

УДК 622.7:622.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-31>

РАЦІОНАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОГЕННИХ УТВОРЕНЬ КРИВБАСУ В АБРАЗИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ: ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ

Олійник Тетяна Анатоліївна,

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри збагачення корисних копалин і хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0315-7308

Кушнірук Наталія Володимирівна,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри збагачення корисних копалин і хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0005-7900-4091

Левченко Костянтин Анатолійович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0005-6490-8805

У статті розглянуто перспективи залучення гранатовмісної техногенної сировини Криворізького басейну до виробництва м'яких абразивів. Метою дослідження є вдосконалення технології сухого збагачення концентратів шляхом поглибленого вивчення фізико-механічних властивостей мінералів, зокрема коефіцієнта тертя та аеродинамічної поведінки.

Методика дослідження передбачала теоретичне моделювання процесу сходження частинок з похилої площини за куту нахилу 30° та довжини 0,5 м. Проаналізовано мінерали основних фракцій (мінус 3 плюс 1 мм, мінус 1 плюс 0,5 мм, мінус 0,5 плюс 0,25 мм), як-от гранат, кварц і біотит. Розраховано швидкість їх сходження та довжину горизонтального прольоту.

Результати моделювання показали, що гранат має найнижчий коефіцієнт тертя та найвищу швидкість сходження (1,36–1,45 м/с), кварц – середні значення (1,00–1,05 м/с), тоді як біотит через свою лускувату форму та високий опір залишався нерухомим. Це дає змогу ефективно відокремлювати його на етапі попередньої класифікації.

Наукова новизна полягає у кількісній оцінці доцільності використання сили тертя як селективного чинника для мінералогічного розділення техногенних фракцій.

Практичне значення роботи полягає у можливості зниження навантаження на магнітні та електросепараційні установки, скороченні енерговитрат, водоспоживання та покращенні якості гранатового концентрату, що відповідає вимогам екологічно орієнтованих технологій у сфері абразивного виробництва.

Ключові слова: гранат, коефіцієнт тертя, техногенна сировина, Криворізький басейн, м'який абразив, сухе збагачення, швидкість сходження, траєкторія частинок, сланці.

Oliinyk Tetiana, Kushniruk Nataliia, Levchenko Kostiantyn. Rational utilization of technogenic formations of the Kryvbas region in abrasive production: physical parameters and technological approaches

The article examines the prospects of utilizing garnet-bearing technogenic raw materials from the Kryvyi Rih Basin for the production of soft abrasives. The aim of the research is to improve the dry beneficiation technology of garnet concentrates through an in-depth study of the physical and mechanical properties of rock-forming minerals, in particular, their friction coefficients and aerodynamic behavior.

The research methodology involved theoretical modeling of particle descent on an inclined plane at an angle of 30° and a length of 0.5 m. Minerals from the main size fractions (–3 + 1 mm, –1 + 0.5 mm, –0.5 + 0.25 mm) were analyzed, namely garnet, quartz, and biotite. The descent velocity and horizontal flight distance of the particles were calculated.

The modeling results showed that garnet exhibited the lowest coefficient of friction and the highest descent speed (1.36–1.45 m/s), quartz showed intermediate values (1.00–1.05 m/s), while biotite, due to its platy shape and high resistance, remained stationary. This enables effective preliminary removal of biotite during classification.

The scientific novelty lies in the quantitative assessment of the feasibility of using frictional force as a selective factor for mineralogical separation of technogenic fractions.

The practical significance of the study is the potential to reduce the load on magnetic and electrostatic separators, lower energy consumption and water usage, and improve the quality of the garnet concentrate to meet the requirements of environmentally oriented abrasive production technologies.

Key words: garnet, coefficient of friction, technogenic raw material, dry beneficiation, descent velocity.

Вступ. В умовах зростаючого техногенного навантаження на довкілля одним з пріоритетних напрямів розвитку гірничо-металургійного комплексу є раціональне використання відходів виробництва. Криворізький басейн, як один з провідних гірничодобувних регіонів України, накопив значні обсяги техногенної сировини у вигляді хвостів збагачення, відвалів, шлаків тощо. Ці відходи займають великі площі, спричиняють забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери, створюючи серйозну екологічну загрозу.

Водночас техногенні утворення Криворізького містять значні кількості мінералів, які можуть бути використані як сировина для отримання різного виду продукції.

