

- [elektризuvati-kar-iemij-transport/?fbclid=IwAR2skv5J7ZG2qbdh0AZ4Qvq6M582hm1xVMqliPjchVgsEg8q5iv2rBPxixA](https://elektризuvati-kar-iemij-transport/?fbclid=IwAR2skv5J7ZG2qbdh0AZ4Qvq6M582hm1xVMqliPjchVgsEg8q5iv2rBPxixA)
7. Siemens patented all-electric Mobile Mining Truck based on proven technology / <https://im-mining.com/2021/11/04/siemens-patented-electric-mobile-mining-truck-based-proven-technology/>
  8. Caterpillar introduces trolley assist system for CAT® electric drive mining trucks / [https://www.cat.com/en\\_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html](https://www.cat.com/en_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html)
  9. Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Thanks to Boliden's recent trial at its Aitik open-pit mine, in Sweden, the subject of trolley assist is back on the mining industry's agenda. / <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>
  10. Trolley-assisted haul roads construction and maintenance / <https://www.globalroadtechnology-blog.com/industry-articles/trolley-assisted-haul-roads-construction-and-maintenance>
  11. Liebherr Trolley Trucks Testing Success at Austrian Mine <https://www.heavyliftnews.com/liebherr-trolley-trucks-testing-success-at-austrian-mine/>
  12. An introduction to trolley-assist haulage systems/ <https://globalroadtechnology.com/trolley-assist-haulage-systems/>
  13. 5 things you may not have known about the Trolley Assist System <https://www.liebherr.com/en/ind/latest-news/news-press-releases/detail/5-things-you-may-not-have-known-about-the-trolley-assist-system.html>
  14. Can a dirty industry come clean? How mining equipment is becoming more sustainable / <https://www.mobilehydraulictips.com/can-a-dirty-industry-come-clean-how-mining-equipment-is-becoming-more-sustainable/>
  15. **Y. Monastyrskyi, V. Sistuk, I. Maksymenko.** Prospects for using truck trolley-assisted haulage systems in deep iron ore open pit mines. Vytautas Ostaševičius (pirmininkas). (2023). Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference. P.705 – 709. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference/> . doi:10.5755/e01.2351-7034.2023.P2.

Рукопис подано до редакції 21.03.24

УДК 622.7

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., О.В. БУЛАХ, Л.В.СКЛЯР, кандидати техн. наук, доценти, Криворізький національний університет

М.О. ОЛІЙНИК, канд. техн. наук, менеджер продукту, компанія "Weir Minerals"

## ОСОБЛИВОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ ГЕМАТИТОВИХ РУД ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ КРИВБАСУ В КРУПНОСТІ 1-0 ММ

**Мета.** Метою даної роботи є проведення досліджень сухим способом на залізних рудах підземного видобутку з визначенням технологічних показників на вібраційному полігармонічному гравітаційному сепараторі.

**Методи дослідження.** Мінералогічний, хімічний аналізи. Гранулометричний склад матеріалу визначався за допомогою ситового аналізу, обробка та узагальнення матеріалу дозволили створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за крупністю на похилій поверхні вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора.

**Наукова новизна.** На підставі визначення параметрів сепарації гематитових кварцитів підземного видобутку Кривбасу і особливостей їх мінерально-технологічного складу встановлено, що ефективність процесу класифікації у повітряному середовищі за граничним зерном 1 мм вище 97 % може бути досягнута за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву з визначеним кутом нахилу декі, що дозволило отримати товарний залізорудний концентрат з масовою часткою заліза загального 65,32% при його виході 57,48% та вилученні заліза загального у концентрат 61,91%.

**Практична значимість.** Дослідження та промислові випробування зі збагачення залізних руд підземного видобутку Кривбасу сухим способом з використанням вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора показали доцільність, перспективність, високу ефективність та можливість реалізації на гірничо-збагачувальних комбінатах, які здійснюють переробку рядової залізорудної сировини з отриманням концентрату зі значною часткою корисного компонента, що забезпечує можливість отримання високоякісної продукції.

