніх цінних компонентів ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mn}$ , рідкоземельні метали), що робить комплексну переробку економічно вигідною.

Оскільки на час написання дисертаційної роботи в Україні спостерігалася складна політична та економічна ситуація, що супроводжувалася значною волатильністю національної валюти та нестабільністю валютного ринку, доцільним є виконання економічних розрахунків у доларах США як у загальноприйнятій міжнародній резервній валюті. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив інфляційних процесів, курсових коливань та макроекономічних ризиків на результати оцінки, забезпечуючи їх об'єктивність і порівнянність із аналогічними дослідженнями, проведеними в інших країнах. Крім того, використання долара США як базової розрахункової одиниці відповідає міжнародній практиці оцінки економічної ефективності видобування та переробки мінеральної сировини, оскільки світові ціни на молібден та інші корисні компоненти формуються саме у цій валюті. Це дозволяє отримати більш достовірну оцінку економічної доцільності впровадження запропонованої технології та забезпечує можливість подальшого коректного порівняння отриманих результатів із міжнародними техніко-економічними показниками (Додаток Б.9). Виходячи з наявних виробничих потужностей, ПрАТ «Львівська вугільна компанія» на даний час може ефективно переробляти близько 1,2 млн т відходів на рік, тому саме цей показник було прийнято як базовий для виконання економічних розрахунків. Використання цього значення дозволяє отримати реалістичну оцінку потенційного економічного ефекту від впровадження запропонованої технології вилучення молібдену. Результати

розрахунку економічної ефективності за різними сценаріями розвитку виробництва (низький, консервативний, оптимістичний та максимальний) наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Результати економічної оцінки видобування молібдену із відходів вуглезбагачення

ПрАТ «Львівська вугільна компанія»

<b>Сценарій</b>	<b>Ефективність на 1 т відходів, USD/т</b>	<b>Річний економічний ефект, USD</b>	<b>Річний економічний ефект, UAN*</b>
Низький/консервативний	1,5	1 800 000,0	73 800 000,0
Низький/оптимістичний	1,75	2 100 000,0	86 100 000,0
Низький/максимальний	2,0	2 400 000,0	98 400 000,0
Середній/консервативний	2,25	2 700 000,0	110 700 000,0
Середній/оптимістичний	2,625	3 150 000,0	129 150 000,0
Середній/максимальний	3,0	3 600 000,0	147 600 000,0
Високий/консервативний	3,0	3 600 000,0	147 600 000,0
Високий/оптимістичний	3,5	4 200 000,0	172 200 000,0
Високий/максимальний	4,0	4 800 000,0	196 800 000,0

\*крес-курс валют 1,0 USD = 41,0 UAN

Таким чином, наведені формули і показники утворюють інтегровану методику для планування і оцінки технологічних рішень з переробки техногенних відходів, що дозволяє поєднати екологічну безпеку, ресурсоефективність та економічну доцільність виробничого процесу. Використання даного підходу забезпечує наукову базу для створення оптимальних технологічних схем комплексного вилучення молібдену та супутніх компонентів із відходів, накопичених на промислових майданчиках.

#### 4.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

1. Встановлено, що застосування технологій гідрометалургійного вилуговування техногенних і природних молібденових руд обмежується сукупністю мінералогічних, технологічних, економічних, екологічних та нормативних чинників. Основними з них є складний і неоднорідний склад сировини, наявність важкодоступних форм молібдену, значні витрати на реагенти й енергоресурси, а також необхідність дотримання екологічних вимог і відповідності нормативній базі.

2. Вербінське родовище було обрано як прикладове для дослідження умов відпрацювання молібденових руд, оскільки його геологічна будова, фізико-механічні властивості руд і вміщуючих порід, а також глибини залягання є характерними для родовищ подібного типу. Встановлено, що фізико-механічні властивості руд і порід, з урахуванням структурного ослаблення масиву, суттєво впливають на напружено-деформований стан гірничих виробок і формування зон непружних деформацій, розміри яких закономірно зростають зі збільшенням глибини їх розташування.

3. За результатами чисельного моделювання визначено емпіричні залежності для прогнозування параметрів зон непружних деформацій у рудному масиві та вміщуючих породах, що дозволяє обґрунтовано визначати раціональні параметри анкерного кріплення та забезпечувати стійкість виробок. Доведено, що застосування поверхової системи розробки з підповерховим поділом, буровибуховою відбійкою та закладанням виробленого простору забезпечує ефективне керування гірничим тиском, підвищення безпеки робіт і раціональне вилучення запасів молібденової руди на глибинах 120–300 м.

4. Встановлено, що застосування гідрометалургійного вилуговування забезпечує технічно обґрунтовану, технологічно адаптивну та екологічно безпечну переробку молібденовмісної сировини природного і техногенного походження, дозволяючи ефективно вилучати молібден із низьковмісних руд, хвостів і відходів гірничо-збагачувальних виробництв за рахунок раціонального поєднання операцій

підготовки, селективного вилуговування, очищення, концентрування та утилізації залишків.

5. Запропонована технологічна схема забезпечує підвищення ступеня вилучення молібдену, зниження енерговитрат і екологічного навантаження, а також розширення сировинної бази молібденового виробництва, що створює передумови для економічно доцільного промислового освоєння як природних родовищ, так і техногенних об'єктів.

6. Запропонований аналітичний підхід до економічної оцінки, виконані прикладові розрахунки та отримані результати економічної ефективності підтверджують доцільність застосування розроблених технологій при освоєнні родовищ природного і техногенного походження. Це створює передумови для підвищення рівня ресурсоефективності, зниження екологічного навантаження та забезпечення ефективного промислового освоєння молібденовмісних масивів.

Основні результати четвертого розділу опубліковано в наукових працях [62], [110], [113], [124], [125], [127].

## ЗАКЛЮЧНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну наукову задачу, що полягає в обґрунтуванні параметрів технології комплексного видобування молібдену із природних та техногенних родовищ. Встановлені закономірності взаємозв'язку між мінералогічним складом сировини, технологічними режимами вилуговування та показниками вилучення цінних компонентів лягли в основу розробки методики визначення раціональних параметрів процесу. Отримані результати забезпечують підвищення ефективності вилучення молібдену та супутніх критичних компонентів із техногенної та природної сировини, що сприяє комплексному використанню мінеральних ресурсів і зниженню втрат цінних елементів.

**Основні наукові та практичні результати і висновки, отримані при виконанні роботи, полягають у наступному:**

1. Виконано аналіз сучасних уявлень щодо умов формування молібденової мінералізації, особливостей речовинного складу руд та техногенних відходів їх переробки, а також існуючих технологічних підходів до вилучення молібдену та супутніх критичних компонентів. Проведений аналіз дозволив визначити основні обмеження традиційних методів переробки та обґрунтувати доцільність застосування гідрометалургійних технологій як перспективного напрямку комплексного освоєння природних і техногенних молібденовмісних об'єктів.

2. Проведений аналіз молібденітів із родовищ і рудопроявів Українського щита показав стабільне співвідношення молібдену та сірки на рівні близько 60 % і 40 % відповідно. Така сталість пропорцій свідчить про їх генетичну спорідненість і взаємозв'язок у процесах мінералоутворення. Встановлена залежність може бути використана для геохімічного прогнозування, оскільки наявність одного з елементів є індикатором можливого вмісту іншого.

3. При формуванні технологічної системи відпрацювання молібденових рудопроявів використано коефіцієнт аналогічності як критерій вибору параметрів

розкриття, підготовки та розробки родовищ. Цей коефіцієнт визначається багатокомпонентною функцією на основі нейронних мереж і штучного інтелекту з використанням нормалізованих баз даних техніко-технологічних рішень підприємств, що здійснюють видобування молібденових руд із природних і техногенних родовищ.

4. Встановлено, що величина зони непружних деформацій апроксимується квадратичною залежністю від глибини розробки та емпіричних коефіцієнтів, які враховують вплив гірського тиску і перерозподілу напружень. Це дозволяє прогнозувати розміри зони непружних деформацій і обґрунтовувати параметри кріплення гірничих виробок для забезпечення їх стійкості в конкретних гірничо-геологічних умовах.

5. Техніко-технологічно обґрунтовано застосування гідрометалургійного вилуговування для ефективного вилучення молібдену з техногенних і природних родовищ, а також розроблено підходи до відпрацювання молібденових рудопроявів підземним способом. Встановлено раціональні технологічні параметри процесів, що забезпечують підвищення рівня вилучення цінних компонентів, комплексне використання мінеральної сировини та ефективне освоєння молібденовмісних об'єктів у різних гірничо-геологічних умовах.

6. Встановлено, що підвищення магнітної сили джерела забезпечує селективне вилучення слабомагнітних і тонкодисперсних фаз, асоційованих із молібденом, що сприяє зростанню його концентрації та комплексному вилученню разом із супутніми компонентами без необхідності попередньої термічної підготовки сировини.

7. Виявлено, що концентрація молібдену у техногенних родовищах після вуглезбагачення описується квадратичною залежністю від рівня намагніченості, пов'язаного з вмістом заліза та умовами термічної обробки, що дозволяє прогнозувати і підвищувати вміст молібдену до економічно доцільного рівня.

8. Встановлено температурні межі фазових перетворень молібденовмісних сполук, при яких до 750–800 °C відбувається окиснення сульфідних фаз, а при температурах понад 1100 °C посилюється сублімація  $\text{MoO}_3$

та виникають незворотні втрати молібдену, що визначає раціональний температурний діапазон його ефективного вилучення.

9. Доведено, що зміна концентрації молібдену при термічній обробці описується експоненціальною залежністю від температури, що дає можливість прогнозувати фазо-масові перетворення та оптимізувати технологічні режими для підвищення ефективності вилучення молібдену.

