



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>

editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 6628.477

STUDY OF BENEFICIATION WASTE PROCESSING IRON ORE

Nadiia A. Klymova, Oleksii O. Khlopytskyi*, Ihor L. Kovalenko, Liliya A. Frolova,
Natalia P. Makarchenko

Ukrainian State University of Science and Technologies, Research Institute of USUCT, 2, Lazaryana str., Dnipro, 49010, Ukraine

Received 4 May 2025; accepted 7 June 2025; available online 15 July 2025

Abstract

This paper reviews studies on the processing of iron ore concentration wastes from several samples of Ukrainian ore processing plants. The morphological and chemical composition of the Kryvyi Rih, Ingulets, and Poltava samples was determined. A basic technological scheme for processing these samples is presented. It was found that the Kryvyi Rih waste sample contains 38 % total iron, 20 % silica, and 14 % alumina, while the Ingulets sample contains almost 50 % total iron, 10 % silica, and 8 % alumina, while the Poltava sample contains only 28 % iron, 55 % silica, and 2 % alumina. The effect of gravity beneficiation is most effectively reflected in the Poltava sample, as a result of an increase in Fe content from 28 % to 52 %. It was found that the subsequent magnetic beneficiation of the Poltava sample increases the Fe content from 52 % to 63 %, with a mass yield of 65 %. It was found that the final stage – flotation beneficiation of the Poltava sample increases the Fe content from 63 % to almost 66 %, which makes it possible to use it further.

Keywords: iron ore; waste, iron; alumina; silica; beneficiation; gravity; magnetic; flotation; processing.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Надія А. Климова, Олексій О. Хлопицький, Ігор Л. Коваленко, Лілія А. Фролова,
Наталія П. Макаrenchенко

Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, вул., Лазаряна 2, Дніпро, 49010, Україна

Анотація

У даній роботі розглянуті дослідження переробки відходів від збагачення залізної руди декількох зразків українських гірничозбагачувальних комбінатів. Встановлено морфологічний та хімічний склад зразків із Криворізького, Інгулецького та Полтавського комбінатів. Представлена принципова технологічна схема переробки цих зразків. Встановлено, що криворізький зразок відходів містить 38 % загального Fe, 20 % кремнезему та 14 % глинозему, інгулецький зразок містить майже 50 % загального вмісту Fe, 10 % кремнезему та 8 % глинозему, а полтавський зразок містить лише 28 % Fe, 55 % кремнезему та 2 % глинозему. Вплив гравітаційного збагачення найбільш ефективно відображається на Полтавському родовищі, як результат – збільшення вмісту Fe з 28 % до 52 %. Встановлено, що подальше магнітне збагачення полтавського зразку збільшує вміст Fe з 52 % до 63 %, за масового виходу 65 %. Встановлено, що кінцева стадія – флотаційне збагачення – полтавського зразку збільшує вміст Fe з 63 % майже до 66 %, що дає можливість його подальшого використання.

Ключові слова: залізна руда; відходи; залізо; глинозем; кремнезем; збагачення гравітаційне, магнітне, флотаційне; переробка.

*Corresponding author: e-mail: ahlopitskiy@gmail.com

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v33i2.328767

Вступ

Переробка техногенних відходів, особливо відходів збагачення залізної руди, є важливою складовою частиною сучасних технологій у металургійній галузі, яка дає можливість зменшити вплив промисловості на навколишнє середовище і покращити ефективність використання природних ресурсів. Відходи збагачення можуть містити значну кількість Fe та інших корисних компонентів, тому їх переробка відкриває нові можливості для підвищення економічної ефективності та зниження екологічних ризиків.

Одним з основних методів переробки відходів є магнітна сепарація, яка застосовується для вилучення Fe з «хвостів», що утворюються під час збагачення залізної руди. Автори [1] в своїй роботі описують використання магнітної сепарації для відновлення Fe з «хвостів», де вміст Fe досягає 25–30 %. Цей метод дозволяє значно зменшити обсяги відходів і знизити витрати на їх утилізацію.

Іншим поширеним методом є флотація, яка використовується для відділення корисних компонентів від нецінних мінералів. У дослідженні авторів [2] описано, як флотаційні технології дозволяють вилучати залишкові частки Fe з відходів збагачення. Підвищення ефективності флотаційних процесів за допомогою нових реагентів дозволяє зменшити кількість відходів, що залишаються після основного збагачення.

Крім того, перспективними є методи гідрометалургії, які дозволяють вилучати корисні метали з техногенних відходів за допомогою розчинів кислот чи лугів [3–5]. Автори [6] розглядають можливості гідрометалургійних процесів для вилучення Fe і важких металів із «хвостів» збагачення. Такий підхід дозволяє не лише відновлювати корисні компоненти, але й знижувати токсичність відходів.