**Результати.** В результаті проведених промислових випробувань сепарації мінеральної сировини у повітряному середовищі за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву доведено можливість отримання з гематитових руд підземного видобутку Кривбасу високоякісного залізорудного концентрату крупністю 1-0 мм 57,48% за виходом з масовою часткою заліза загального 65,32 % і масовою часткою оксиду кремнію 5,9 % . Ефективність сепарації при цьому 97,37 %.

**Ключові слова:** видобуток підземний, сепаратор полігармонічний високочастотний, розділення, крупність, склад гранулометричний, поверхня просіювальна, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-33-39

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Частка товарної залізорудної продукції, що одержується з руд підземного видобутку і експортується на зовнішній ринок підприємствами становить близько 50% ринку України. Масова частка заліза у таких рудах коливається від 54,0 до 60,0%, що не дозволяє їй бути конкурентоспроможною не тільки на зовнішньому, а й навіть на внутрішньому сировинному ринку [1].

Збагачення залізних руд, зокрема підземного видобутку є важливим аспектом у гірничодобувній індустрії. Цей процес сприяє ефективному вилученню цінних компонентів із руд, що підвищує загальну продуктивність та економічну ефективність видобутку. В комплексі це є складним процесом, що включає безліч технологічних етапів та спрямовано на підвищення концентрації заліза в руді і забезпечення високої якості кінцевого продукту як цінної сировини для металургійної промисловості. Ефективне використання різних методів переробки залізорудної сировини істотно впливатиме на якість і вартість металу, що робить його важливою ланкою в ланцюжку видобутку та обробки природних ресурсів.

Але, у сучасній гірничодобувній промисловості, особливо при підземному видобутку залізних руд, існує низка проблем, пов'язаних з їх подальшою переробкою. Однією з ключових проблем є високий вміст нерудної складової у видобутій сировині, що обґрунтовує необхідність розробки ефективних методів збагачення руд для отримання якісного продукту.

Існуючі методи можуть бути енерговитратними та вимагати значних фінансових вкладень, що створює додаткові проблеми для промислових підприємств. Окрім цього необхідність дотримання суворих екологічних стандартів під час переробки руд стає дедалі актуальнішою у суспільстві.

Не варто забувати й про економічні аспекти, які відіграють важливу роль, оскільки високі витрати на технології переробки та обмежені ресурси можуть стати на заваді розвитку галузі. Пошук ефективних та економічно вигідних рішень залишається важливим завданням для промисловості з переробки залізорудної сировини.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Підвищення конкурентоспроможності залізорудної товарної продукції, яку виробляють гірничо-видобувні підприємства нині є однією з актуальних проблем галузі. Наразі ці підприємства випускають основну продукцію у вигляді багатих залізних руд з вмістом корисного компоненту на рівні 54-61% та концентратів якістю 64-67%. Для використання такої продукції у доменному виробництві вміст заліза повинен бути не менше 55%. Підвищення якості концентрату, в більшості випадків, досягається шляхом підвищення вмісту заліза та зменшення кількості шкідливих домішок, що у подальшому буде сприяти інтенсифікації процесів доменного виробництва [2-4].

Серед усіх мінералів, які містять залізо та визначатимуть перспективність залізорудних родовищ будуть магнетит, гематит, мартит, гетит [5], які є подальшою сировиною для процесів металургійного виробництва. Постійно зростаючий попит на сталь зумовлює залучення у переробку навіть низькосортних руд через стрімке зниження запасів багатой руди. При цьому можуть використовуватись деякі технології збагачення, що передбачають використання різниці у специфічних властивостях рудної і нерудної фаз [6].

Однак, через складність мінерального складу та постійне зниження якості вихідної сировини існуючі технології збагачення, зокрема гематитових руд, потребують певних заходів щодо їх удосконалення. Нині проблемі переробки багатих гематитових руд необхідно приділити особливу увагу через велику кількість факторів, які будуть впливати на вибір методу їх збагачення. Перш за все вплинуть умови та глибина їх видобутку та, як наслідок, погіршення якості видобуваної сировини [7, 8].