10. Встановлено, що впровадження розробленої технологічної схеми вилучення молібдену з відходів вуглезбагачення забезпечує значний економічний ефект, який за різними сценаріями розвитку підприємства становить від близько 74,0 млн грн на рік у консервативному випадку до 197,0 млн грн на рік за найбільш сприятливих умов, що підтверджує економічну доцільність і перспективність її промислового застосування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nimko, M. O., Skulskyi, V. Y., Gavrik, A. R., Moravetskyi, S. I., & Osipenko, I. G. (2021). Structural inhomogeneity in welded joints of heat-resistant steels of chromium-molybdenum-vanadium. *Avtomatičeskaâ Svarka (Kyiv)*, 2021(10), 12–18. <https://doi.org/10.37434/as2021.10.02>
2. 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, Volume 1457(1)*, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012014>
3. Maksymova, S. V., Kovalchuk, P. V., & Voronov, V. V. (2021). Vacuum brazing of kovar–molybdenum dissimilar joints. *Avtomatičeskaâ Svarka (Kiev)*, 2021(7), 15–20. <https://doi.org/10.37434/as2021.07.03>
4. Кедрун, О. В., & Прищеп, А. М. (2025). Молибден та кобальт як чинники формування врожаю сої в умовах зміни клімату в Україні. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 4(108), 102–117. <https://doi.org/10.31713/vs420248>
5. Федеральне агентство з технічного регулювання та метрології. (2009). Брухт і відходи молибдену (ГОСТ 1639-2009). Стандартінформ.
6. Barry J., Matos G., Menzie W. U.S. mineral dependence—Statistical compilation of U.S. and world mineral production, consumption, and trade, 1990–2010. Reston, Virginia : U.S. Geological Survey, 2013. 6 p.
7. Mineral commodity summaries (2024). Reston, Virginia : U.S. Geological Survey, 212 p.
8. Minerals yearbook (1972). Volume I. Metals, minerals, and fuels. Washington : U.S. Govt. Print. Off.,. 1243 p.
9. Kummer J. (1979). Molybdenum. Washington : U.S. Govt. Print. Off., 23 p.
10. Palencia C. (1985). Molybdenum availability—market economy countries. Washington : U.S. Govt. Print. Off., 21 p.

11. Minerals yearbook (19634). Volume I of three volumes. Metals and minerals (except fuels). Washington : U.S. Govt. Print. Off., 1315 p.
12. Чахкалян Ф. (1969). Молибден. Ереван : Армянский научно-исследовательский институт научно-технической информации и технико-экономических исследований,. 90 с.
13. Rudko, H. I., & Bala, H. R. (2021). Критична мінеральна сировина та її перспективи в Україні. Мінеральні Ресурси України, 2, 3–14. <https://doi.org/10.31996/mru.2021.2.3-14>
14. Mineral facts and problems (1986). Washington : U.S. Govt. Print. Off., 961 p.
15. Blossom, J. W. (1986). *Molybdenum*: A Chapter from Mineral Facts and Problems. US Government Printing Office, 231 p.
16. Черниш, Д. С., & Кульчицька, Г. О. (2023). Мінерали рідкісних елементів України як критична сировина. Матеріали XI науково-практичної конференції «Мінерально-сировинні багатства України: шляхи оптимального використання», 1-15. <https://doi.org/10.59911/conf.2023.23>
17. Lakshmanan, V., Nagaraja, K. S., & Udupa, M. R. (1993). Iron-molybdenum-sulphur and iron-tungsten-sulphur complexes of diimines. Polyhedron, 12(12), 1487–1490. [https://doi.org/10.1016/s0277-5387\(00\)84587-8](https://doi.org/10.1016/s0277-5387(00)84587-8)
18. Bulter, A. R., & Glidewell, C. (1987). ChemInform Abstract: Bonding in Nitrosylated Molybdenum-Sulphur Clusters. ChemInform, 18(4). <https://doi.org/10.1002/chin.198704001>
19. Omarova, G. (2019). Flotation enrichment of enrichment factory tailings for use as technogenic ore. 19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings 19th, Science and Technologies in Geology, Exploration And Mining. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.1/s01.024>
20. Karekar, S. E., & Pinjari, D. V. (2017). Sonochemical synthesis and characterization of molybdenum sulphide nanoparticles: Effect of calcination temperature. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 120, 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.07.018>

21. Rouhani, S. H. R., Davarkhah, R., Zaheri, P., & Mousavian, S. M. A. (2020). Separation of molybdenum from spent HDS catalysts using emulsion liquid membrane system. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 153, 107958. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107958>
22. USGS. (2024). Mineral Commodity Summaries: Molybdenum. United States Geological Survey. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-molybdenum.pdf>
23. CMOC. (2024). Sustainability and operational report. China Molybdenum Co., Ltd. Retrieved from <https://en.cmoc.com>
24. Li, Y.-J., Chan., J. (2022). Supplemental Material: Molybdenum mineralization genetically linked with magmatism at the Shipingchuan deposit, SE China, *Molybdenum*, 43- 56. <https://doi.org/10.1130/gsab.s.21684167.v1>
25. Songqing, G. (2024). Modern Molybdenum Industry in China. *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*, 1391–1392. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0\\_1083](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_1083)
26. S&P Global. (2024). Global molybdenum production and market trends. Retrieved from <https://spglobal.com>
27. Jumaeva, K., Yakubov, M., Khamidullaev, B., Nurmukhamedov, I., & Badalov, F. (2023). Study of the material composition to develop a rational technology for the enrichment of porphyry copper ores from the Yoshlik I and Kalmakyr deposits. *E3S Web of Conferences*, 417, 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341701009>
28. KGHM. (2023). Sierra Gorda technical overview. Retrieved from <https://kghm.com/en>
29. Freeport-McMoRan. (2023). Annual report 2023. Retrieved from <https://fcx.com>
30. Molymet. (2023). Sustainability and ESG Report. Retrieved from <https://molymet.com>

31. Шехунова, С. Б. (2023). Критична та стратегічна мінеральна сировина для економічної безпеки та повоєнного розвитку України. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 5, 25–30. <https://doi.org/10.15407/visn2023.05.025>
32. 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>
33. Khan, Z., Khan, F. A., Khan, A. U., Hussain, I., Khan, A., Shah, L. A., Khan, J., Badrashi, Y. I., Kamiński, P., Dyczko, A., & Rózkowski, K. (2022). Climate-Streamflow Relationship and Consequences of Its Instability in Large Rivers of Pakistan: An Elasticity Perspective. *Water*, 14(13), 2033. <https://doi.org/10.3390/w14132033>
34. Beshta, O., Fedoreyko, V., Palchyk, A., & Burega, N. (2015). Independent power supply of menage objects based on biosolid oxide fuel systems. *Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*, 33–39. <https://doi.org/10.1201/b18475-6>
35. Dychkovskyi, R., Saik, P., Sala, D., & Cabana, E. C. (2024). The current state of the non-ore mineral deposits mining in the concept of the Ukraine reconstruction in the post-war period. *Mineral Economics*, 37(3), 589–599. <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00436-z>
36. Saik, P., Cherniaiev, O., Anisimov, O., Dychkovskyi, R., & Adamchuk, A. (2023). Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 91–102. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.091>
37. European Commission, (2023). *Critical Raw Materials Resilience*, EU, 57 p.
38. UNEP, (2022). *Sustainable Mining Practices*, 23 p.
39. ДНВП «Геоінформ України», (2021). *Геолого-економічна оцінка родовищ молібдену*. 31 с.

40. Історія геології України: Відкриття родовищ рудних копалин, (2023). Журналістська аналітика: «Недооцінені багатства Поділля: молібденові перспективи», Економічна правда, 3 с.
41. ISO 14001: Environmental management systems.
42. Mahaulpatha, W., Sprocati, R., Jamieson, J., & Prommer, H. (2024). Sustainable Mining via Waste Valorisation: Electrokinetic In Situ Recovery of Critical Metals from Mine Tailings. *Goldschmidt*, 34- 41. <https://doi.org/10.46427/gold2024.23296>
43. Hulai, O., Shemt, V., & Furs, T. (2022). Rare earth metals as a critical raw material. Quick overview. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Series Chemical Sciences*, 2022(70), 79–89. <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2022.70.079>
44. Patent US10717123B2, (2020). Tailings Stabilization Process.
45. IEA, 2021. Green Mining and Renewable Energy Integration, 11 p.
46. Sybir, A. V., Hubynskyi, M. V., Balalaiev, O. K., Burchak, O. V., Sukhyy, K. M., Fedorov, S. S., Pinchuk, V. O., Hubynskyi, S. M., & Vvedenska, T. Y. (2022). Effect of parameters of the anthracite heat treatment on the properties of carbon materials during shock heating. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 5, 94–101. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-144-5-94-101>
47. Pinchuk, V. A., Sharabura, T. A., Kuzmin, A. V., & Pinchuk, S. A. (2020). Engineering equations for determining coal-water fuel combustion stages. *Journal of the Energy Institute*, 93(5), 1924–1933. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.007>
48. Kieush, L., Koveria, A., Sommersacher, P., Retschitzegger, S., & Kienzl, N. (2025). Co-Pyrolysis of Biomass with Bituminous Coal in a Fixed-Bed Reactor for Biofuel and Bioreducing Agents Production. *Sustainability*, 17(17), 7654. <https://doi.org/10.3390/su17177654>
49. Держенергоефективності, 2023. Звіт про впровадження енергоефективних технологій у промисловості, 45 с.
50. Cozzi, C. (1975). Thermodynamics and Energy Accountancy in Industrial Processes. *Energy Sources*, 2(2), 165–178. <https://doi.org/10.1080/00908317508945946>

51. Kuzmin, A., Pinchuk, V., Khudoliy, S., Garcia Arango, D. A., Echeverri Gutiérrez, C. A., & Echeverri Gutiérrez, M. S. (2025). Feasibility of proportional–integral–derivative control for high-inertia heating systems: Energy use and dynamic response. *Applied Thermal Engineering*, 272, 126784. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126784>
52. Balat, M., & Ozdemir, N. (2005). New and Renewable Hydrogen Production Processes. *Energy Sources*, 27(13), 1285–1298. <https://doi.org/10.1080/009083190519564>
53. Karatepe, N. (2000). A Comparison of Flue Gas Desulfurization Processes. *Energy Sources*, 22(3), 197–206. <https://doi.org/10.1080/00908310050013983>
54. Smart Mining, (2023). Resources for a connected world. Deloitte, 20-33.
55. Світовий банк, 2023. Доповідь «Transforming Extractive Industries».
56. OECD, 2022. Green Growth in Mining Sector, 32 p.
57. Dychkovskiy, R., Miroshnykov, I., Dybrin, S., & Pererva A. (2025). Prospects for by-product molybdenum recovery within integrated development of critical and construction materials from technogenic deposits. XVIII міжнародна науково-практична конференція Української школи гірничої інженерії. Східниця, 29 вересня-04 жовтня 2025 року. С. 47-50. <https://doi.org/10.33271/usme18.047>
58. Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016). Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits. *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*. 45 – 61. <https://doi.org/10.5382/rev.18.03>
59. Головка В. М., Гусев В. В. (2022). Оцінка мінерально-сировинного потенціалу техногенних родовищ вугільної промисловості Донбасу, Вісник ДВНЗ «ДонНТУ», серія «Гірнична справа і геологія», 34 - 45.
60. Miroshnykov, I. (2023). Current application directions for the weathering rind of molybdenum deposits of Ukraine. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 75, 18–28. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.018>
61. Kicki, J., Jarosz, J., Dyczko, A. and Puszczka, H. (2005). The economic and technical aspects of mine closure in Poland. *Proceedings of the 14th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, 625-631.