Авторами [7; 8] досліджена можливість використання доменного шлаку, як сорбенту для очищення стічних вод. Екологічний аспект переробки відходів є важливою темою в сучасних дослідженнях. Відходи збагачення залізної руди часто містять важкі метали, які можуть забруднювати навколишнє середовище за неналежного управління ними. Тому одним з важливих завдань є зниження токсичності відходів за допомогою технологій, які дозволяють вилучати

небезпечні елементи і зменшувати їх концентрацію.

У дослідженні, представленому авторами [9], йдеться про можливість використання відходів збагачення руди як сировини для будівельних матеріалів, зокрема для виготовлення цементу та бетонів. Автори [10–12] використовують техногенні відходи для виробництва склокристалічних матеріалів та конструкційної кераміки. Це дозволяє зменшити кількість відходів, що потрапляють на сміттєзвалища, і одночасно використовувати їх для створення нових корисних матеріалів.

Дослідження авторів [13] також вказують на можливість використання відходів для створення нових матеріалів, таких як фільтри для очищення води від важких металів. Відходи збагачення залізної руди завдяки своїй пористій структурі можуть бути ефективними в цьому застосуванні. Автори [14] вказують на можливість використання Fe та інших металів із техногенних відходів для одержання каталізаторів окиснення амоніаку.

Важливими є також новітні підходи до переробки відходів, зокрема нанотехнології, які застосовуються для поліпшення процесів відновлення металів і зниження токсичності відходів. У роботі авторів [15] запропоновано використання наночастинок для покращення ефективності флотації та магнітного сепарування. Нанотехнології дозволяють не лише збільшити ефективність процесів, але й забезпечити зниження витрат енергії та часу.

Ще однією перспективною технологією є біотехнологічні методи, що включають використання бактерій і мікроорганізмів для вилучення металів із відходів. Бактерії можуть сприяти розчиненню металів і їх подальшому вилученню з відходів, що знижує екологічне навантаження на довкілля. У дослідженнях авторів [16] показано, що біообробка відходів збагачення залізної руди може бути ефективним способом зменшення їх шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Переробка відходів збагачення залізної руди має потенціал для застосування в інших промислових галузях, зокрема в будівництві. Відходи можуть бути використані як добавки до бетону, цегли та інших будівельних матеріалів, що знижує витрати на сировину та сприяє утилізації відходів, [17] показує, що додавання відходів збагачення залізної руди в бетон покращує його міцність і знижує

витрати на виготовлення будівельних матеріалів.

Метою роботи є дослідження переробки відходів збагачення залізної руди з використанням гравітаційного, магнітного та флотаційного методів збагачення для подальшого їх використання в різних галузях промисловості.

Матеріали та методи досліджень

В роботі використовували відходи збагачення залізної руди Інгулецького, Криворізького та Полтавського комбінатів, які представляють собою розсипчастий матеріал сірувато-чорного кольору (густина 2.6–4.1 г/см³) з розміром частинки від 0.03 до 110 мм.

Дослідження фазового та хімічного складу вихідних відходів збагачення залізної руди та одержаних фракцій проводили з використанням сучасних методів аналізу таких як рентгено-фазовий аналіз (дифрактометр ДРОН-3); чистоту матеріалу визначали рентгенофлуорисцентним аналізатором («EXPERT 02L, спектрометра «Elvax») та хімічний склад досліджуваних

зразків визначали методом рентгенофлуорисцентного аналізу за допомогою прецезійного аналізатора EXPERT3L. Границя виявлення елементів за 100 с (від 12 с Mg до 92 с U) становить $\leq 0.05\%$.

Результати та їх обговорення

Встановлення морфологічних характеристик різних типів зразків відходів було першочерговою задачею дослідження. На рисунку 1 представлено порівняння розподілу частинок за розміром трьох зразків відходів. Інгулецький зразок дуже дрібний за своєю природою, лише 7 % його більше 63 мм. Вміст ультрадрібних частинок (<10 мм) становить понад 61 %. Криворізький зразок крупніший за інгулецький та полтавський, одночасно вміст ультрадрібних частинок становить лише 42 %. Полтавський зразок у порівнянні із інгулецьким і криворізьким є середньорозмірним, про що вказує вміст ультрадрібних частинок лише близько 25 %. Встановлено, що розподіл сировини за розміром відіграє значну роль у ефективності збагачення представлених зразків.