Серед таких мінералів особливе місце посідає гранат, який вирізняється цінними фізико-хімічними властивостями та широким спектром промислового застосування. У Криворізького басейну основним джерелом гранату є породи Саксаганської свити Криворізької серії, зокрема гранатовмісні сланці, серед яких особливе значення має Ганнівське родовище. Під час розроблення родовища гранатовмісні сланці як розкритина порода складаються у відвали.

Гранат – це мінерал з групи силікатів, який утворюється в метаморфічних і магматичних породах. Основу його кристалічної решітки становлять оксиди кремнію з включенням металів, таких як алюміній, залізо, магній, кальцій, марганець. У промисловості найбільш цінними є такі різновиди гранату, як альмандин, андрадит і гросуляр, які мають високу твердість, стійкість до хімічного впливу та добре кристалізовану структуру.

Гранат має твердість 6,5–7,5 за шкалою Мооса, що робить його доволі твердим для шліфування й різання, але водночас м'якшим за традиційні абразиви, як-от корунд (твердість до 9) чи карбід кремнію. Саме тому гранат називають м'яким абразивом: він доволі ефективний для обробки поверхонь, не спричиняє їх надмірного зношування, а також знижує ризик мікропошкоджень або перегріву оброблюваного матеріалу.

Ці властивості роблять гранат ідеальним матеріалом для:

- водоструменевого різання;
- шліфування делікатних поверхонь;
- очищення металу перед фарбуванням (піскоструминна обробка);
- виробництва абразивних паст і порошків.

До того ж гранат не містить вільного кремнезему, що знижує ризик виникнення силікозу під час роботи з ним – ще один аргумент на користь його екологічної безпеки.

Серед перспективних напрямів такого використання особливу увагу привертає виробництво абразивних матеріалів, зокрема м'яких абразивів на основі гранатовмісної сировини.

Попит на абразивну продукцію стабільно зростає як у машинобудуванні, металургії, так і в нових високотехнологічних галузях. Залучення техногенних матеріалів до виробництва м'яких абразивів не лише дає змогу знизити витрати на сировину, але й сприяє скороченню обсягів промислових відходів.

Отже, тема отримання м'яких абразивів з техногенної сировини Криворізького басейну є актуальною як з науково-технічної, так і з соціально-екологічної точки зору.

Проблема раціонального використання техногенної сировини гірничо-металургійного комплексу набула особливої актуальності у зв'язку зі зростанням екологічного навантаження на промислові регіони України, зокрема Криворізький басейн. У роботах [2; 4] широко висвітлюються питання утворення, накопичення та потенційного використання техногенної сировини, таких як хвости збагачення залізистих кварцитів, шлаки, пиловловлені матеріали.

Окрему увагу в дослідженнях приділено можливості вилучення цінних компонентів з цих відходів, зокрема мінералів з абразивними властивостями, серед яких особливий інтерес викликає гранат. Низка праць присвячена характеристикам гранатовмісних мінералів, методам їх збагачення, а також застосуванню одержаних продуктів у виробництві м'яких абразивів для гідрорізання, шліфування та очищення поверхонь.

У роботі [3] показано доцільність практичної реалізації підходів до переробки техногенної сировини на прикладі відсіву гранітів Писарівського родовища, який накопичується в значних обсягах як побічний продукт дроблення під час виробництва щебеню. Встановлено, що вміст гранату в цих відходах може досягати 15–20 %, що значно перевищує його середній вміст у вихідній породі. З огляду на абразивні властивості гранату, зокрема його високу початкову ріжучу здатність та ефективність під час оброблення м'яких матеріалів, це створює підґрунтя

для економічно вигідного його вилучення та подальшого використання.

У роботі [3] наведено ефективну схему збагачення гранатовмісного відсіву, яка передбачає комбінацію високоградієнтної магнітної сепарації та електросепарації. Магнітне збагачення дає змогу вилучити слабомагнітний гранат разом з іншими супутніми мінералами (біотитом та епідотом), а подальша електросепарація після класифікації продукту за класами крупності та попереднього знепилювання забезпечує підвищення вмісту гранату в концентраті до 92–94 %. Отримані таким чином концентрати відповідають світовим вимогам до сировини для виробництва м'яких абразивів, шліфувальних матеріалів та інструментів для гідроабразивного різання.