На початкових стадіях розробки заходів щодо отримання продукту потрібної якості було використано рудорозбірку ручним способом, що давало змогу виділити продукт якістю 65 мас.%, який представлено багатими мартитовими та залізолюдко-мартитовими різновидами. У подальшому, технології переробки цієї сировини поступово вдосконалювались та були спрямовані на більш повне вилучення заліза шляхом класифікації за крупністю та впровадженням методів більш глибокої переробки [8]. Однак, в умовах сучасних проблем з водопостачанням досить важливим завданням буде вирішення питання розробки «сухих» способів сепарації [9].

При підземному видобутку залізної руди, через її змішаний мінеральний склад, досить часто використовується первинна переробка яка заснована на методах дезінтеграції з подальшим поділом за крупністю з отриманням аглоконцентрату та неконденційного продукту. Видобута

гематитова руда з вмістом заліза 51-55 мас.% дробиться за три стадії з подальшою класифікацією за крупністю, що дозволяє збільшити вміст заліза у дрібному класі до 55-59 мас.% [10].

Розвиток технологій збагачення залізних руд підземного видобутку буде спрямовано на підвищення ефективності, зниження екологічного впливу та впровадження інноваційних рішень.

В такому випадку потрібно обрати метод переробки та створити необхідні умови для отримання концентрату з вмістом корисного компонента, що перевищуватиме 62% [11].

**Постановка задачі.** Технологічна можливість збагачення залізних руд підземного видобутку наразі вивчається та повністю не визначена. Це дає змогу більш детально дослідити дану сировину за допомогою мінералогічного, хімічного, гранулометричного аналізів та визначити особливості збагачення руд у крупності 1-0 мм для отримання конкурентоспроможного товарного продукту.

**Викладення матеріалу та результати.** З метою визначення можливості та необхідності збагачення залізних руд підземного видобутку сухим способом були проведені деякі дослідження з грохочення на вібраційному полігармонічному гравітаційному сепараторі з визначенням технологічних показників. Даний сепаратор дозволяє розділяти корисні копалини з широким діапазоном фізичних властивостей, що є його перевагою у порівнянні з іншим обладнанням для класифікації матеріалу за крупністю.

Програма виконання технологічних випробувань включала детальне вивчення мінералогічного, гранулометричного складу матеріалу, проведення експериментів зі збагачення у повітряному середовищі на діючому устаткуванні та аналізу і синтезу отриманих результатів.

Вихідна сировина, яка поступала на дослідження, представлена гематитовими кварцитами підземного видобутку Криворізького басейну крупністю 16-0 мм з вмістом заліза загального 61,5%. Рудна частина представлена гематитом у різновидах мартит+залізна слюдка та дисперсним гематитом. Зустрічається також магнетит з вмістом близько 2,5%. Нерудну частину представлено, в основному, кварцом з його вмістом на рівні 12%. До інших мінералів, які присутні у досліджуваній сировині належать: хлорит, біотит, гідрогематит, гетит, каолінит, апатит, карбонат, пірит. Мінеральний та гранулометричний склад вихідної сировини наведено у табл.1 та 2.

Таблиця 1

Мінеральний склад вихідної сировини

| Мінерали               |                    |          |       |      | Сума   |
|------------------------|--------------------|----------|-------|------|--------|
| гематит                |                    | магнетит | кварц | інші |        |
| мартит+залізна слюдка. | дисперсний гематит |          |       |      |        |
| 64.54                  | 17.49              |          |       |      |        |
|                        |                    | 2.5      | 12.0  | 2.75 | 100.00 |

Таблиця 2

Гранулометричний склад вихідної сировини

| Клас крупності, мм | Частковий вихід, % | Сумарний вихід, % | Вміст заліза загального, % | Вилучення, % |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| -16+10             | 9.17               | 9.17              | 42.48                      | 6.46         |
| -10+6              | 11.36              | 20.53             | 55.4                       | 10.44        |
| -6+2               | 12.7               | 33.23             | 56.5                       | 11.9         |
| -2+1               | 8.67               | 41.9              | 60.3                       | 8.67         |
| -1+0.5             | 8.92               | 50.82             | 63.91                      | 9.45         |
| -0.5+0.25          | 33.05              | 83.87             | 65.61                      | 35.96        |
| -0.25+0.16         | 13.62              | 97.49             | 63.91                      | 14.43        |
| -0.16+0.071        | 0.87               | 98.36             | 63.11                      | 0.9          |
| -0.071+0.050       | 0.3                | 98.66             | 65.71                      | 1.79         |
| -0.05+0            | 1.34               | 100               |                            |              |
| Разом              | 100                |                   | 60.31                      | 100          |