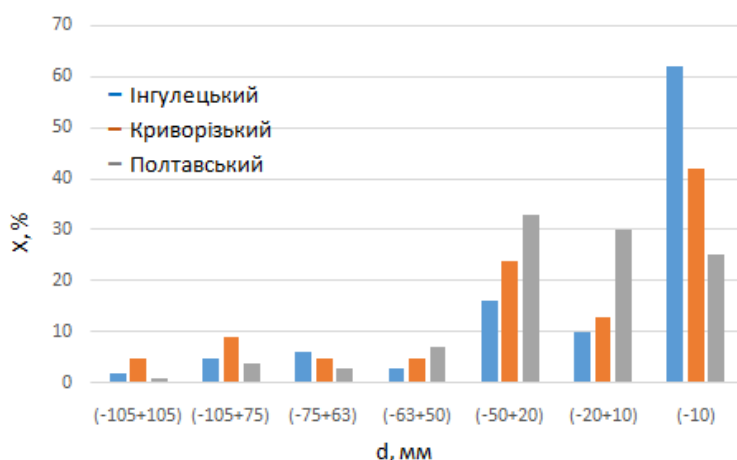


Fig. 1. Morphology of iron ore beneficiation waste
Рис 1. Морфологія відходів збагачення залізної руди

Хімічний склад відходів по зразкам різних збагачувальних комбінатів вказує на суттєву різницю між ними, а також вони відрізняються розподілом цінних сполук (рис. 2.). Криворізький зразок відходів містить 38 % загального Fe, 20 % кремнезему та 14 % глинозему. Відповідно інгулецький зразок містить майже 50 % загального вмісту Fe, 10 % кремнезему та 8 % глинозему, тоді як полтавський зразок містить лише 28 % Fe, 55 % кремнезему та 2 % глинозему. Помітно,

що у криворізькому зразку крупніші фракції багаті Fe, проте вміст пустої породи спостерігається в менш дрібних фракціях. Вміст глинозему в полтавському зразку незначний, хоча вміст кремнезему є надмірним. Крім того, спостерігається, що розподіл кремнезему є рівномірним для всіх фракцій в цьому зразку. Ці характеристики суттєво відображаються на продуктивності обробки, що висвітлюється в результатах роботи, які обговорюватимуться нижче.

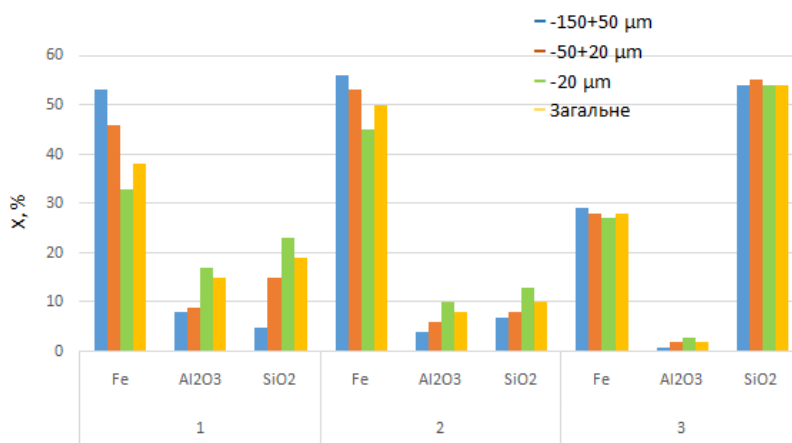


Fig. 2. Distribution of valuable compounds in samples of iron ore concentration waste (1 – Kryvyi Rih sample; 2 – Ingulets sample; 3 – Poltava sample)

Рис. 2. Розподіл цінних сполук у зразках відходів збагачення залізної руди (1 – криворізький зразок; 2 – інгулецький зразок; 3 – полтавський зразок)

Дані аналізу по вилученню цінних сполук для трьох зразків наведені на рисунку 3. Виходячи з аналізу одержаних даних, можна сказати, що характеристики криворізького та інгулецького зразків дещо схожі з точки зору їх складу. Об'ємний відсоток вільної породи також підвищується зі зменшенням розміру частинок, у результаті чого об'ємний відсоток вільного гематиту зменшується. Очевидно, що

вміст Fe більший в інгулецькому зразку. Характеристики полтавського зразка кардинально відрізняються від криворізького та інгулецького зразків. Значне ущільнення спостерігається навіть за розмірів 50 мм. Кількість вільного гематиту і вільної породи значно збільшується за умови менших розмірів частинок, що свідчить про посилене їх вилучення.