Як показано у джерелі [1], проведені дослідження підтвердили ефективність застосування плівкового конусного класифікатора під час перероблення гранатовмісної сировини. Згідно з наведеними даними, використання цього гідродинамічного класифікатора дає змогу:

- суттєво підвищити вміст гранату в класифікованому проміжному продукті (до 64,12 % у деяких зразках);
- помітно зменшити частку глинистих та пилоподібних фракцій, які ефективно вилучаються зливом;
- забезпечити стабільну роботу обладнання навіть за умов високого вмісту дрібних та глинистих компонентів;
- покращити підготовку матеріалу до наступних стадій збагачення, таких як магнітна та електрична сепарація, що, зрештою, підвищує якість кінцевого концентрату.

Також одним з джерел гранатовмісної сировини в Україні є відходи видобутку граніту з Іванівського родовища. У гранітному відсві Іванівського родовища вміст гранату може сягати 27 %, а загальні запаси оцінюються у понад 25 мільйонів тонн.

Гранати з цього родовища мають піроп-альмандиновий склад, що забезпечує їм високі абразивні властивості. Зерна гранату розміром 2–5 мм легко вилучаються з гранітної породи, яка складається переважно з польового шпату і кварцу. Це спрощує процес збагачення і дає змогу використовувати залишковий матеріал у скляній промисловості.

У 2000 році абразивний гранат з цих відходів пройшов промислове тестування на заводі компанії "Bohler Hochdrucktechnik GmbH" (Австрія) для гідрорізання нержавіючої сталі та алюмінію. Результати показали, що якість різання не поступалася гранату BARTON-Garnet (США) [5].

На початку 2000-х років авторами статті була розроблена технологія отримання гранатового концентрату з гранатовмісних сланців Ганнівського родовища. Ця технологія включає на першій стадії пневмокласифікацію, у якій розділення мінералів здійснюється за рахунок різниці в аеродинамічних властивостях. Це забезпечує ефективне знепилення вихідного матеріалу та виділення фракції меншої за 0,25 мм, яка практично не містить гранату. Основний матеріал розподіляється на три гранатовмісні фракції, що далі збагачуються окремо у відповідних циклах.

Згідно з результатами укрупнених лабораторних досліджень, фракція крупністю $-3 + 1$ мм спрямовується на високоградієнтну магнітну сепарацію, після чого промпродукт додатково обробляється електросепарацією. Фракції $-1 + 0,5$ мм та $-0,5 + 0,25$ мм перед магнітною та електричною сепарацією піддаються контрольному грохоченню для вилучення кумінгтоніту. Така схема збагачення забезпечує отримання трьох концентратів з високим вмістом гранату – 98,75 %, 98,5 % і 96,56 % відповідно, за загального вилучення корисного компонента у концентрати понад 87,79 %.

У зв'язку з актуальністю проблеми переробки техногенної сировини Криворізького залізорудного басейну та високим потенціалом гранатовмісної сировини для абразивного виробництва метою роботи є:

- вивчення морфологічних та фізичних властивостей основних породоутворюючих мінералів гранатовмісних сланців;
- формування практичних рекомендацій щодо вдосконалення технології сухого збагачення гранатової сировини з урахуванням властивостей конкретних мінералів.

Методи та методики дослідження. Для розв'язання поставленої задачі необхідно додатково вивчити фізичні властивості породоутворюючих мінералів гранатовмісних сланців Криворізького залізорудного басейну. Дослідження проводилися на раніше відібраних пробах Ганнівського родовища.

Результати. Локалізація граната в межах товщі залізисто-кремнистої формації Кривбасу є закономірною – 95–97 об'ємних відсотків граната зосереджено у породах Саксаганської свити Криворізької серії. У межах Ганнівського родовища Саксаганська свита, крім трьох залізистих горизонтів (першого-другого, п'ятого і шостого), включає два сланцевих: перший (нульовий за застарілою стратиграфічною системою) і третій-п'ятий (перший), а також два сланцево-залізисті горизонти. Останній складений переважно так званими малорудними залізистими кварцитами

магнетит-біотит-родусит-куммінгтонітового складу з прошарками магнетит-куммінгтоніт-біотитових, магнетит-родусит-куммінгтонітових, дволюдних сланців. Вміст граната у породах горизонту загалом не перевищує один об'ємний відсоток (рис. 1).

Шостий сланцево-залізистий горизонт представлений малопотужними (не більше 10–15 м) невитриманими за потужністю і на глибину родовища лінзами, що локалізуються переважно в центральних частинах продуктивної товщі родовища і розділяють її на п'ятий і шостий залізисті горизонти. За мінеральним складом породи горизонту близькі до магнетит-силікатних кварцитів сьомого сланцево-залізного горизонту і також характеризуються низьким вмістом гранату – у середньому 0,22 об'ємних відсотки (рис. 1).