Досліджувана сировина характеризується тонко- та дрібнозернистою структурою та шаруватою текстурою. Гематит характеризується тонким зрощенням з нерудними мінералами та має низький ступінь розкриття у класах крупності – 0,1 мм. В цьому випадку буде дещо складним отримання багатой товарної аглоруди та бідних відвальних хвостів через наявність тонких включень гематиту у нерудній частині та його проростання у ній. Агрегати та індивіди гематиту є досить тонкими, глибоко пророщеними у зернах кварцу та характеризуються розміром

0,001 – 0,05 мм. При цьому, наявність у вихідній сировині гідроксидів заліза та силікатів, що містять залізо визначить відносно високий вміст корисного компоненту у хвостах сепарації. Тому, для отримання високоякісної товарної продукції з руди підземного видобутку крупністю 16 – 1 мм на збагачення потрібно спрямовувати матеріал з вмістом класу – 0,074 мм на рівні 90 – 100%.

Вивчений матеріал крупністю -16+1,0 мм на 53,5% складний гематитової рудою з величезним переважанням її мартитового різновиду. Близько 40% матеріалу представлено тонкошаровими гематитовими кварцитами, серед яких виявлено всі мінералогічні різновиди. Решта загальної маси матеріалу проби представлена гематитовими середньошаровими, безрудними та малорудними кварцитами (рис.1).

Вивчення розподілу зростків та вільних уламків показало, що вже в класі крупності -1,0+0,5 мм вільні мартитові уламки трохи більше перевищують кількість мартитових зростків. У класі -0,16+0,071 мм кількість зростків мартиту становить близько 6% загального обсягу мартиту. У класі крупності -0,071+0,05 мм цей показник становить 3,5%. Стовідсоткове розкриття мартиту спостерігається в класі крупності -0,05 мм (рис.2).

Оцінка розкриття мартиту у матеріалі крупністю -1,0+0,0 мм показала, що значне переважання (92,6% проти 7,4%) вільних уламків над зростками відзначається у класі крупності -0,071+0,05 мм.

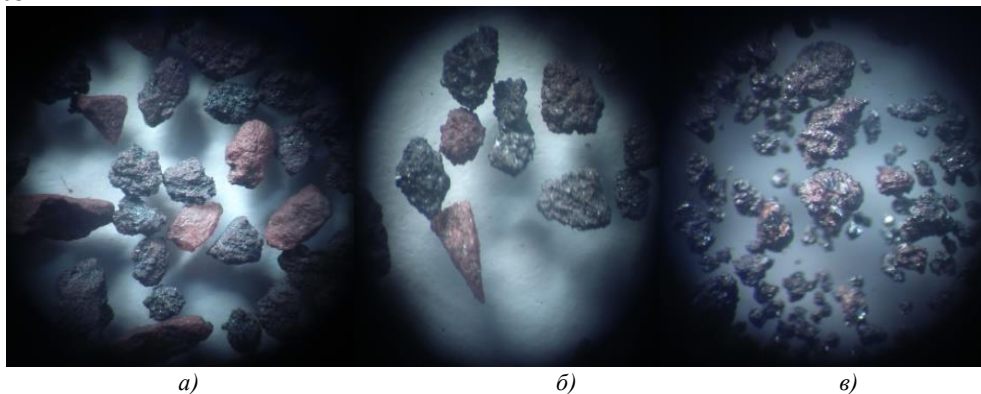


Рис. 1. Матеріал класів крупності -2,0+1,0 мм (а); -1,0+0,5 мм (б); -0,5+0,25 мм (в)