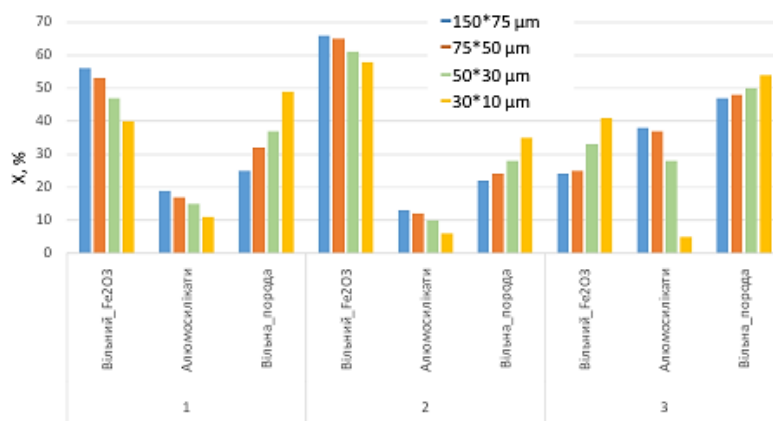


Fig. 3. Characterization of the extraction of valuable compounds from samples of iron ore concentration waste (1 – Kryvyi Rih sample; 2 – Ingulets sample; 3 – Poltava sample)

Рис. 3. Характеристика вилучення цінних сполук по зразках відходів збагачення залізної руди (1 – криворізький зразок; 2 – інгулецький зразок; 3 – полтавський зразок)

Обробка інгулецького та криворізького зразків показала, що багатий на Fe продукт (що містить понад 65 % Fe), може бути отриманий для виготовлення гранул [18]. Ми проводили фізичне збагачення полтавського зразку, наводячи порівняння з результатами переробки інгулецького та криворізького зразків. Як результат – подібна обробка різномірних зразків може давати бажаний продукт, що продемонстровано за допомогою

технологічної схеми та проведенням порівняльних досліджень.

Як згадувалося раніше, основні відмінності полтавського зразку від криворізького та інгулецького зразків полягають, окрім вмісту Fe, у вмісті кремнезему та глинозему. Вміст глинозему (2 %) в цьому зразку не має значення, водночас вміст кремнезему дуже високий, а вміст Fe дуже низький. Це в свою чергу вимагає ретельної обробки для

подальшого отримання придатного продукту. Питома вага та магнітна сприйнятливість цінного компонента (гематиту Fe_2O_3) набагато вищі, ніж у вільної породи (тобто в основному кремнеземі), тоді як їхні поверхневі характеристики також сильно відрізняються. Ці відмінності ефективно використовуються для поетапного видалення вільної породи. Беручи до уваги фізичні переваги криворізького та інгулецького зразків, вивчені раніше, загальний процес

концептуалізовано в технологічну схему обробки залізорудних зразків, яка показана на рисунку 4. Проміжні потоки можуть бути перероблені, щоб мінімізувати втрати цінних сполук в потоках відходів, а також підвищити загальний масовий вихід. Збагачення полтавського зразку також добре вписалося в цю схему обробки, хоча й з деякими змінами. Полтавський зразок не містить великої кількості ультрадрібних частинок, а розподіл вільної породи рівномірний у всіх розмірах.

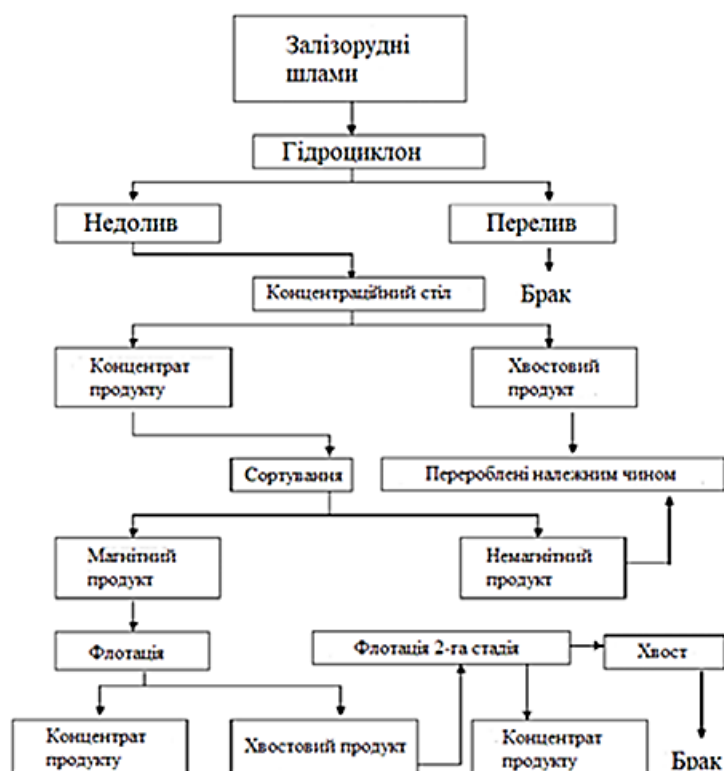


Fig. 4. Schematic flow diagram of processing samples of iron ore beneficiation waste
Рис.4. Принципова технологічна схема обробки зразків відходів збагачення залізної руди