62. Мірошников І.О., Потіп М.М. (2024). Правові проблеми видобутку молибдену в Україні. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» 2024. Дніпро, 27-29 березня 2024 року. С. 359-361.
63. Lewicka, B. and Lewicka, D. (2019). Environmental risk management in the context of environmental management systems for agriculture based on the ISO 14001:2015 standard. *Acta Innovations*, (33), 63–72. <https://doi.org/10.32933/actainnovations.33.6>
64. Abdrakhimov, V.Z. (2021). Environmental management, economic, and practical aspects of using 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](https://doi.org/10.51608/23058641_2021_1_11)
65. Hutniczak, A. K., Bryś, W., Dychkovskiy, R., Gaj, R., Dyczko, A., Błońska, A., Bierza, K., Bacler-Żbikowska, B., & Woźniak, G. (2025). Identifying and understanding novel ecosystem functions: a scientific approach to nature restoration law. *Journal of Water and Land Development*, 203–203. <https://doi.org/10.24425/jwld.2025.153532>
66. Dychkovskiy, R. & Bondarenko, V. (2006). Methods of extraction of thin and rather thin coal seams in the works of the scientists of the Underground Mining Faculty (National Mining University). Taylor & Francis eBooks, 21–25. <https://doi.org/10.1201/noe0415401173.ch3>
67. Dudek, M. (2014). The model for the calculation of the dispersed iron ore resource purchase cost in the world class manufacturing (WCM) logistics pillar context. *Metalurgija*, 53(4), 567–570. <http://hrcak.srce.hr/file/180669>
68. Richert, M., Dudek, M. & Sala, D. (2024). Surface Quality as a Factor Affecting the Functionality of Products Manufactured with Metal and 3D Printing Technologies. *Materials*, 17(21), 5371. <https://doi.org/10.3390/ma17215371>
69. Stempok, M. (1996). Essential features of porphyry copper/molybdenum and rare-metal (Sn, W, Mo, Be, Li) ore deposits. *Global Tectonics and Metallogeny*, 5(3–4), 125–134. <https://doi.org/10.1127/gtm/5/1996/125>

70. Maksymova, S. V., Kovalchuk, P. V., & Voronov, V. V. (2022). Features of the structure of molybdenum-covar brazed joints. *Avtomatičeskaâ Svarka (Kyiv)*, 2022(5), 40–46. <https://doi.org/10.37434/as2022.05.06>
71. Magdziarczyk, M., Chmiela, A., Dychkovskyi, R., & Smoliński, A. (2024). The Cost Reduction Analysis of Green Hydrogen Production from Coal Mine Underground Water for Circular Economy. *Energies*, 17(10), 2289. <https://doi.org/10.3390/en17102289>
72. Jia, T., Peng, Y., Niu, L., Qi, Z., & Xi, J. (2026). Simultaneous sulfide oxidation and sulfate reduction for intracellular redox homeostasis under highly acidic conditions. *Nature Communications*. 74-82. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68508-y>
73. Gupta, C. K. (2017). Properties and Applications of Molybdenum. *Extractive Metallurgy of Molybdenum*, 1–66. <https://doi.org/10.1201/9780203756287-1>
74. Bhappu, R. B., Reynolds, D. H., & Roman, R. J. (1965). Hydrometallurgical recovery of molybdenum from the Questa mine. <https://doi.org/10.58799/c-81>
75. Práger, M. (1994). Variational Methods for Numerical Solution of Boundary-Value Problems for Differential Equations. *Finite Element Method. Boundary Element Method. Survey of Applicable Mathematics*, 1125–1193. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8308-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8308-4_24)
76. Bondarenko, V. I., Salieiev, I. A., Kovalevska, I. A., Vivcharenko, I. O., & Sheka, I. V. (2025). Обґрунтування геомеханічних принципів прогнозування газовиділення при комплексному видобуванні мінеральної сировини. *Мінеральні Ресурси України*, 3, 10–16. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.3.10-16>
77. Astafiev, D., Niedbalski, Z., Leschhorn, F., & Tymoshenko, Y. (2016). Technological, economic and ecological aspects of selective coal mining from ultra-thin seams in conditions of Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 83–88. <https://doi.org/10.15407/mining10.01.083>
78. Lasheen, T. A., El-Ahmady, M. E., Hassib, H. B., & Helal, A. S. (2014). Molybdenum Metallurgy Review: Hydrometallurgical Routes to Recovery of Molybdenum from Ores and Mineral Raw Materials. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(3), 145–173. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.868347>

79. Russoa, R., Venturaa, M., Fattobenea, M., Zamponia, S., Contia, P., Berrettonia, M., & Giuli, G. (2011), Hydrometallurgical Molybdenum Recovery from Spent Catalyst Using Tartaric Acid Derived from Agrifood Waste. University of Camerino - ChIP Building, 51-55. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c04318.s001>
80. Salieiev, I., Bondarenko, V., Kovalevska, I., Malashkevych, D., & Galkov, R. (2025). Principles of mining-geological classification for maintaining mine workings in conditions of weakly metamorphosed rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 19(1), 26–36. <https://doi.org/10.33271/mining19.01.026>
81. Wojciechowski, M. (2018). A note on the differences between Drucker-Prager and Mohr-Coulomb shear strength criteria. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 40(3), 163–169. <https://doi.org/10.2478/sgem-2018-0016>
82. Dychkovskiy, R.O., Tymoshenko, Y.V., & Astafiev, D.O. (2014). Method of analytical investigation of wall advance speed and forms of line face influence on stress-strain state of a rock massif. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* Open source preview, (1), 11–16
83. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Krasnyk, V., Chernyak, V., Haidai, O., Sachko, R., & Vivcharenko, I. (2024). Methodical principles of experimental-analytical research into the influence of pre-drilled wells on the intensity of gas-dynamic phenomena manifestations. *Mining of Mineral Deposits*, 18(1), 67–81. <https://doi.org/10.33271/mining18.01.067>
84. Haidai, O., Ruskykh, V., Koveria, A., Firsova, V., & Sala, D. (2024). Determination of composite fuel parameters in the operation of technogenic deposits of coal mining enterprises. *E3S Web of Conferences*, 526, 01021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601021>
85. Foris, S. M., Fedorov, S. S., Pererva, V. Y., & Usenko, A. Y. (2020). Моделювання робочих режимів з метою підвищення ефективності шахтної вапняно-випалювальної печі. *System Technologies*, 3(128), 102–114. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-128-2020-10>

86. Dyczko, A. (2023). Real-time forecasting of key coking coal quality parameters using neural networks and artificial intelligence. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 38(3), 105–117. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.3.9>
87. Tymoshenko, Ie., Dyczko, A., Gliwiński, Ł., & Bleikher, O. (2023) Definition of Technological Parameters and Stresses in High-Speed Extraction of Thin Coal Seams. *Physical and Chemical Geotechnologies*, 7, 26 – 33. <https://doi.org/10.15407/pcgt.23.05>
88. Ivakhnenko, A. (1968): The Group Method of Data Handling A Rival of the Method of Stochastic Approximation. *Soviet Automatic Control*, 1(3), 43-55.
89. Babets, D.V., Sdvyzhkova, O.O., Larionov, M.H., Tereshchuk, R.M. (2017): Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* this link is disabled, (2), 58–64.
90. Sdvyzhkova, O., Moldabayev, S., Bascetin, A., Babets, D., Kuldeyev, E., Sultanbekova, Zh., Amankulov, M., & Issakov, B. (2022). Probabilistic assessment of slope stability at ore mining with steep layers in deep open pits. *Mining of Mineral Deposits*, 16(4), 11-18. <https://doi.org/10.33271/mining16.04.011>
91. Šapina, M. (2016). A comparison of artificial neural networks and ordinary kriging maps of the lower and upper Pannonian stage border in the Bjelovar subdepression, Northern Croatia. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 31(1), 75–85. <https://doi.org/10.17794/rgn.2016.3.6>
92. Leonardi, S. (1991). Indirect Effects of Acid Rain Mediated by Mineral Leaching: An Evaluation of Potential Roles of Leaching from the Canopy. *Acid Deposition*, 123–140. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-76473-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-76473-8_9)
93. Gold, V. (2016). Gibbs Energy of Activation (Gibbs Free Energy of Activation) [dataset]. In IUPAC Standards Online. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/iupac.51.0285>
94. Гринь, Г., Козуб, П., & Дробоног, Н. (2004). Дослідження розчинення сполук молібдену різного степеня окислення у водних розчинах. *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*, (13), 93–97.