Перший та третій-п'ятий сланцеві горизонти за петрографічним складом близькі. Сланці обох горизонтів мають ставроліт-гранат-мусковіт-кварц-куммінгтоніт-біотитовий склад. Третій-п'ятий сланцевий горизонт є більш потужними (середня

потужність у межах кар'єру становить 49,8 м) порівняно з першим (31,6 м). Цими причинами зумовлений вибір третього-п'ятого сланцевого горизонту як головного об'єкта досліджень.

Детальне мінералогічне дослідження порід горизонту дало змогу виявити закономірну зміну їхнього мінерального складу в розрізі його товщі (рис. 2).

Під час дослідження були визначені такі фізичні властивості, як щільність, магнітна сприйнятливість та діелектрична проникність породовмісних мінералів. Так за щільністю мінерали, що входять до гранатовмісних сланців, можна поділити на три групи:

- мінерали з низькою щільністю (менше 3,0 т/м³) – кварц, кальцит, мусковіт, хлорит, графіт тощо;
- мінерали із середньою щільністю (3,0–4,0 т/м³) – біотит, куммінгтоніт, ставроліт тощо;
- мінерали з високою щільністю (понад 4,0 т/м³) – магнетит, пірит, гранат тощо.

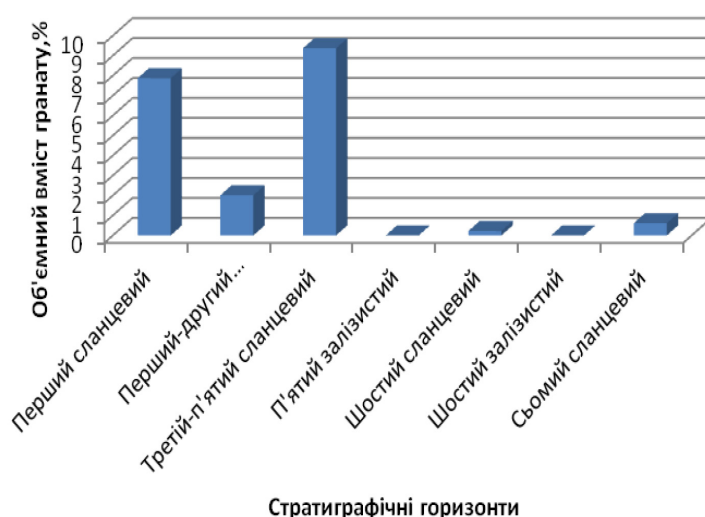


Рис. 1. Вміст гранату в стратиграфічних горизонтах Саксаганської свити Ганнівського родовища

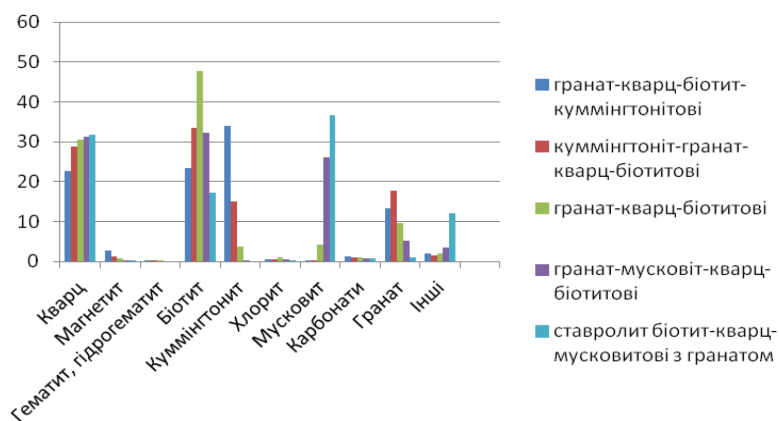


Рис. 2. Середній мінеральний склад (об'ємний %) сланців третього-п'ятого сланцевого горизонту Ганнівського родовища

За магнітними характеристиками породотворюючі мінерали сланців можна поділити також на три групи. До першої належать мінерали з низькими значеннями питомої магнітної сприйнятливості $[(1-10) \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}]$ – кварц, кальцит, мусковіт, пірит, графіт. До другої – з її проміжними значеннями $[(10-500) \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}]$ – хлорит, біотит, гематит, куммінгтоніт, ставроліт, а також гранат. До третьої належить магнетит, що володіє максимальною питомою магнітною сприйнятливістю (близько $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$).