Гравітаційне збагачення

Критерій концентрації є першочерговим показником перед початком процесу збагачення з використанням гравітаційних методів [18; 19]. Таким чином, набагато легшу вільну породу та порівняно важчу вільну породу легше відокремити одна від одної [20]. Відомо, що гравітаційна концентрація працює найкраще, коли критерій концентрації перевищує 2.5. Припускаючи, що середня щільність можна і густина гематиту становить 5.5 г/см^3 , а кремневої вільної породи – 2.6 , критерій концентрації для цього зразку становить 2.81 .

Лабораторний струшувальний стіл працював із нахилом 6.35 мм , частота

струшування становила 280 об/хв. , а витрата промивної води – 3 л/хв. Пульпу з 10% твердої речовини подавали за допомогою перистальтичного насоса зі швидкістю подачі 14 кг/год (суха тверда речовина). Три продукти, а саме концентрат, промпродукт і «хвости», були проаналізовані за хімічним складом. Результати тестування полтавського зразка представлені в таблиці 1. Очевидно, що на цьому етапі якість зразку можна значно покращити. Одностадійне внесення призвело до збагачення значення Fe з 28% до 52% . Однак рівень концентрату все ще низький, тому необхідне подальше очищення, щоб отримати придатний продукт.

Table 1

Results of gravity beneficiation of the Poltava sample

Таблиця 1

Результати гравітаційного збагачення полтавського зразка

Продукт	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Вихід (%)	Вихід (%) (відносно оригіналу)
Концентрат	51.45	23.10	0.90	40.2	40.2
Промпродукт	16.70	71.65	1.85	5.8	5.8
«Хвости»	12.34	76.65	2.54	54.0	54.0
Початковий зразок	28.32	54.83	1.84	100	100

Дуже високий рівень відбраковування вільної породи досягається для полтавського зразка лише з помірними втратами Fe у «хвостовому» потоці. Вилучення вільної породи для криворізького зразка супроводжується значною втратою Fe. Втрата Fe низька для інгулецького зразка на цьому етапі, але відторгнення вільної породи також відносно низьке. Криворізький зразок містить значну кількість ультрадрібних фракцій, які швидше за все потрапляють у «хвости». Спостерігається, що вилучення фракцій менших розмірів є кращим у полтавському зразку, і він містить набагато менше ультрадрібних частинок. Ці характеристики сприятливо впливають на обробку, покращуючи відторгнення вільної породи та зменшуючи втрати Fe. Інгулецький зразок є фракційнокрупнішим і отже для цього зразка встановлені набагато менші втрати Fe навіть із більше ніж 50 %-вим відбракуванням вільної породи.

Магнітне збагачення

Є три типи відношення речовин до магнітного поля:

Феромагнетики – орієнтуються по магнітному полю (притягаються до магніту). З металів це залізо, нікель, кобальт, гадоліній і ще ряд перехідних металів з коротким часом життя.

Парамагнетики поведуться майже як феромагнетики, але з деякими відмінностями. Наприклад, не намагнічуються у відсутності поля і вимагають потужніших полів для прояву видимих ефектів, ніж феромагнетики. З металів до них відносяться багато лужних та рідкісноземельних елементів, а також алюміній, скандій, ванадій та ін.

Діамагнетики, грубо кажучи, на магнітне поле не реагують. Це – всі інші метали, які не потрапили в попередні групи.

Окрім гравітаційної сепарації, магнітна сепарація є досить корисною для подальшого концентрування залізорудних зразків [21; 22].

Концентрати зразків піддавали обробці магнітною сепарацією для подальшого підвищення якості продукту. Суміш з 10 % твердих речовин подавали через перистальтичний насос за швидкості 20 кг/год і підтримували швидкість потоку промивної води 20 л/хв. Струм 0.7 А, що відповідає напруженості поля 0.52 Т. Знову були отримані три продукти, які були проаналізовані на загальний вміст Fe, кремнезему та глинозему. Майже 63 % Fe в магнітному продукті досягається на цій стадії за масового виходу 65 %, як показано в таблиці 2.

Table 2

Results of magnetic enrichment of the Poltava sample

Таблиця 2

Результати магнітного збагачення полтавського зразка

Продукт	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Вихід (%)	Вихід (%) (відносно оригіналу)
Магнітний продукт	62.75	7.20	0.71	64.7	26.0
Промпродукт	33.59	48.92	1.01	21.0	8.4
Немагнітний продукт	26.54	57.10	1.58	14.3	5.7
Початковий зразок	51.45	23.10	0.90	100	40.2

Представлені дані вказують, що видалення вільної породи відбулося зі значною втратою Fe на цій стадії.