95. Дробоног, Н., Козуб, П., & Гринь, Г. (2005). Дослідження вилуговування ванадію і молібдену з відпрацьованих каталізаторів аміачними розчинами. *Хімія і сучасні технології* (с. 42). УДХТУ.
96. Koveria, A., Kieush, L., Usenko, A., & Sova, A. (2023). Study of cellulose additive effect on the caking properties of coal. *Mining of Mineral Deposits*, 17(2), 1–8. <https://doi.org/10.33271/mining17.02.001>
97. Гринь, Г., Мязіна, О., Гринь, С., & Мірошніченко, Н. (2018). Вилучення сполук молібдену з промислових каталізаторів. *Молодий вчений*, 9(61), 211–215.
98. Hubynskiy, S., Sybir, A., Fedorov, S., Usenko, A., Hubynskiy, M., & Vvedenska, T. (2024). Analysis of changes in global warming potential during enrichment and production of battery-grade graphite using electrothermal fluidized bed technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012028>
99. Shiau, L.-D. (2020). The Dependence of Effective Distribution Coefficient on Growth Rate and Mass Transfer Coefficient for P-Xylene in Solid-Layer Melt Crystallization. *Processes*, 8(2), 175. <https://doi.org/10.3390/pr8020175>
100. 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 – article in press.
101. Kuzmenko, O., Dychkovskiy, R., Petlovanyi, M., Buketov, V., Howaniec, N., & Smolinski, A. (2023). Mechanism of Interaction of Backfill Mixtures with Natural Rock Fractures within the Zone of Their Intense Manifestation while Developing Steep Ore Deposits. *Sustainability*, 15(6), 4889. <https://doi.org/10.3390/su15064889>
102. Khomenko, O., Rudakov, D., Lkhagva, T., Sala, D., Buketov, V., & Dychkovskiy, R. (2023). Managing the Horizon-oriented In-Situ Leaching for the Uranium Deposits of Mongolia. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 38(5), 49–60. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.5.5>
103. Petlovanyi, M., Ruskykh, V., Sai, K., & Malashkevych, D. (2024). Prompt determination of predictive parameters for mining-technogenic landscape objects. *IOP*

Conference Series: Earth and Environmental Science, 1348(1), 012035.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012035>

104. Cherniaiev, O., Anisimov, O., Saik, P., Dychkovskiy, R., & Lozynskiy, V. (2024). On the issue of shipping finished products in mining of non-metallic mineral raw materials. E3S Web of Conferences, 567, 01005.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701005>

105. Crouch, S.L., & Starfield, A.M. (1983). Boundary Element Methods in Solid Mechanics: With Applications in Rock Mechanics and Geological Engineering, ISBN: 978-0-04-620010-6

106. Kirsch, A. (1973). A proposed dynamic stability solution. 11th Aerospace Sciences Meeting. <https://doi.org/10.2514/6.1973-180>

107. Sfetcu, N. (2019). Isaac Newton vs. Robert Hooke on the law of universal gravitation. <https://doi.org/10.58679/mm39765>

108. 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>

109. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., & Lozynskiy, V. (2025). Aspects of co-utilization of solid waste and coal through underground gasification. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1457(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012002>

110. Бучинская, К., & Нечаев, С. (1989). Топаз-цинвальдитовые грейзены Вербинского полиметаллического рудопроявления (Украинский щит). Геологический журнал, (2), 86–93.

111. 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>

112. Dychkovskiy, R., Miroshnykov, I., & Pererva, A. (2025). Hydrometallurgical recovery of molybdenum and critical raw materials from technogenic deposits of coal preparation waste. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 83, 7–21. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.007>
113. Dychkovskiy, R., Miroshnykov, I., & Pererva, A. (2025). Synthesis of potassium humate as an eco-friendly method for coal-preparation waste utilization. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 82, 274–287. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.274>
114. 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>
115. 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](https://doi.org/10.51608/23058641_2021_1_11)
116. Woźniak, G., Bryś, W., Dychkovskiy, R., Dyczko, A., Nowak, T., Piekarska-Stachowiak, A., Trzaski, L., Molenda, T., & Hutniczak, A. (2024). Modelling ecosystem services – a tool for assessing novel ecosystems functioning in the urban-industrial landscape. *Journal of Water and Land Development*, 168–168. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151802>
117. Olson, D. L., & Wu, D. (2020). Data Mining Models and Enterprise Risk Management. *Enterprise Risk Management Models*, 123–136. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-60608-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60608-7_9)
118. Pavlychenko A., Lewicka D., Miroshnykov, I., & Dychkovskiy R. (2025). Hybrid Approach of Neural Networks and Analog-Based Methods for Industrial Assessment of Technogenic Deposits. DIM-ESEE Conference. 15th – 17th October 2025, Dubrovnik, Croatia. Paper No. 356. Посилання: <https://hrcak.srce.hr/omp/index.php/rgn-unizg/catalog/view/399/71/7137>

119. Pavlychenko A., Lewicka D., Miroshnykov, I., & Dychkovskyi R. (2025). Integration of Neural Networks into AnalogBased Methods for Assessing Technogenic Deposits for Industrial Exploitation. DIM-ESEE Conference. 15th – 17th October 2025, Dubrovnik, Croatia. MR36.
120. De Veaux, R. D., & Eck, A. (2021). Machine learning methods for computational social science. Handbook of Computational Social Science, Volume 2, 291–321. <https://doi.org/10.4324/9781003025245-21>
121. Sobolev, V., Gubenko, S., Khomenko, O., Kononenko, M., Dychkovskyi, R., & Smolinski, A. (2025). Physical and chemical conditions for the diamond formation. Diamond and Related Materials, 151, 111792. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111792>
122. Vladyko, O., Maltsev, D., Gliwiński, Ł., Dychkovskyi, R., Stecuła, K., & Dyczko, A. (2025). Enhancing Mining Enterprise Energy Resource Extraction Efficiency Through Technology Synthesis and Performance Indicator Development. Energies, 18(7), 1641. <https://doi.org/10.3390/en18071641>
123. Lapshyn, Y., Shevchenko, O., Dybrin, S., & Dychkovskyi, 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>
124. Miroshnykov, I. (2025). Justification of the mining operations on the Verbynske molybdenum ore occurrence with the purpose of production of mineral raw materials of temporary conditions. Collection of Research Papers of the National Mining University, 81, 50–63. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/81.050>
125. Zberovskyi, V., Vlasenko, V., Bubnova, O., Ahaiev, R., Miroshnykov, I., & Jamiński, M. (2026) Management of Technical and Economic Factors in the Concept of Recovery, Production, and Processing of Hydrocarbons. Inżynieria Mineralna, Inżynieria Mineralna, 4(2), 249-261. <https://doi.org/10.29227/im-2025-02-04-029>.
126. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Косенко А.В. Раціональні параметри кріплення польових підготовчих виробок у зонах впливу очисних камер. *Наукові праці*

*ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. 2023. № 1(29). С. 57–66.*  
[https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1\(29\)-57-66](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-1(29)-57-66)

127. Мірошников І.О., Дичковський Р.О., Перерва А.Ю. Спосіб одержання розчину гумату калію: пат. 148329 Україна: МПК E21C 41/32. C05F 11/02.

128. Дичковський Р., Павличенко А., Кононенко М., Дибрін С. (2025). Оцінка теплопровідності та стабільності теплоізоляційних матеріалів для будівель на основі методу сталого теплового потоку. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, 80, 275–287. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.275>

129. Shumilo, O. S. (2018). Methodology for evaluating the efficiency of the economic security system of retail trade enterprises. *Economic Scope*, 0(132), 185–202. <https://doi.org/10.30838/p.es.2224.240418.185.62>

130. Ocheredko, O., & Tishchenko, O. (2018). Determining the efficiency of investment activity of industrial holding enterprises. *Socio-Economic Research Bulletin*, 0(2(66)), 75–84. [https://doi.org/10.33987/vsed.2\(66\).2018.75-84](https://doi.org/10.33987/vsed.2(66).2018.75-84)

## **Додаток А**

Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційних досліджень

Ухвалою  
Генерального директора  
ПАТ «Львівська вугільна компанія»  
Олег КУЛИЧ

«07» 11 2025 р.

#### Акт

*впровадження результатів кваліфікаційна наукової праці на здобуття наукового ступеня доктора філософії Мірошнікова Івана Олександровича на тему: «Обґрунтування параметрів технологічних схем розробки молібденових родовищ України»*

Наукові дослідження Мірошнікова Івана Олександровича зосереджені на обґрунтуванні параметрів технологічних схем комплексної розробки молібдену, що міститься у техногенних відходах ПАТ «Львівська вугільна компанія». Ці відходи є перспективним джерелом вторинної сировини, оскільки поряд із молібденом містять інші цінні компоненти, що можуть бути вилучені в межах єдиного технологічного циклу. Врахування фізико-хімічних особливостей техногенних утворень дозволяє розробити ефективні підходи до їх переробки, що сприятиме підвищенню ресурсоефективності та зменшенню екологічного навантаження.

Протягом своєї виробничої діяльності ПАТ «Львівська вугільна компанія» накопичила близько 80 млн тон так званих "перепалених" відходів збагачення вугілля. Попередній аналіз їх кількісних обсягів, якісних характеристик і хімічного складу свідчить, що, окрім використання як підсиплюю чи будівельного матеріалу, більшість хімічних компонентів не мають промислових концентрацій. Проте, з огляду на те, що ці відходи розташовані на поверхні й не потребують витрат на видобування з надр, їх переробка може бути економічно доцільною. Досвід європейських країн показує, що техногенні родовища подібного типу можуть ефективно відпрацьовуватися із застосуванням сучасних методів збагачення. Зокрема, можливе вилучення окремих цінних компонентів, зокрема молібдену, за умови раціонального підходу до їх комплексної переробки. Масштаби накопичених техногенних утворень вимагають розробки і впровадження спеціалізованих технологічних рішень, спрямованих на екологічно безпечну та ресурсоефективну утилізацію цих матеріалів. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати вплив на довкілля, а й отримати додаткову економічну вигоду від повторного залучення техногенних ресурсів у виробничий цикл.

Розробки Мірошнікова Івана Олександровича спрямовані на подолання технологічних бар'єрів, пов'язаних із переробкою вуглевідходів, що характеризуються складним та різноманітним хімічним складом і варіативністю концентрацій корисних компонентів. У кваліфікаційній роботі на здобуття наукового ступеня доктора філософії особлива увага приділяється удосконаленню технологічних процесів супутнього вилучення молібдену з техногенних і природних родовищ. Результати досліджень переконливо свідчать про перспективність низки українських родовищ для видобування молібденових сполук, насамперед – у контексті їх комплексного вилучення разом з іншими цінними компонентами. Запропонований підхід враховує специфіку гірничо-геологічної будови родовищ, а також техніко-технологічні особливості їх відпрацювання. Комплексне дослідження дозволило сформувати ефективну наукову базу для впровадження інноваційної технології переробки техногенних відходів. Така технологія забезпечує екологічну безпеку, ресурсоефективність і економічну доцільність виробничого процесу. Отримані результати мають прикладне значення та

можуть бути використані при проектуванні сучасних систем поводження з відходами гірничо-збагачувального виробництва.