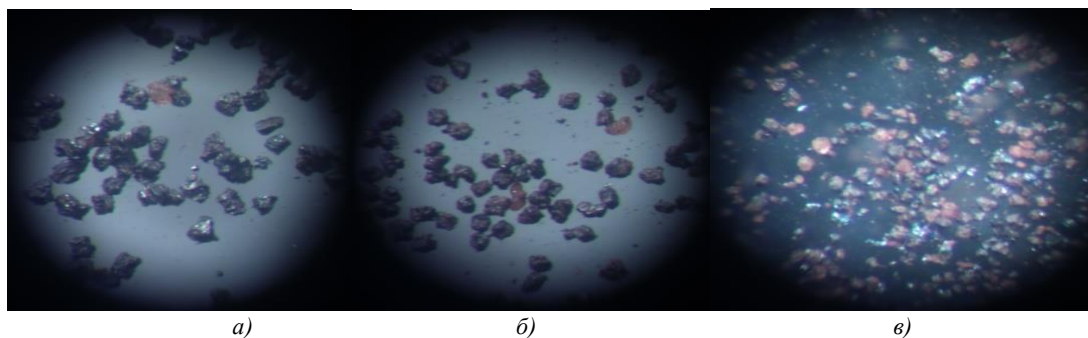
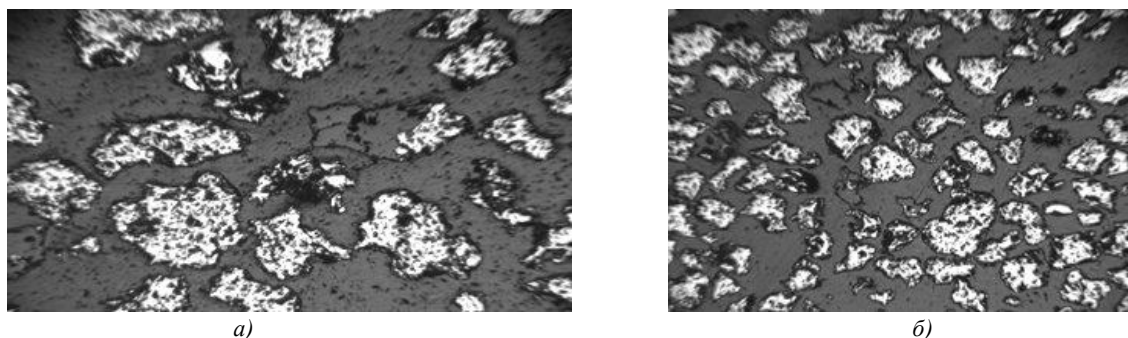


Рис. 2. Матеріал класів крупності -0,16+0,071 мм (а); -0,071+0,05 - мм (б); -0,05 мм (в)

У матеріалі крупністю -0,16+0,071 мм кількість мартитових зростків становить 32,1%. Стовідсоткове розкриття мартиту спостерігається у крупності -0,05 мм (рис. 3).



**Рис. 3.** Матеріал класів крупності  $-0,16+0,071$  (а) та  $-0,071+0,05$  (б) мм; 1 – багаті зростки мартиту; 2 – багаті зростки кварца; 3 – вільні уламки мартиту; 4 – вільні уламки кварцу – зб. 125<sup>х</sup>; б – зб. 85<sup>х</sup>

Як зазначено вище, крупність вихідної сировини складала 16-0 мм та вологість в межах 5-6%.

Дослідження проводилися на сепараторі у якого просіювальна поверхня має сито, що самоочищається з можливістю регулювання кута нахилу у діапазоні від 25° до 30° при постійній питомій продуктивності сепаратора за вихідним живленням, що складала 6-8 т/м<sup>2</sup>·год. Сепаратор має можливість налаштування на матеріали з широким діапазоном фізичних властивостей, що істотно відрізняє його від аналогічних машин для поділу сировини по крупності. Він призначений для поділу твердих частинок, що містяться в матеріалі, як у вологих, так і сухих сипких сумішах на два класи крупності [12,13].

З метою підвищення ефективності грохочення визначена можливість регулювання амплітуди та частоти коливань рами сепаратора.