Завдяки відносній крупності та хорошему вивільненню дрібно розмірних частинок, втрати Fe для полтавського зразка набагато

менші за інші зразки, до того ж спостерігається чудове видалення кремнезему. Високий відсоток вмісту ультрадрібних фракцій в інгулецькому та криворізькому зразках головним чином відповідає за великі втрати Fe в цих двох випадках із лише помірним відторгненням вільної породи. Однак за умови безперервної роботи проміжні потоки можна рециркулювати належним чином, щоб мінімізувати втрати цінних сполук.

Флотаційне збагачення

Флотацію застосовують як кінцевий етап для збагачення відходів збагачення залізної руди [23–25], що дає можливість для забезпечення $\geq 65\%$ Fe в кінцевому концентраті після повної переробки полтавського зразку. З цього приводу нагадаємо, що магнітний концентрат мав майже 63% Fe. Такий відсоток достатній для деяких підприємств, які проводять гранулювання, відповідно подальша переробка цього концентрату не потрібна.

Але ми вирішили збільшити частку Fe в концентраті.

У зв'язку з цим ми використовували пряму флотацію магнітного концентрату (гематиту) з аніонним колектором за $\text{pH} = 9.0$. Як збирач використовували олеат натрію з концентрацією 1.0 кг/т , а для зниження тиску вільної породи додавали 0.5 кг/т силікату натрію та 0.2 кг/т MIBC (метил-ізобутил карбінол) використовували як спінювач.

Флотацію проводили, використовуючи лабораторний флотатор у 2 л камери періодичної флотації з часом кондиціонування 3 хв. У камері підтримували густину пульпи 10% твердих речовин. Результати флотаційних випробувань представлені в таблиці 3. Вміст Fe підвищено до понад 65% з кінцевим вмістом глинозему та кремнезему 0.7% і 2% відповідно. Кінцевий продукт із таким складом є придатною сировиною для подальшого гранулювання.

Table 3

Results of flotation beneficiation of the Poltava sample

Таблиця 3

Результати флотаційного збагачення полтавського зразка

Продукт	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Вихід (%)	Вихід (%) (відносно оригіналу)
Концентрат	65.88	2.15	0.69	68.5	17.8
«Хвости»	56.12	10.31	0.79	31.5	8.2
Магнітний концентрат	62.75	7.2	0.71	100	26.0

«Хвости» від стадії флотації містять значну кількість Fe (56%). Значна частина цього може бути відновлена на наступних стадіях промивної флотації та перероблена відповідним чином у безперервній роботі. Це дослідження демонструє, що придатний продукт ($>65\%$ Fe) можна отримати за допомогою простої та недорогої фізичної обробки залізрудного криворізького зразку з дуже низьким вмістом Fe (28%).

Переробка відходів збагачення залізної руди дає відчутну вигоду у вигляді відновлених цінних компонентів. Об'єм відходів, що виходять із етапів переробки, значно менший, ніж початкові відходи. Крім того, кінцеві відходи більш збіднені на цінні компоненти, ніж вихідний матеріал. Очевидно, є явна перевага як з погляду навколишнього середовища, так і з точки зору відновлення корисних компонентів.

Відомо, що чим вищий бажаний сорт кінцевого продукту, тим менший його

масовий вихід. Крім того, є певні втрати цінних компонентів у «хвостовому» потоці, особливо коли цільовий рівень концентрату є високим. Таким чином, зазвичай існує компроміс між масовим виходом цінного продукту та його сортністю.

Крива рівня відновлення для запропонованої схеми обробки стає корисною для визначення режиму роботи. Такі криві для переробки криворізького, інгулецького та полтавського зразків, як показано експериментальними даними без переробки, представлені на рисунку 5.

Це дає якісне порівняння продуктивності процесу для полтавського зразку на відміну від інгулецького та криворізького зразків. З рис. 5 видно, що характеристики полтавського зразку є більш сприятливими з точки зору обробки. Криворізький зразок є найважчим для обробки, тоді як інгулецький зразок є проміжним.