У межах наукової роботи здійснено аналіз складу техногенних відходів та розроблено методичні підходи до оцінки ефективності вилучення молібденових сполук під час комплексної переробки вуглевідходів. Значну увагу приділено поетапній технології обробки сировини, яка включає підготовчі операції (подрібнення, класифікацію, сушіння), фізико-механічне збагачення (гравітаційні, магнітні та флотаційні методи), а також гідрометалургійне вилучення молібдену з концентрату шляхом вилуговування. З огляду на багатокомпонентний склад техногенних матеріалів, технологія орієнтована на одночасне вилучення супутніх корисних компонентів із подальшою їх селективною екстракцією. Запропоновані технічні рішення мають як теоретичну, так і прикладну цінність і можуть бути використані для підвищення енергоефективності та екологічної безпеки переробних процесів. Результати досліджень слугують основою для створення інноваційних технологічних схем, адаптованих до умов переробки техногенних родовищ. У підсумку, проведена робота сприяє розширенню наукових уявлень про можливості комплексного використання відходів гірничо-збагачувального виробництва. За підсумками досліджень отримано наступні основні наукові результати, що мають перспективу практичного впровадження.

1 Проаналізовано склад і кількісні характеристики відходів, що зазнали термічної обробки під час збагачення або тривалого складування під впливом ендегенних пожеж. Такі матеріали можуть розглядатися як техногенні відходи гірничого виробництва з потенціалом подальшого промислового використання. Встановлено, що поряд із придатністю до застосування як підсипні чи будівельні матеріали, ці відходи зберігають значну частину потенційно цінних хімічних елементів і сполук, важливих для економіки України. Зокрема, оцінено, що загальні запаси молібдену як окремого хімічного елемента становлять від 4 000 до 8 000 тонн. Його вміст ( $M_{O_1}$ ) описується квадратичною залежністю другого порядку від рівня намагніченості вуглевідходів ( $\epsilon_{Fe}$ ), яка, у свою чергу, корелює з концентрацією заліза та емпіричними коефіцієнтами ( $a_i, b_i, c_i$ ), що враховують просторову вибірку проб і ступінь термічної обробки сировини. Запропоновано технологічну схему, яка забезпечує ефективне вилучення молібдену у поєднанні з іншими корисними компонентами ( $Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Mn$ , рідкоземельні елементи, рідкоземельні метали тощо) без потреби в попередній агломерації чи високотемпературному випалі. Реалізація такого підходу створює передумови для комплексного використання техногенних запасів із мінімальним екологічним навантаженням і зниженими витратами на підготовку сировини.

2. Кларкова система оцінки промислової придатності техногенного родовища ПАТ «Львівська вугільна компанія» потребує уточнення, оскільки досліджувані запаси вже перебувають на поверхні й не потребують витрат на розвідку, розкриття, підготовку та видобуток. Відповідно, показник за Кларком, який змінюється залежно від просторового відбору проб та рівня намагніченості, коливається в межах від 0,3 до 0,7 (при граничному значенні 1,1), що фактично наближає ці запаси до рівня промислової придатності. Запропонований альтернативний коефіцієнт оцінки доцільності розробки молібденових сполук, який враховує ступінь придатності до збагачення та можливість спільного вилучення з іншими цінними компонентами, суттєво підвищує ринкову привабливість цих ресурсів. Додатковим аргументом на користь їх розробки є фізичний стан молібдену, що перебуває у зв'язку з оксидами заліза. Такий мінералогічний зв'язок, з огляду на його значущість для чорної металургії, обумовлює доцільність спільного збагачення молібдену з залізом.

3. Як технології відпрацювання техногенних запасів молібдену запропоновано використання гідрометалургійного методу вилучення цього елемента у формі окремих

хімічних сполук. Основна увага приділяється вилуговуванню молібдену з концентрату, зокрема у поєднанні із залізовмісними компонентами, що переважають у мінералогічному складі досліджуваних відходів. Такий підхід дозволяє ефективно відокремлювати молібден у придатній для подальшої переробки формі без необхідності проведення високотемпературних стадій, що є енергозатратними. Дослідження показують доцільність застосування сірчаноокислих та лужних агентів для селективного вилуговування молібдену при оптимізованих температурах та тривалості процесу. Запропонована схема відкриває перспективи для створення маловідходної технології, яка забезпечує економічно доцільне та екологічно безпечне вилучення цінних металів із техногенних родовищ.

Основними практичними досягненнями дослідження слід вважати такі результати:

1. Розроблено рекомендації щодо технічного та технологічного удосконалення процесу відпрацювання шламових відходів ПАТ «Львівська вугільна компанія» з орієнтацією на промислове вилучення молібдену та його сполук у комплексі з іншими корисними компонентами, що містяться у вугільних відходах.

2. На основі експериментальних даних вдосконалено підхід до гідрометалургійної технології вилучення молібденових сполук, що дало змогу підвищити ефективність переробки шламів і суттєво зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

3. Удосконалено методику аналітичної оцінки промислової придатності техногенних запасів із використанням кларкової системи в інтерпретації Виноградова; встановлено межі їх рентабельності залежно від рівня намагніченості, ступеня термічної обробки та просторового розташування.

4. Запропоновано нові технологічні та конструктивні рішення, а також оптимізовано параметри управління процесом вилучення корисних компонентів із техногенних родовищ.

Запропоновані заходи прийнято до впровадження у виробничу практику ПАТ «Львівська вугільна компанія» в межах програми модернізації та утилізації вугільних відходів. Вони створюють передумови для впровадження якісно нових інноваційних підходів до відпрацювання техногенних родовищ, забезпечуючи ступінь утилізації відходів на рівні 25–30 % та залучення до виробничого циклу ресурсів, які раніше вважалися непридатними до використання та вимагали утилізації.

Заступник генерального директора



Ірина ТЕРЕХ

Міністерство освіти та науки України  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з наукової роботи

д-р тех. наук, професор

І.С. НІКІТЕНКО

« 03 » 09 2025 р.

МЕТОДИКА  
ОЦІНКИ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ  
ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ УКРАЇНИ

## СПИСОК АВТОРІВ:

г.н.с., професор

с.н.с., професор

н.с., доцент

н.с., доцент

н.с., доцент

н.с., доцент

м.н.с.

м.н.с.

м.н.с.





Дичковський Р.О.

Павличенко А.В.

Лозинський В.Г.

Фальштинський В.С.

Пазиніч Ю.М.

Сала Д.

Перерва А.Ю.

Дибрін С.В.

Мірошников І.О.

ПОГОДЖЕНО:

Генеральний директор  
ПАТ «Львівська вугільна компанія»



Олег КУЛИЧ  
2025 р.

УХВАЛОЮ:

Проректор з наукової роботи  
НТУ «Дніпровська політехніка»



д.т.н., професор  
Ігор НІКІТЕНКО  
2025 р.

Рекомендації щодо технічного та технологічного удосконалення  
комплексної утилізації відходів вуглезбагачення  
на техногенних об'єктах ПАТ «Львівська вугільна компанія»

Керівник розробки:

Головний науковий співробітник НТУ «ДП»  
Дичковський Р.О.

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to R.O. Dichkovskiy, written over the text of the developer's name.

Дніпро  
2025 рік

Укладачі:

Д.т.н. Дичковський Р.О.  
Д.т.н. Павличенко А.В.  
К.т.н. Лозинський В.Г.  
К.т.н. Фальштинський В.С.  
К.п.н. Пазиніч Ю.М.  
К.т.н. Сала Д.  
Інж. Перерва А.Ю.  
Інж. Дибрін С.В.  
Інж. Мірошников І.О.

## Зміст

	Стр.
Вступ.....	3
1. Аналіз гірничо-геологічних, гірничотехнічних умов та економічних показників утилізації відходів вуглезбагачення на техногенних об'єктах ПАТ «Львівська вугільна компанія».....	4
2. Практика застосування технологічних рішень при утилізації та розробці відходів вуглезбагачення при змінних характеристиках та якісному складі.....	16
3. Напрямки техніко-технологічного удосконалення.....	25
4. Матеріали та методи аналізу при якісній та кількісній оцінці вмісту корисних компонентів та пустої породи у техногенних відходах відходів.....	31
4. Формування сумісної (єдиної) комплексної системи фізико-хімічного відпрацювання відходів вуглезбагачення.....	44
5. Обґрунтування параметрів техніко-технологічного удосконалення комплексної розробки техногенних родовищ вуглезбагачення.....	49
5. Щодо застосування технологій підземної і наземної газифікація відходів із вмістом горючої складової вуглецю в межах 20 – 60%.....	52
6. Вольфрам орієнтоване комплексне видобування руди із техногенного родовища... ..	55
7. Технологічні особливості використання відходів у господарчій діяльності як тепло ізоляторів та інших будівельних матеріалів.....	59
8. Еколого-соціальна оцінка технологічних рішень, охорона праці та промислова санітарія.....	63
9. Управлінські рішення, техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування запропонованого удосконалень.....	67
Висновки.....	71
Перелік використаних літературних джерел.....	75

ПОГОДЖЕНО:

Голова правління  
 ОСББ «Гідропаркова, 9»  
 Код ЄДРПОУ 40554071  
 Наталія РУСАКОВА  
 09 2025 р.



УХВАЛЮЮ:

Проректор з наукової роботи  
 НТУ «Дніпровська політехніка»  
 д.т.н., професор  
 Ігор НІКІТЕНКО  
 09 2025 р.



## Рекомендації

щодо застосування паливно-енергетичних відходів як теплоізоляційних  
 матеріалів на житловому об'єкті об'єднання співвласників  
 багатоквартирного будинку (ОСББ) «Гідропаркова, 9»

Керівник розробки:

Головний науковий співробітник НТУ «ДП»  
 Дичковський Р.О.

Дніпро  
 2025

Укладачі:

Д.т.н. Дичковський Р.О.  
Д.т.н. Павличенко А.В.  
К.п.н. Пазиніч Ю.М.  
Інк. Дибрін С.В.  
Інк. Мірошников І.О.