За результатами експериментальних досліджень визначено оптимальний кут нахилу деки, що при питомій продуктивності сепаратору 7,2 т/м<sup>2</sup>·год склав 30° (табл. 3). Так, при куті нахилу сита 30° досягнуто найкращі показники збагачення гематитової руди, а саме масова заліза загального у підрешітному продукті складала 65,32%. Вихід концентрату – 57,48% при вилученні заліза загального у концентрат 61,91%. Ефективність сепарації при цьому складала 97,37%. У результаті аналізу досліджень встановлено, що при класифікації руди у повітряному середовищі шляхом високочастотного розсіву за граничним зерном 1 мм використовуючи прийняті налаштування сепаратора можливо отримати високоякісний товарний продукт з масовою часткою заліза загального більш ніж 65 %.

Таблиця 3  
Результати досліджень на сепараторі ВПГС-5М за граничним зерном 1 мм та різним кутом нахилу деки

| Кут нахилу деки | Найменування продукту | Вихід, % | Масова частка Fe <sub>заг</sub> , % | Вилучення Fe <sub>заг</sub> , % | Ефективність розділення, % |
|-----------------|-----------------------|----------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 25              | Надрешітний           | 39,01    | 55,84%                              | 35,93                           | 98,13                      |
|                 | Підрешітний           | 60,99    | 63,68                               | 64,07                           |                            |
|                 | Вихідний              | 100,00   | 60,62                               | 100,00                          |                            |
| 27,5            | Надрешітний           | 42,57    | 54,31                               | 38,19                           | 96,10                      |
|                 | Підрешітний           | 57,43    | 65,16                               | 61,81                           |                            |
|                 | Вихідний              | 100,00   | 60,54                               | 100,00                          |                            |
| 30              | Надрешітний           | 42,52    | 54,33                               | 38,09                           | 97,37                      |
|                 | Підрешітний           | 57,48    | 65,32                               | 61,91                           |                            |
|                 | Вихідний              | 100,00   | 60,65                               | 100,00                          |                            |

За результатами розгорнутого хімічного аналізу отриманого підрешітного продукту (табл. 4), який є концентратом визначено, що масова частка кремнезему в отриманому продукті становить 5,9%. Ситовий аналіз наведено у табл. 5.

Таблиця 4  
Результати розгорнутого хімічного аналізу отриманого концентрату крупністю 1-0 мм

| Показники         | Елементи         |                                |        |     |                                |      |      |                  |                   |                  |       |       |        |       |                 |                    |                 |      |
|-------------------|------------------|--------------------------------|--------|-----|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------|------------------|-------|-------|--------|-------|-----------------|--------------------|-----------------|------|
|                   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe заг | FeO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO   | P     | S заг. | Cl    | CO <sub>2</sub> | Солі водо-розчинні | Fe <sub>м</sub> | Ппп  |
| Ма-сова частка, % | 5,9              | 0,15                           | 65,32  | 2,1 | 91,05                          | 0,09 | 0,25 | 0,05             | 0,12              | 0,032            | 0,038 | 0,011 | 0,021  | 0,187 | 0,054           | 0,318              | 1,42            | 0,62 |

Таблиця 5  
Результати ситового аналізу отриманого концентрату крупністю 1-0 мм

| Показники | Класи крупності, мм |        |           |            |             |             |         | Разом |
|-----------|---------------------|--------|-----------|------------|-------------|-------------|---------|-------|
|           | +1                  | -1+0,5 | -0,5+0,25 | -0,25+0,16 | -0,16+0,071 | -0,071+0,05 | -0,05+0 |       |
| Вихід, %  | 5,84                | 14,46  | 53,57     | 22,07      | 1,42        | 0,49        | 2,15    | 100   |

За результатами мінералогічного аналізу отриманого концентрату (табл. 6) з'ясовано, що він складається переважно з мартиту та дисперсного гематиту. При цьому кількість магнетиту та інших мінералів незначна. Найбільший вміст мартиту спостерігається у класах крупності -0,25+0,1; -0,1+0,071 та -0,071+0,05 мм, а найменший – у класі -0,05 мм. Вміст дисперсного гематиту поступово знижується, починаючи з верхніх класів крупності, але характеризується найбільшим значенням у класі -0,05 мм. Вміст кварцу не перевищує 6,0 об.%, але видно, що у верхніх (+0,5, -0,5+0,25 мм) та нижніх (-0,071+0,05, -0,05 мм) класах крупності його вміст більше ніж проміжних класах крупності.