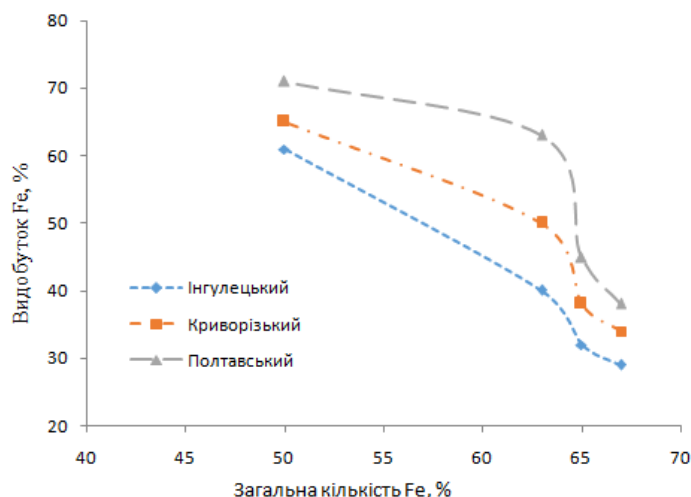


Fig. 5. Recovery curve of valuable components during the processing of three samples without recycling
Рис. 5. Крива відновлення вмісту цінних компонентів при переробці трьох зразків без рециркуляції

Однак система обробки має власну межу ефективності, і кількість втрат цінних компонентів у «хвостовому» потоці також регулюється цим рівнем ефективності. Ще одним вирішальним фактором є якість сировини, особливо вміст ультрадрібних частинок. Ультрадрібні (< 10 мм) важко переробляти, і вони швидше за все потрапляють у хвостовий потік, що призведе до втрати цінних компонентів і збільшення об'єму відходів. За 65 % вмісту заліза для концентрата, вилучення Fe становить 32 % для інгулецького зразку, 38 % для криворізького зразку та 45 % для полтавського зразку. Якщо вміст заліза знижується до 63 %, вилучення Fe покращується майже до 40 % для інгулецького зразку, 50 % для криворізького зразку та понад 60 % для полтавського зразку.

Висновки та перспективи досліджень

З нашої точки зору, оптимальним варіантом для комбінованої тристадійної переробки відходів збагачення залізної руди є полтавський зразок. Криворізький зразок відходів у свою чергу містить 38 % загального Fe, 20 % кремнезему та 14 % глинозему, інгулецький зразок – майже 50 % загального вмісту Fe, 10 % кремнезему та 8 % глинозему. Вплив гравітаційного збагачення найефективніше відображається на полтавському зразку, як результат – збільшення вмісту Fe з 28 % до 52 %. Наступна стадія – флотаційне збагачення – полтавського зразку збільшує вміст Fe з 63 % майже до 66 %, що дає змогу його подальшого використання.

Потенціал переробки криворізького та інгулецького зразків дає змогу подальшого їх використання, в першу чергу на гірничозбагачувальних комбінатах та як перспективна вторинна сировина для одержання концентрату залізної руди та похідних заліза.

References

- [1] Zhang, X., Han, Y., Sun, Y., Lv, Y., Li, Y., Tang, Z. (2019). A Novel Method for Iron Recovery from Iron Ore Tailings with Pre-Concentration Followed by Magnetization Roasting and Magnetic Separation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(2), 117–129. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1604522>
- [2] Zhao, S., Fan, J., Sun, W. (2014). Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 540–548. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019)
- [3] Khlopytskyi, A., Savenkov, A., Bliznjuk, O., Skiba, M., Vorobiova, V., Masalitina, N. (2022). Leaching of FeO and CaO by nitric acid from ash-slag wastes of thermal power plants. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 1, 95–99. DOI: [10.32434/0321-4095-2022-140-1-95-99](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-95-99)
- [4] Klymova, N., Khlopytskyi, O., Kovalenko, I., Makarchenko, N. (2024). Research on the extraction of rare earth elements from ash-slag waste. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2, 26–31. doi: [10.32434/0321-4095-2024-153-2-26-31](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-26-31)
- [5] Khlopytskyi, O.O., Kovalenko, I.L., Frolova, L.A., Skiba, M.I., Makarchenko, N.P. (2023). Ash and slag waste of thermal power plants as a promising raw material of the present. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 635–641. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.286130>