**Зміст**

	Стр.
Вступ.....	3
1. Загальна характеристика об'єкта дослідження (дев'ятиповерхова житлова будівля панельного типу, м. Дніпро, Гідропаркова, 9).....	4
2. Практика застосування паливно-енергетичних відходів як теплоізоляційних матеріалів на об'єкта міської агломерації.....	8
3. Підбір композиції теплоізоляційних матеріалів, встановлення їх теплопровідності і якісних характеристик.....	15
4. Оцінка напружено-деформованого стану блоків теплоізоляційних матеріалів при різному способі монтажу на панельних секціях будинку.....	30
5. Технологічні особливості кріплення та формування єдиної системи теплоізоляції.....	35
6. Еколого-соціальна оцінка технологічних рішень, охорона праці та промислова санітарія... ..	52
7. Управлінські рішення, економічне обґрунтування.....	57
Висновки.....	62
Перелік використаних літературних джерел.....	63

**Додаток Б**

Бази даних, результати математичних обчислень, технічні характеристики  
обладнання

Мінералогічний склад молібденітів за родовищами Українського кристалічного щита.

	Прояв молібденової мінералізації (пмм), рудопрояв, родовище	Кількість аналізів	Масовий % за даними мікрозондових досліджень					
			молібден	сірка	рентій	осмій	вольфрам	сума
<i>Приазовський мегаблок</i>								
1	Ясногірківський пмм	5	59,98	39,86	–	–	–	99,98
2	Вирівський рудопрояв	4	59,87	39,85	0,05	–	0,22	99,99
3	Пержанський пмм	22	60,01	39,83	0,02	–	0,04	99,99
4	Вербинське родовище	65	60,75	40,12	0,02	0,01	–	100,90
5	Ємільчинський пмм	3	59,53	40,00	–	–	–	99,53
6	Березівський пмм	1	59,80	40,20	–	–	0,28	100,28
7	Гута-Потіївський пмм	1	60,57	37,70	–	–	–	98,27
8	Володарськ-Волинський пмм						–	
9	Червоносілківський пмм							
10	Новоград-Волинський пмм	12	59,81	39,71	–	–	0,01	99,53
11	Товстянський пмм	5	60,00	39,98	–	–	–	99,98
12	Ленінський пмм							
13	Безіменний пмм	52	59,84	39,80	0,01	–	0,03	99,68
<i>Росинсько-Тікицький мегаблок</i>								
14	Соснівський пмм	3	60,03	40,07	0,01	–	–	100,11
15	Синявський пмм							
16	Дзюнківський пмм							
17	Тарасівський пмм							
18	Животівський пмм	8	59,92	40,01	–	–	–	99,93
19	Оратівський пмм	3	60,03	39,87	–	–	–	99,90
20	Гайсинський пмм	26	59,96	39,94	–	–	–	99,90
<i>Дністровсько-Бузький мегаблок</i>								
21	Малобраталівський рудопрояв	2	58,92	38,84	–	–	–	97,76
22	Сингаївський пмм							
23	Малочерняхівський пмм							
24	Роставицький пмм	3	60,00	39,80	–	–	–	99,80
25	Немиринецький пмм							
26	Вишнівський пмм	6	59,95	39,93	–	–	–	99,88

27	Гопчинський пмм	6	59,93	39,93	–	–	–	99,86
28	Чагівський пмм	3	59,93	40,07	–	–	–	100,00
29	Русанівський пмм	2	60,25	39,90	–	–	–	100,15
30	Могильнянський пмм							
31	Бакшанський пмм							
32	Кам'янобрідський пмм							
33	Майське родовище	22	59,98	39,99	–	–	–	99,97
34	Голованівський пмм	3	59,93	39,90	–	–	–	99,83
35	Липовеньківський рудопрояр	2	59,24	38,70	0,01	–	0,04	97,99
36	Демов'ярський пмм	3	60,13	39,53	–	–	–	99,66
37	Хмільницький пмм	6	59,75	39,72	–	–	0,01	99,48
38	Завалівський пмм	4	59,76	39,73	–	–	–	99,49
39	Капітанівський пмм	27	59,91	39,84	0,15	–	–	99,90
<i>Інгульський мегаблок</i>								
40	Селищанський пмм	6	59,60	39,93	0,07	–	–	99,60
41	Полохівське родовище	11	59,88	39,97	0,01	–	0,02	99,88
42	Родовище Надія							
43	Калинівське родовище	11	59,89	39,93	–	–	–	99,82
44	Лозуватське родовище	2	59,90	40,05	–	–	–	99,95
45	Родовище Южне	3	59,87	40,17	–	–	–	100,04
46	Бандурський пмм							
47	Миколаївський пмм	2	59,92	40,50	–	–	–	100,42
48	Маліївський рудопрояр	2	59,45	40,70	–	–	–	100,15
49	Казанський пмм	1	59,90	40,00	–	–	–	99,90
<i>Середньопридніпровський мегаблок</i>								
50	Піщанський пмм	1	60,50	39,70	–	–	–	100,35
51	Малокохнівський пмм							
52	Крюківський пмм	1	59,70	40,20				99,90
53	Бородаївський пмм	2	59,70	40,20	–	–	–	99,90
54	Правобережний пмм	3	60,20	39,77	–	–	–	99,97
55	Центральножовтянський пмм	1	60,10	40,20	–	–	–	100,30
56	Ганнівське родовище	11	59,89	40,00	–	–	–	99,89
57	Первомайський пмм	8	60,17	40,00	0,10	–	–	100,27
58	Олександрівський пмм	1	59,80	40,00	–	–	–	100,60
59	Архангельський пмм							
60	Верхівцевський пмм	4	60,12	39,67	–	–	–	99,79
61	Милорадівський пмм	1	60,10	40,10	–	–	–	100,20
62	Софіївський пмм							
63	Токівський пмм	2	60,00	39,90	–	–	–	99,90
64	Східносергіївський рудопрояр	110	59,93	39,92	0,04	0,006	–	99,896

65	Підстепнянський пмм	1	60,10	40,00	–	–	–	100,10
66	Мокромосковський пмм							
67	Чортомлицький пмм	10	59,92	40,02	–	–	–	99,94
68	Правдинський пмм	1	59,20	40,40	–	–	–	99,60
69	Сурський пмм	9	59,81	40,01	0,09	–	–	99,91
70	Родовище Балка Золота	11	59,84	39,79	0,04	–	–	99,67
71	Щербаківський пмм	2	59,90	39,95	–	–	–	99,85
72	Білоозерський пмм							
<i>Приазовський мегаблок</i>								
73	Новополтавський рудопрояв	6	59,85	40,03	0,07	–	–	99,95
74	Сурозьке родовище	5	60,06	39,86	–	–	–	99,92
75	Октябрський пмм	9	60,11	39,63	–	–	–	99,50
76	Дібровське родовище	5	59,58	39,76	–	–	0,24	99,58

## Додаток Б.2.

Значення хімічного складу магнітних, сильномагнітних та немагнітних фракцій досліджуваних зразків відходів вуглезбагачення ПрАТ «Львівська вугільна компанія», а також узагальнені залежності зміни вмісту молібдену від намагніченості поля

Номер проби	Склад	Одиниці виміру	Ідентифікація шламового зразка		
			магнітний	сильномагнітний	немагнітний
1	SiO <sub>2</sub>	%	46,10000	43,80000	59,80000
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18,90000	18,10000	21,90000
1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	25,40000	33,20000	5,92000
1	MgO	%	0,66000	0,62000	1,58000
1	SO <sub>3</sub>	%	2,05000	2,85000	1,25000
1	BaO	%	0,11000	0,12000	0,03000
1	Mo	%	0,01100	0,05500	0,00003
1	Mn	%	0,00320	0,01100	0,00320
1	V	%	0,00330	0,00210	0,00160
1	Cu	%	0,00075	0,00160	0,00110
1	Ge	%	0,00003	0,00006	0,00003
1	Li	%	0,00011	0,00011	0,00016
$M_{O_1} = -0,04949 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,10446 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					
2	SiO <sub>2</sub>	%	41,20000	38,90000	65,10000
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	16,40000	15,60000	25,20000
2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	21,30000	28,40000	7,42000
2	MgO	%	0,56000	0,54000	1,95000
2	SO <sub>3</sub>	%	1,72000	2,30000	1,55000
2	BaO	%	0,09000	0,10000	0,03600
2	Mo	%	0,00900	0,06500	0,00004
2	Mn	%	0,00280	0,00900	0,00280
2	V	%	0,00270	0,00180	0,00140
2	Cu	%	0,00065	0,00140	0,00095
2	Ge	%	0,00002	0,00004	0,00002
2	Li	%	0,00009	0,00009	0,00014

$M_{O_2} = -0,06048 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,12544 \varepsilon_{Fe} + 0,00004$					
3	SiO <sub>2</sub>	%	45,00000	42,60000	60,50000
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18,20000	17,40000	22,80000
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	24,90000	32,00000	6,15000
3	MgO	%	0,64000	0,60000	1,68000
3	SO <sub>3</sub>	%	1,98000	2,70000	1,32000
3	BaO	%	0,10500	0,11500	0,03200
3	Mo	%	0,01050	0,05800	0,00003
3	Mn	%	0,00310	0,01050	0,00310
3	V	%	0,00310	0,00205	0,00155
3	Cu	%	0,00072	0,00155	0,00105
3	Ge	%	0,00003	0,00005	0,00003
3	Li	%	0,00010	0,00011	0,00015
$M_{O_3} = -0,05274 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,11071 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					
4	SiO <sub>2</sub>	%	40,80000	38,10000	66,20000
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	16,10000	15,30000	26,10000
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	22,10000	29,60000	7,65000
4	MgO	%	0,57000	0,55000	2,05000
4	SO <sub>3</sub>	%	1,80000	2,40000	1,65000
4	BaO	%	0,09500	0,10500	0,03800
4	Mo	%	0,00950	0,06200	0,00004
4	Mn	%	0,00290	0,00950	0,00290
4	V	%	0,00280	0,00190	0,00145
4	Cu	%	0,00068	0,00145	0,00098
4	Ge	%	0,00002	0,00004	0,00003
4	Li	%	0,00009	0,00009	0,00016
$M_{O_4} = -0,05723 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,11919 \varepsilon_{Fe} + 0,00004$					
5	SiO <sub>2</sub>	%	48,50000	46,00000	55,30000
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	19,80000	19,10000	20,40000
5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	27,20000	35,80000	5,40000
5	MgO	%	0,70000	0,66000	1,42000
5	SO <sub>3</sub>	%	2,20000	3,00000	1,15000
5	BaO	%	0,11500	0,12500	0,02800