Таблиця 6

Мінеральний склад отриманого концентрату крупністю 1-0 мм, об.%

| Клас крупності, мм    | Мінерали        |           |          |       |      | Всього |
|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-------|------|--------|
|                       | гематит         |           | магнетит | кварц | інші |        |
|                       | мартит+ зал.сл. | дисп.гем. |          |       |      |        |
| +0,5                  | 68,0            | 22,3      | 1,3      | 6,3   | 2,1  | 100,0  |
| -0,5+0,25             | 68,5            | 22,1      | 1,1      | 5,4   | 2,9  | 100,0  |
| -0,25+0,1             | 69,6            | 21,4      | 0,9      | 4,4   | 3,7  | 100,0  |
| -0,1+0,071            | 70,3            | 20,3      | 1,4      | 4,1   | 3,9  | 100,0  |
| -0,071+0,05           | 69,8            | 19,6      | 1,2      | 5,3   | 4,1  | 100,0  |
| -0,05+0,0             | 63,2            | 25,3      | 1,1      | 6,1   | 4,3  | 100,0  |
| Разом за концентратом | 68,0            | 22,0      | 1,2      | 5,5   | 3,3  | 100,0  |

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проведені дослідження з визначення можливості збагачення залізних руд підземного видобутку Кривбасу у повітряному середовищі з використанням вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора показують доцільність та перспективність використання запропонованого способу.

На підставі визначення параметрів сепарації гематитових кварцитів підземного видобутку Кривбасу і особливостей їх мінерально-технологічного складу встановлено, що ефективність процесу класифікації у повітряному середовищі за граничним зерном 1 мм вище 97 % може бути досягнута за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву з визначеним кутом нахилу декі, що дозволило отримати товарний залізорудний концентрат з масовою часткою заліза загального 65,32% при його виході 57,48% та вилученні заліза загального у концентраті 61,91%. Масова частка кремнезему у концентраті – 5,9 %.

#### Список літератури

1. Tetiana OLIINYK, Liudmila SKLYAR, Natalia KUSHNIRUK, Nadiya HOLIVER, Barbara TORA, 2023 – Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego, Inżynieria Mineralna z. 1(51), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przetwórci Kopalni, Kraków, s. 33 – 44 <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-04>
2. **Ступнік М.І.** Розробка технологій збагачення середньовкраплених гематитових кварцитів Кривбасу / М.І. Ступнік, В.В. Перегудов, В.С. Моркун, Т.А. Олійник, М.К. Короленко // Nauka innov. - 2020. - Т.16, №6. - С. 56-72.
3. **Олійник Т.А.** Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд / Т.А. Олійник // Збагачення корисних копалин. – 2018. – Вип. 69(110). – С. 32-44.
4. **Булах О.В.** Пошук рішень з підвищення ефективності збагачення окислених руд Кривбасу / О.В. Булах, О.О. Булах // Гірничий вісник. – 2016. – Вип. 101. – С. 174-178.
5. **Булах О.В.** Вдосконалення технології збагачення змішаних руд / О.В. Булах // Гірничий вісник. – 2017. – Вип. 102. – С. 183-187.
6. Електронний ресурс: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591020303338>
7. **Трачук А.А.** Аналіз способів обогачення кускових гематитових руд Кривбасу / А.А. Трачук // Гірничий вісник. – 2015. – Вип. 100. – С. 92 – 95.
8. **Булах О.В.** Розвиток технологій переробки бідних залізних руд гематит-мартитового складу / О.В. Булах // Збагачення корисних копалин. – 2019. – Вип. 73(114). – С. 16-20.
9. Електронний ресурс: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591018308441>

10. Олейник Т.А. Повышение качества бедных кусковых рад шахтной добычи Кривбасса методом отсадки / Т.А. Олейник, Л.В. Складар // Збагачення корисних копалин. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 44-57.