За електропровідністю породотворюючі мінерали гранатовмісних сланців діляться на такі: добре провідні – магнетит, гематит, графіт, пірит; напівпровідні – гранат (залізний); непровідні – біотит, ставроліт, кальцит, кварц, мусковіт, гранат (світлий).

Саме ці відмінності мінералів були покладені в розроблення магнітно-електростатичної схеми збагачення гранатовмісної сировини Ганнівського родовища, з використанням попередньої пневмокласифікації. Згідно з результатами укрупнених лабораторних досліджень, фракція крупністю $-3 + 1 \text{ мм}$ обробляється у два етапи: спочатку на високоградієнтному магнітному сепараторі, а потім промпродукт піддається електросепарації. Для фракцій $-1 + 0,5 \text{ мм}$ та $-0,5 + 0,25 \text{ мм}$ перед магнітною та електричною сепарацією виконується контрольне грохочення задля вилучення кумінгтоніту, який ускладнює подальше розділення. Запропонована схема забезпечує отримання трьох концентратів з високим вмістом гранату – від 96,56 до 98,75 %, за сумарного вилучення цільового мінералу понад 87,79 %.

Під час аналізу вмісту отриманих концентратів було встановлено, що вони містять домішки у вигляді кварцу, біотиту, ставроліту, особливо засмічені концентрати фракцій $-1 + 0,5 \text{ мм}$ та $-0,5 + 0,25 \text{ мм}$, тому було прийнято рішення стосовно удосконалення вже розробленої технології збагачення різних мінеральних видів граната – розглянути інші фізичні властивості породовміщуючих мінералів задля видалення домішок, а саме біотиту та ставроліту, з отриманих концентратів. Подальші дослідження були спрямовані на вивчення впливу коефіцієнту тертя мінералів на швидкість сходження їх з похилої поверхні.

Швидкість сходження з похилої поверхні розрахована для гранату, кварцу, біотиту та ставроліту.

Розрахунок швидкості проводився з урахуванням сили тяжіння, кута нахилу площини та опору тертя, що чиниться поверхнею на мінерал за такою формулою:

$$v = \sqrt{2lg(\sin \alpha - f \cos \alpha)}, \quad (1)$$

де L – шлях, пройдений частинкою;
 g – прискорення вільного падіння;
 f – коефіцієнт тертя частинки;
 α – кут нахилу площини.

Для граната й кварцу додатково було враховано момент інерції, оскільки ці мінерали здатні до обертання (котіння) під час руху, тоді як для біотиту – лише ковзання через його пластинчасту форму.

$$v = \sqrt{\frac{2lg(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{1 + m}}, \quad (2)$$

де m – коефіцієнт, що враховує особливості мінералів до котіння.

Для розрахунків вибрані такі параметри.

Мінерал	Форма	Щільність, г/см ³	Коефіцієнт тертя, f
Гранат	округла/ізометрична	3,9–4,3	0,2–0,25
Кварц	нерегулярна/гостра	2,6–2,7	0,35–0,4
Біотит	лускувата/пластинка	2,9–3,3	0,6–0,8
Ставроліт	призматичні/хрестоподібні	3,7–3,8	0,35–0,6

Загальними умовами для розрахунку були такі: кут нахилу площини – 30° , довжина площини – $0,5 \text{ м}$, матеріал, з якої виготовлена поверхня розділення, – сталь.

Встановлено, що гранат має найменший коефіцієнт тертя і округлу форму зерен, що забезпечує йому найвищу швидкість сходження – $1,36 \text{ м/с}$. Кварц із більшим тертям і нерегулярною формою рухався повільніше – $0,71 \text{ м/с}$. Біотит і ставроліт із високим коефіцієнтом тертя та особливістю будови зерен за заданого кута нахилу взагалі не зрушать з місця, оскільки сила тертя перевищувала силу тяжіння. Для оцінки подальшої траєкторії частинок після сходження з похилої площини було розраховано довжину вильоту (горизонтального польоту) частинок під час сходження з висоти $0,5 \text{ м}$. Гранат, маючи більшу горизонтальну швидкість, пролетів близько $0,45 \text{ м}$, тоді як кварц – $0,32 \text{ м}$. Біотит через відсутність початкової швидкості не мав горизонтального переміщення.