5	Mo	%	0,01150	0,05200	0,00002
5	Mn	%	0,00340	0,01150	0,00340
5	V	%	0,00340	0,00220	0,00160
5	Cu	%	0,00078	0,00165	0,00115
5	Ge	%	0,00003	0,00006	0,00002
5	Li	%	0,00011	0,00012	0,00014
$Mo_5 = -0,04624 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,09822 \varepsilon_{Fe} + 0,00002$					
6	SiO <sub>2</sub>	%	37,50000	35,20000	68,50000
6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	14,80000	14,20000	27,00000
6	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	19,90000	26,50000	8,05000
6	MgO	%	0,50000	0,48000	2,10000
6	SO <sub>3</sub>	%	1,60000	2,20000	1,72000
6	BaO	%	0,08500	0,09500	0,04000
6	Mo	%	0,00850	0,06800	0,00004
6	Mn	%	0,00270	0,00850	0,00270
6	V	%	0,00260	0,00170	0,00135
6	Cu	%	0,00063	0,00135	0,00092
6	Ge	%	0,00002	0,00004	0,00003
6	Li	%	0,00008	0,00008	0,00017
$Mo_6 = -0,06373 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,13169 \varepsilon_{Fe} + 0,00004$					
7	SiO <sub>2</sub>	%	44,30000	42,10000	61,30000
7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	17,90000	17,10000	24,30000
7	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	23,30000	30,20000	6,70000
7	MgO	%	0,62000	0,59000	1,80000
7	SO <sub>3</sub>	%	1,95000	2,65000	1,40000
7	BaO	%	0,10200	0,11200	0,03400
7	Mo	%	0,01020	0,05900	0,00003
7	Mn	%	0,00300	0,01020	0,00300
7	V	%	0,00300	0,00200	0,00150
7	Cu	%	0,00070	0,00152	0,00102
7	Ge	%	0,00003	0,00005	0,00003
7	Li	%	0,00010	0,00010	0,00015
$Mo_7 = -0,05389 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,11286 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					

8	SiO <sub>2</sub>	%	47,20000	44,80000	58,10000
8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18,60000	17,90000	22,20000
8	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	25,80000	34,00000	5,85000
8	MgO	%	0,68000	0,64000	1,55000
8	SO <sub>3</sub>	%	2,10000	2,90000	1,25000
8	BaO	%	0,11000	0,12000	0,03000
8	Mo	%	0,01100	0,05400	0,00003
8	Mn	%	0,00330	0,01100	0,00330
8	V	%	0,00330	0,00210	0,00155
8	Cu	%	0,00076	0,00160	0,00110
8	Ge	%	0,00003	0,00006	0,00003
8	Li	%	0,00011	0,00011	0,00016
$M_{O_8} = -0,04849 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,10246 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					
9	SiO <sub>2</sub>	%	41,80000	39,50000	64,00000
9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	16,60000	15,90000	25,60000
9	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	22,70000	29,10000	7,35000
9	MgO	%	0,58000	0,55000	1,90000
9	SO <sub>3</sub>	%	1,75000	2,35000	1,60000
9	BaO	%	0,09500	0,10500	0,03700
9	Mo	%	0,00950	0,06300	0,00004
9	Mn	%	0,00290	0,00950	0,00290
9	V	%	0,00280	0,00190	0,00145
9	Cu	%	0,00068	0,00145	0,00098
9	Ge	%	0,00002	0,00004	0,00003
9	Li	%	0,00009	0,00009	0,00016
$M_{O_9} = -0,05823 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,12119 \varepsilon_{Fe} + 0,00004$					
10	SiO <sub>2</sub>	%	45,80000	43,20000	59,50000
10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18,40000	17,70000	22,00000
10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	26,10000	34,80000	5,70000
10	MgO	%	0,65000	0,61000	1,60000
10	SO <sub>3</sub>	%	2,00000	2,75000	1,30000
10	BaO	%	0,10800	0,11800	0,03100
10	Mo	%	0,01080	0,05600	0,00003

10	Mn	%	0,00320	0,01080	0,00320
10	V	%	0,00320	0,00205	0,00155
10	Cu	%	0,00074	0,00155	0,00105
10	Ge	%	0,00003	0,00005	0,00003
10	Li	%	0,00010	0,00011	0,00015
$M_{O_{10}} = -0,05059 \varepsilon_{Fe}^2 + 0,10656 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					
Avg*	SiO <sub>2</sub>	%	43,90000	41,30000	62,20000
Avg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	17,70000	16,90000	23,70000
Avg	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	23,60000	30,80000	6,58000
Avg	MgO	%	0,61000	0,58000	1,75000
Avg	SO <sub>3</sub>	%	1,93000	2,62000	1,37000
Avg	BaO	%	0,10000	0,11000	0,03300
Avg	Mo	%	0,0100	0,06000	0,00003
Avg	Mn	%	0,00300	0,01000	0,00300
Avg	V	%	0,00300	0,00200	0,00150
Avg	Cu	%	0,00070	0,00150	0,00100
Avg	Ge	%	0,00003	0,00005	0,00003
Avg	Li	%	0,00010	0,00010	0,00015
$M_{O_{avg}} = 0,0200 \varepsilon_{Fe}^2 - 0,0100 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					
Мінімальні показники зміни вмісту молибдену від намагніченості поля:					
$M_{O_{min}} = 0,0160 \varepsilon_{Fe}^2 - 0,0080 \varepsilon_{Fe} + 0,000024$					
Максимальні показники зміни вмісту молибдену від намагніченості поля:					
$M_{O_{max}} = 0,0240 \varepsilon_{Fe}^2 - 0,0120 \varepsilon_{Fe} + 0,000036$					
Усереднені показники зміни вмісту молибдену від намагніченості поля:					
$M_{O_{avg}} = 0,0200 \varepsilon_{Fe}^2 - 0,0100 \varepsilon_{Fe} + 0,00003$					
Середньоквадратичне відхилення значень зміни вмісту молибдену від намагніченості поля:					
$\varepsilon = \pm 20 \%$					

\*Avg (average) – середні значення концентрацій

## Технічна характеристика муфельної печі FCF 16/150M

Параметр	Значення
Тип печі	FCF 16/150M
Лабораторна піч	Камерна
Діапазон робочих температур печі	0 – 550 –1500 °С
Температура безперервної роботи	1500 °С
Об'єм камери	16 дм <sup>3</sup>
Нагрівальні елементи	MoSi <sub>2</sub>
Розміри робочої камери (ширина × висота × глибина)	230 × 230 × 300 мм
.Тип термопари	PtRh30–PtRh6, тип «В»
Захист температури	MRT-2
Точність встановлення температури	до 1 °С
Метод керування процесом	PID
Максимальна тривалість програми	0–999 год 59 хв
Корпус	Сталевий, порошкове фарбування
Димохід	Вбудований у задню стінку печі, для відведення технологічних газів
Оглядове вікно	Вбудоване у дверцята печі
Система подачі захисного газу	Подача газу безпосередньо в камеру, газове підключення з тильного боку печі
Вентилятори	Вентилятор охолодження простору між трансформатором і нагрівачами; охолоджувальний вентилятор
Кінцевий вимикач	При відкриванні дверцят відключається живлення нагрівачів
Відкривання дверцят	Вправо
Механізм закривання	Пружинний притиск
Напруга живлення	400 В

Номінальна потужність	6 кВт
Маса печі	≈ 160 кг
Габаритні розміри печі (ширина × висота × глибина)	720 × 1680 × 580 мм
<p><i>Програмний сектор температури М.</i> Програмування складної кривої нагріву до 10 етапів або одного етапу до заданої температури з визначенням часу досягнення та витримки; збереження до 10 програм у пам'яті; функції: затримка ввімкнення, автоматична компенсація холодного спаю термопар, контроль пошкодження та розмикання кола нагрівача, автоматичний температурний захист печі, індикація перевищення температури, аварійна сигналізація</p>	



Загальний вигляд муфельної печі FCF 16/150M (паспортне зображення)

Результати дослідження контрольованих фазових перетворення при термічній дії  
на дослідні зразки до 1500 °С

Температура, °С	Втрати маси, %	Руйнування органіки, %	Окиснення MoS <sub>2</sub> → MoO <sub>3</sub> , %	Залишок сульфідів, %	Домінуючі процеси
300	2–3	5–7	~1	~99	Видалення вологи, початкова деградація органіки
450	5–6	38–42	5–6	~94	Активне руйнування органіки
600	10–11	78–82	40–45	~60	Інтенсивне окиснен- ня MoS <sub>2</sub>
750	15–16	100	93–97	3–7	Завершення окиснен- ня сульфідів
<b>900</b>	<b>17–18</b>	<b>100</b>	<b>≈100</b>	<b>≈0</b>	Повне окиснення, початок сублімації MoO <sub>3</sub>
<b>1100</b>	<b>19–21</b>	<b>100</b>	<b>≈100</b>	<b>0</b>	Активна сублімація MoO <sub>3</sub> , спікання золи
<b>1300</b>	<b>22–24</b>	<b>100</b>	<b>≈100</b>	<b>0</b>	Втрата MoO <sub>3</sub> , формування силікат- ної матриці
<b>1500</b>	<b>25–28</b>	<b>100</b>	<b>≈100*</b>	<b>0</b>	Плавлення/спікання, часткова втрата Mo

Температурні фази:

- 0 – 750 °С – підвищення концентрації Мо у досліджуваних зразках;
- 750 – 1500 °С – сублімація Мо та термічна деструкція кристалічної решітки.