11. Ніколасенко К.В. Технологічні рішення збагачення бідних гематитових руд штату Оріса (Індія), для отримання з них кондиційного концентрату / К.В. Ніколасенко, В.Д. Євтехов, В.В. Філенко, П.К. Ніколасенко // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 34. – С. 111-114.

12. Пат. 26638 України, МПК U51C1/00. Спосіб збагачення залізорудної сировини / Рева О.В., Євтехов В.Д., Ахкзов Ю.Л.– u200708203; заявл. 18.07.2007; опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15,2007.

13. Пат. 87016 України, МПК C251C1/00. Спосіб збагачення залізорудної сировини / Рева О.В., Євтехов В.Д., Ахкзов Ю.Л.– a200708201; заявл. 18.07.2007; опубл. 10.06.2009. Бюл. № 11.2009

Рукопис подано до редакції 25.03.24

УДК 669.054.83

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., Т.П. ЯРОШ, канд. техн. наук, доц.,  
О.В. БАБАЄВСЬКА, М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викладачі,  
Д.Ю. БАБОШКО, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ МЕТАЛУРГІЙНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ

Відзначено різноманітність методів утилізації червоного шламу – побічного продукту глиноземного виробництва, світове накопичення якого неухильно збільшується, посилюючи негативний вплив на оточуюче природне середовище. Показано, що переважна більшість найбільш ефективних методів утилізації базується на поєднанні піро- та гідрометалургійних способів. Проаналізовано основні науково-практичні результати ряду досліджень металургійних методів утилізації червоного шламу, опублікованих у провідних фахових виданнях протягом кількох останніх років. Зроблено висновок про економічну доцільність комплексного вилучення з червоного шламу цінних металів – заліза, алюмінію, титану, скандію. Відзначено необхідність проведення дослідно-промислових випробувань технологій безвідходної переробки червоного шламу з урахуванням його характеристик.

**Метою роботи** є порівняльний аналіз металургійних методів утилізації червоного шламу з метою визначення розробок, найбільш перспективних для промислової реалізації.

**Методи наукового дослідження.** У роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

**Наукова новизна роботи.** На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш ефективними методами металургійної переробки червоного шламу, які забезпечують найбільший ступінь вилучення металів, є такі, що в оптимальному співвідношенні поєднують процеси піро- і гідрометалургії при мінімальних витратах енергії та викидах шкідливих речовин в оточуюче середовище.

**Практична значущість** роботи полягає в розширенні уявлень щодо можливих напрямів вирішення проблеми масштабної утилізації червоного шламу, отриманні висновків, які дають необхідну науково-технічну інформацію для ефективного практичного застосування найбільш результативних методів металургійного використання червоного шламу та вказують перспективні шляхи продовження досліджень у цьому напрямку.

**Результати роботи** свідчать про те, що сучасний рівень розробок металургійних методів утилізації червоного шламу вже наблизився до положення, яке дозволяє впевнено визначати економічно ефективні, технологічно досконалі безвідходні прийоми переробки цієї цінної техногенної сировини. Широке промислове впровадження безвідходних металургійних методів утилізації червоного шламу не тільки зменшить собівартість виробництва глинозему і відповідно алюмінію, але й суттєво покращить екологічну ситуацію в районах розташування підприємств алюмінієвої промисловості.

**Ключові слова:** червоний шлам, утилізація, пірометалургія, гідрометалургія, технологія, відновлення, вилугування, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-39-45

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Червоний шлам є побічним продуктом найбільш поширеного процесу промислового виробництва глинозему з бокситу за способом Байєра, а глинозем є сировиною для отримання алюмінію, другого за затребуваністю металу в світі після заліза. У зв'язку з характерними технологічними операціями гідрохімічного способу Байєра, який передбачає тонке подрібнення вихідної сировини та її подальшу обробку лужним розчином, на виході з процесу червоний шлам являє собою лужну (рН = 9-12) розбавлену ( $R = P : T = 8-10$ ) пульпу червоного кольору, шкідливу для оточуючого середовища та здоров'я людини. Завдяки цим характеристикам, а також наявності в складі червоного шла-