- [6] Gunarathne, V., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Alessi, D. S., Selvasembian, R., Naushad, Mu., Ok, Y. S. (2020). Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(6), 1022–1062. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1847949>
- [7] Frolova, L.A., Pivovarov, A.A., Butyrina, T.E. (2015). Purification of wastewaters, containing chromium, by a sorbent based on blast furnace slag. *J. Water Chem. Technol.* 37, 185–190. <https://doi.org/10.3103/S1063455X15040062>
- [8] Frolova, L., Khlopytskyi, O., Kashkald, N., Ivanchenko, H. (2023). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1156(1), 012032. [doi 10.1088/1755-1315/1156/1/012032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012032)
- [9] Sumukh, E. P., Das, B. B., Barbhuiya, S. (2024). Effect of Iron Ore and Copper Ore Tailings on Engineering Properties and Hydration Products of Sustainable Cement Mortar. *Advances in Civil Engineering Materials*. 13(1), 50–75. <https://doi.org/10.1520/ACEM20230031>
- [10] Koltsova, Y.I., Nikitin, S.V. (2020). Preparation of porous glass-ceramic materials by using fuel slag. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 33–38. [DOI: 10.32434/0321-4095-2020-128-1-33-38](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-128-1-33-38)
- [11] Koltsova, Y.I. (2021). Influence of sodium salt additives on the properties of coatings containing industrial waste. *Journal of Chemistry and Technologies*, 29(1), 100–106. <https://doi.org/10.15421/082105>
- [12] Shchukina, L., Galushka, Ya., Khlopytskyi, A., Savenkov, A. (2020). Prospects of the application of coal ash materials to produce construction heat-insulation ceramics. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 4, 215–224. [DOI: 10.32434/0321-4095-2020-130-3-215-224](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-130-3-215-224)
- [13] Schatzmayr, Th., Sá, W., Sandra, O., Karla, V., Branco, C., Machado Balthar, L., Dias, R., Filho, T. (2022). Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. *Construction and Building Materials*, 342(B), 128072. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128072>
- [14] Bliznjuk, O.N., Masalitina, N.Yu., Savenkov, A.S., Suvorin, A.V., Khlopytskyi, A.A. (2019). Synthesis of a multioxide catalyst for the oxidation of ammonia to nitrogen(II) oxide. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 3, 98–118. [doi: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-98-108](https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-98-108)
- [15] Han, X., Wang, F., Zhao, Y., Meng, J. (2023). Recycling of iron ore tailings into magnetic nanoparticles and nanoporous materials for the remediation of water, air and soil: a review. *Environ Chem Lett* 21, 1005–1028. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01541-7>
- [16] Pollmann, K., Kutschke, S., Matys, S., Kostudis, S., Hopfe, S., Raff, J. (2016). Novel Biotechnological Approaches for the Recovery of Metals from Primary and Secondary Resources. *Minerals*, 6(2), 54. <https://doi.org/10.3390/min6020054>
- [17] Vitor, O., Silvestro, L., Gleize, Ph., Kirchheim, A., Schneider, I. (2023). Application of leached iron ore tailings to produce sustainable cements. *Construction and Building Materials*, 377, 131095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131095>
- [18] Bulayani, M.M., Raghupatruni, P., Mamvura, T., Danha, G. (2024). Exploring Low-Grade Iron Ore Beneficiation Techniques: A Comprehensive Review. *Minerals*, 14(8), 796. <https://doi.org/10.3390/min14080796>
- [19] Chokin, K., Yedilbayev, A., Yugai, V., Medvedev, A. (2022). Beneficiation of Magnetically Separated Iron-Containing Ore Waste. *Processes*, 10(11), 2212. <https://doi.org/10.3390/pr10112212>
- [20] Zare, A., Noaparast, M., Dehghan, S. (2023). Recovery of Iron Ore From The Tailings of Tang Zagh Iron Beneficiation Plant: A Comparative Study of Gravity and Magnetic Separation Methods. *Journal of Geomine*, 1(3), 137–143. [doi:10.22077/JGM.2024.7407.1025](https://doi.org/10.22077/JGM.2024.7407.1025)
- [21] Yu, J., Han, Yu. Li, Ya. Gao, P. (2017). Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*, 168, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.09.012>
- [22] Dudchenko, N., Ponomar, V., Ovsienko, V., Cherevko, Y., Perelshtein, I. (2023). Mineral magnetic modification of fine iron ore tailings and their beneficiation in alternating magnetic fields. *Metals*, 14(1), 26. <https://doi.org/10.3390/met14010026>
- [23] Zhang, X., Gu, X., Han, Y., Parra-Alvarez, N., Claramboux, V., Kawatra, S. K. (2019). Flotation of iron ores: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42(3), 184–212. [http://doi.org/10.1080/08827508.2019.1689494](https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1689494)
- [24] Nakhaei, F., Irannajad, M. (2018). Reagents types in flotation of iron oxide minerals: A review. *Mineral processing and extractive metallurgy review*, 39(2), 89–124. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1391245>
- [25] Jyotirmoy, S., Rajkhowa, S., Mahiuddin, S. (2022). Upgradation of Iron Ore Fines and Slime by Selective Flocculation Using Surface-Active Agents, Settling Study, and Characterization of the Beneficiation Waste for Value Addition. *Journal of Chemistry*, 2022(1), 6451187. [DOI:10.1155/2022/6451187](https://doi.org/10.1155/2022/6451187)