## Додаток Б.5.

Вибірка результатів контрольованих фазових перетворень при термічній дії  
на дослідні зразки до температури 750 °C

Температура, °C	Втрати маси, %	Руйнування органіки, %	Окиснення MoS <sub>2</sub> → MoO <sub>3</sub> , %	Сульфідна складова, % залишку
300	2.1	5	1	99
	2.3	6	1.5	98.5
	2.0	5.5	1	99
	2.5	6	2	98
	2.2	5.2	1.2	98.8
	2.4	5.8	1.5	98.5
	2.1	5.1	1	99
	2.3	6	1.3	98.7
	2.0	5	1.1	98.9
	2.5	5.9	2	98
300 avg*	2,24	5,55	1,36	98,64
450	5.1	40	5	95
	5.5	42	6	94
	5.3	41	5.5	94.5
	5.0	39	4.8	95.2
	5.2	40.5	5.2	94.8
	5.4	41	5.8	94.2
	5.1	40	5	95
	5.3	41	5.5	94.5
	5.0	39	4.9	95.1
	5.5	42	6	94
450 avg	5,24	40,55	5,37	94,63
600	10.2	80	40	60
	10.5	82	42	58
	10.3	81	41	59
	10.0	79	39	61

Температура, °С	Втрати маси, %	Руйнування органіки, %	Окиснення MoS <sub>2</sub> → MoO <sub>3</sub> , %	Сульфідна складова, % залишку
	10.4	80.5	41.5	58.5
	10.6	82	42	58
	10.1	80	40	60
	10.3	81	41	59
	10.0	79	39	61
	10.5	82	42	58
600 avg	10,29	80,65	40,75	59,25
750	15.2	100	95	5
	15.5	100	96	4
	15.3	100	94	6
	15.0	100	93	7
	15.4	100	95	5
	15.6	100	97	3
	15.1	100	94	6
	15.3	100	95	5
	15.0	100	93	7
	15.5	100	96	4
750 avg	15,29	100,00	94,80	5,20

Експоненційна апроксимація:

- усереднені значення  $C_{Mo}^{avg}(T) = 0,061 e^{0,00139(T-300)}$  при  $R^2 = 92$

- прикладовий розрахунок коефіцієнта  $k$ :

$$0,100 = 0,060 e^{k(750-300)} \Rightarrow e^{450k} = \frac{0,100}{0,060} \approx 1,666$$

$$450k = \ln(1,6667) \approx 0,5108 \Rightarrow k \approx 0,001135$$

- мінімальні значення  $C_{Mo}^{min}(T) = 0,060 e^{0,0012(T-300)}$  при  $R^2 = 90$

- максимальні значення  $C_{Mo}^{max}(T) = 0,062 e^{0,0015(T-300)}$  при  $R^2 = 93$

Відповідно, узагальнена модель:  $C_{Mo}(T) = C_0 e^{k(T-t_0)}$

де:  $C_0$  – початкова концентрація молібдену, %;  $k$  – експоненційна константа зростання для кожного експерименту,  $t_0$  – початкова температура фазових перетворень (у нашому випадку 300 °С);  $T$  – температура обробки (750 °С – температура початку сублімації Mo).

Прикладовий розрахунок зміни концентрації молибдену за контрольованих фазових перетворень при термічній дії на дослідні зразки до температури 750 °С

### 1. Вихідні умови

Початкова концентрація молибдену в породі:

$C_{\text{Mo},0} = 0,06\%$ (мас.); досліджуване масове перетворення  $\text{Mo} \rightarrow \text{MoO}_3$

За графіком при 750 °С:

- Окиснення  $\text{MoS}_2 \rightarrow \text{MoO}_3 \approx 95\%$ ; - Сульфідна складова  $\approx 0 - 5\%$ ;
- Втрати маси  $\approx 15\%$

Згідно проведених досліджень саме 750 °С є оптимальною точкою:

- максимальне утворення  $\text{MoO}_3$  (без суттєвої сублімації оксиду)

### 2. Перехід від Mo до $\text{MoO}_3$ (стехіометрія)

Молярні маси:

- Mo = 95,95 г/моль; -  $\text{MoO}_3$  = 143,95 г/моль

Коефіцієнт перерахунку:

$$k = \frac{M_{\text{MoO}_3}}{M_{\text{Mo}}} = \frac{143,95}{95,95} \approx 1,50$$

Тобто:

$$0,06\% \text{ Mo} \Rightarrow 0,09\% \text{ MoO}_3 \text{ (у тій самій масі матеріалу)}$$

### 3. Урахування втрат маси (фазо-масові перетворення)

За графіком:

- Втрати маси  $\approx 15\%$ ; – Залишкова маса: 0,85 (85%)

Тоді ефективна концентрація  $\text{MoO}_3$ :

$$C_{\text{MoO}_3} = \frac{0,09}{0,85} \approx 0,106\%$$

### 4. Урахування ступеня окиснення (95%):

$$C_{\text{MoO}_3}^{\text{max}} = 0,106 \times 0,95 \approx 0,10\%$$

Максимальна досяжна концентрація  $\text{MoO}_3$  в результаті контрольованих фазо-масових перетворень при термічній дії ( $\approx 750$  °С) становить приблизно 0,10 мас. %, за умови початкового вмісту молибдену 0,06 мас. %.

Обґрунтування та розрахунок коефіцієнта аналогічності ( $K_{ан}$ ) для умов  
Вербинського рудопрояву

Перший етап розрахунку виконується на основі залежності у вигляді лінійно-зваженої суми нормалізованих параметрів:

$$K_{ан} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \varphi_i$$

де:  $\varphi_i$  – нормалізоване значення  $i$ -го критерію;  $w_i$  – ваговий коефіцієнт важливості параметра;  $n$  – кількість критеріїв, причому  $\sum w_i = 1$ .

Для умов Вербинського рудопрояву було обрано ключові критерії, що визначають технічну та технологічну придатність родовища до підземної розробки.

**Вихідні дані для розрахунку**

Критерій	Характеристика умов Вербинського рудопрояву	Нормалізоване значення $\varphi_i$	Вага $w_i$
Тип родовища	порфірово-штокверковий, типовий аналог	0,85	0,20
Глибина залягання	120–300 м (оптимальний інтервал)	0,90	0,20
Стійкість порід	граніти, гранодіорити, локальні зони ослаблення	0,80	0,15
Гідрогеологічні умови	помірні водопритоки	0,80	0,15
Технологічна придатність	ефективне застосування флотації	0,78	0,15
Екологічна керованість	стандартні природоохоронні заходи	0,75	0,15

**Математичний розрахунок**

Підставляючи значення у формулу:

$$K_{ан} = 0,20 \cdot 0,85 + 0,20 \cdot 0,90 + 0,15 \cdot 0,80 + 0,15 \cdot 0,80 + 0,15 \cdot 0,78 + 0,15 \cdot 0,75$$

$$K_{\text{ан}} = 0,17 + 0,18 + 0,12 + 0,12 + 0,117 + 0,1125$$

$$K_{\text{ан}} = 0,8195 \approx 0,82$$

З урахуванням нелінійної корекції, яка враховує взаємозв'язок параметрів та реалізується через нейромережеву функцію

$$K_{\text{ан}} = NN(\sum w_i \cdot \varphi_i)$$

остаточне значення коефіцієнта аналогічності становить:

$$K_{\text{ан}} \approx 0,81$$

*Інтерпретація результату.* Отримане значення коефіцієнта аналогічності  $K_{\text{ан}} = 0,81$  відповідає високому рівню подібності гірничо-геологічних та технологічних умов Вербинського рудопрояву до еталонних родовищ, на яких успішно застосовується підповерхово-камерна система розробки із закладанням виробленого простору.

Прикладовий розрахунок економічної ефективності за різними сценаріями розвитку для ПрАТ «Львіввугілля»

**Вихідні дані:** Загальні запаси відходів: 80 млн т; потенційний вміст молібдену: 4 000 – 8 000 т; середнє значення для розрахунку: 6 000 т; технологічне вилучення молібдену: припустимо 70 % (реалістичне для сучасних методів фізико-хімічного збагачення і гідрометалургії); Вартість 1 т молібдену: умовно 50 000 USD/т. Витрати на переробку 1 т відходів: умовно 10 USD/т.

Абсолютне вилучення молібдену:

$$Mo_{\text{вилучено}} = \text{запаси } Mo \times \text{коефіцієнт вилучення}$$

$$Mo_{\text{вилучено}} = 6\,000 \text{ т} \times 0,7 = 4\,200 \text{ т}$$

### Економічна ефективність на тонну відходів

Потенційний дохід від молібдену:

$$\text{Дохід} = Mo_{\text{вилучено}} \times \text{ціна за т}$$

$$\text{Дохід} = 4\,200 \text{ т} \times 50\,000 \text{ USD/т} = 210\,000\,000 \text{ USD}$$

Витрати на переробку всіх відходів:

$$\text{Витрати} = \text{обсяг відходів} \times \text{витрати на тонну}$$

$$\text{Витрати} = 80\,000\,000 \text{ т} \times 10 \text{ USD/т} = 800\,000\,000 \text{ USD}$$

Тут видно, що пряма переробка усіх відходів тільки для молібдену може бути економічно не вигідною. Ефективність зростає при комплексному вилученні супутніх компонентів ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Mn$ , рідкоземельні метали), що суттєво підвищує дохід.

### 3. Економічна ефективність на тонну відходів:

$$\frac{\text{Ефективність}}{\text{т}} = \frac{\text{дохід від } Mo \text{ на всю партію}}{\text{загальний обсяг відходів}}$$

$$\text{Ефективність/т} = \frac{210\,000\,000}{80\,000\,000} \approx 2,625 \text{ USD/т}$$

Якщо враховувати супутні цінні компоненти, ця величина може збільшуватися у 2–5 разів.

## Додаток Б.9.

Результати економічної оцінки видобування молібдену із відходів вуглезбагачення  
 ПрАТ «Львівська вугільна компанія»

Сценарій	Запаси молібдену, т	Коефіцієнт вилучення, %	Абсолютне вилучення, т	Дохід, млн USD	Витрати на переробку, млн USD	Ефективність на 1 т відходів, USD/т
Низький/консервативний	4 000	60	2 400	120	800	1,5
Низький/оптимістичний	4 000	70	2 800	140	800	1,75
Низький/максимальний	4 000	80	3 200	160	800	2,0
Середній/консервативний	6 000	60	3 600	180	800	2,25
Середній/оптимістичний	6 000	70	4 200	210	800	2,625
Середній/максимальний	6 000	80	4 800	240	800	3,0
Високий/консервативний	8 000	60	4 800	240	800	3,0
Високий/оптимістичний	8 000	70	5 600	280	800	3,5
Високий/максимальний	8 000	80	6 400	320	800	4,0