Висновки. Отже, в технологічну схему доцільно включити операцію сходження матеріалів сировини з похилої поверхні на початку технологічного процесу, що дасть змогу вилучити пластівчаті і неправильні за формою домішки, такі як біотит і ставроліт, і тим самим підвищити селективність подальших процесів розділення

магнітно-електростатичної схеми збагачення гранатвмісної сировини Ганнівського родовища. Отже, рекомендацією для удосконалення є технологія збагачення гранатвмісних сланців, за якої теоретичні розрахунки показують можливе зростання якісних показників концентрату, а саме зростання масової частки гранату до 98–99 % та його вилучення до 90–95 %.

Враховуючи різницю у фізичних характеристиках мінералів, зокрема коефіцієнти тертя та форми зерен, включення до схеми збагачення операції розділення частинок за швидкістю сходження з похилої поверхні дає змогу оптимізувати загальну ефективність процесу. Попри те, що пряме підвищення вмісту гранату у кінцевому концентраті не відбувається, очікується помітне зниження енергоспоживання на наступних стадіях магнітного та електричного збагачення – до

10–15 % за рахунок зменшення об'ємів матеріалу, що обробляється. Також знижується ступінь зносу робочих поверхонь обладнання та кількість дрібнодисперсного біотиту в концентраті.

Подальші дослідження доцільно зосередити на створенні лабораторного стенду з регульованим кутом нахилу, варіативною поверхнею та можливістю вібраційного навантаження. Окрему увагу слід приділити вивченню впливу вологи, шорсткості поверхні на ефективність розділення. Крім того, важливо провести енерготехнологічне моделювання з урахуванням економічної доцільності впровадження цього методу у промислових масштабах. Такі дослідження дадуть змогу остаточно обґрунтувати ефективність і доцільність застосування технологічної операції розділення мінералів за тертям у схемах переробки гранатвмісної техногенної сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Babii K., Shevchenko O. Improvement of the technological scheme for the enrichment of raw materials containing garnet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1481, No. 1. Art. no. 012016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1481/1/012016>
2. Валовий О. І., Єрьоменко О. Ю., Валовий М. О. Визначення можливості використання відходів видобутку та збагачення залізних руд при будівництві автошляхів в кар'єрі та на відвалах. *Вісник Криворізького національного університету*. 2022. Вип. 54. С. 137–143.
3. Левченко К. А., Шатова Л. А., Рудицький А. В. Особливості збагачення гранатової сировини Писарівського родовища. *Збагачення корисних копалин*. 2019. Вип. 72 (113). С. 3–7.
4. Лемешев М. С., Сівак К. К., Стаднічук М. Ю., Сівак Р. В. Сучасні підходи комплексної переробки промислових техногенних відходів. *Сучасні технології в будівництві*. 2022. Вип. 31, № 2. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-37-44>
5. Надра Сервіс. Мінералогічні послуги. URL: <https://nadraserVICES.com/ua/company-experience/services/mineral> (дата звернення: 17.05.2025).

REFERENCES:

1. Babii, K., & Shevchenko, O. (2025). Improvement of the technological scheme for the enrichment of raw materials containing garnet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1481 (1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1481/1/012016>
2. Valovyi, O. I., Yeriomenko, O. Yu., & Valovyi, M. O. (2022). Vyznachennia mozhlyvosti vykorystannia vidkhodiv vydobutku ta zbahachennia zaliznykh rud pry budivnytstvi avtoshliakhiv v kar'yeri ta na vidvalakh [Determining the possibility of using iron ore mining and processing waste in road construction in quarries and dumps]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 54, 137–143. [in Ukrainian].
3. Levchenko, K. A., Shatova, L. A., & Rudytskyi, A. V. (2019). Osoblyvosti zbahachennia hranatovoi syrovyny Pysarivskoho rodovyshcha [Features of garnet raw material beneficiation of the Pysarivske deposit]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral Processing*, 72 (113), 3–7. [in Ukrainian].
4. Lemeshev, M. S., Sivak, K. K., Stadniichuk, M. Yu., & Sivak, R. V. (2022). Suchasni pidkhody kompleksnoi pererobky promyslovykh tekhnogenykh vidkhodiv [Modern approaches to comprehensive processing of industrial technogenic waste]. *Suchasni tekhnolohii v budivnytstvi – Modern Technologies in Construction*, 31(2), 37–44. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-37-44>. [in Ukrainian].
5. Nadra Servis. (2025). Mineralohichni posluhy [Mineralogical services]. Retrieved May 17, 2025, from <https://nadraserVICES.com/ua/company-experience/services/mineral>. [in Ukrainian].

Стаття надійшла: 11.07.2025

Стаття прийнята: 03.08.2025

Опублікована: 10.11.2025

