

Олійник Т.А.,
д.т.н., професор <https://orcid.org/0000-0002-0315-7308>,
Булах О.В.
к.т.н., доцент <https://orcid.org/0000-0003-0965-0053>
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОДРІБНЕННЯ ТА МАГНІТНОГО ЗБАГАЧЕННЯ ГЕМАТИТОВИХ КВАРЦИТІВ ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ

Переробка залізних руд підземного видобутку зумовлена комплексом геологічних, економічних та технологічних факторів, що робить цю проблему критично важливою для металургійної галузі. Збагачення гематитових кварцитів підземного видобутку – це складний, багатостадійний процес, який вимагає глибокого розуміння мінералогії руди та вибору оптимального методу та обладнання для їх переробку.

В статті визначено, що руди підземного горизонту характеризуються підвищеною міцністю, особливим мінеральним складом та тонкою вкрапленістю мінералів, що ускладнює їх переробку. Ефективна та економічно вигідна переробка таких руд неможлива без попередніх фундаментальних досліджень їх збагачуваності, що є актуальним науковим та практичним завданням. Крім того, світовий ринок залізної руди вимагає високоякісного концентрату з вмістом заліза не нижче 64% і мінімальним вмістом шкідливих домішок, таких як сірка, фосфор та кремнезем. Без глибокого збагачення такі руди не зможуть відповідати цим стандартам та конкурувати з більш якісною сировиною.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу мінералого-технологічних властивостей гематитових кварцитів підземного видобутку на показники їх подрібнення та наступного збагачення.

Проведені дослідження дозволяють встановити вплив властивостей гематитових кварцитів на ефективність подрібнення та подальшого розділення. З'ясовано, що для отримання високих показників розділення вихідну руду необхідно подрібнювати до крупності 65% класу – 0,071 %. При такій крупності досягається максимальний відсоток розкриття рудних зерен. Також експериментальним шляхом визначено оптимальний час подрібнення руди. Подальше збагачення подрібненої руди

магнітною сепарацією у сильному полі з індукцією 1,0 Тл дозволяє ефективно розділяти мінеральну сировину.

Незважаючи на виклики, пов'язані з енергоємністю та тонкою вкрапленістю руди, сучасні технології, такі як магнітна сепарація в сильному полі та ефективне подрібнення, дозволяють отримувати високоякісні залізородні концентрати.

Ключові слова: гематитові кварцити, крупність, вкрапленість, подрібнення, розкриття, магнітний аналіз, індукція поля, концентрат.

Гірничо-збагачувальна промисловість є фундаментом металургії та одним з ключових секторів економіки країни, а залізні руди, які у більшості випадків використовуються у металургійному виробництві, виступають у ролі потужного стратегічного промислового потенціалу України [1,2]. Однак запаси багатих залізних руд інтенсивно виснажуються, що змушує шукати альтернативні джерела заліза. Одним з таких джерел є залізні руди підземного видобутку. Здебільшого вони представлені гематитовими кварцитами та бурими залізняками, що містять залізо на рівні 47-66% [3], для отримання готової товарної продукції з яких необхідно використовувати процеси рудопідготовки [4].

З розвитком гірничих робіт і вичерпання багатих запасів все більша увага приділяється підземному видобутку цих руд. Однак підземна розробка в поєднанні зі складним мінеральним складом гематитових кварцитів висуває низку серйозних вимог до технологій їх переробки [5].

В сучасних умовах, коли підвищуються вимоги до якості товарної руди виникає необхідність використання процесів збагачення навіть для залізних руд підземного видобутку. Для того, щоб отримуваний гематитовий концентрат був конкурентоспроможним вміст заліза в ньому повинен бути не менше 64 – 66% [6]. Для отримання концентратів такої якості необхідно більш детально дослідити властивості цієї сировину для розробки раціональної технології збагачення.

На сьогоднішній день маємо певний досвід підготовки та збагачення гематитових кварцитів різними методами, які сприяють підвищенню ефективності та інтенсифікації цих процесів [7].

Існуючі технології збагачення гематитових кварцитів засновані, переважно, на використанні магнітних методів, гравітаційного та флотаційного збагачення та їх комбінації, або, навіть, деяких металургійних процесів, які дозволяють підвищити ефективність переробки [8]. Вибір схеми збагачення [9] буде залежати від текстури та структури руди, її фізико-механічних властивостей та

мінералогічного і хімічного складу. Тут автори виділяють декілька типів схем збагачення, зокрема гравітаційну, комбіновану гравітаційно-магнітну, магнітну та магнітну з попереднім сухим збагаченням які використовуються для різних типів залізної руди.

В той же час існують дослідження [5], які спрямовані на визначення доцільності збагачення гематитових кварцитів підземного видобутку показують, що використовуючи вібраційний полігармонічний гравітаційний сепаратор, можливо отримати гематитовий концентрат з вмістом заліза більше 65%.

Але при виборі методу збагачення варто враховувати спосіб розділення мінеральних комплексів, який буде залежати від технологічних можливостей підприємства. Переробка руд підземного видобутку безпосередньо на проммайданчиках шахт, в більшості випадків, унеможлиблює використання мокрого способу сепарації через проблеми з організацією водопостачання. В таких умовах сухий спосіб збагачення буде переважати над мокрим. Так, наприклад, на шахті «Криворізька» [10] для вилучення мінералів, що містять залізо використовується суха магнітна сепарація, яка дозволяє залучати у переробку видобуту руду з вмістом заліза 46-56%. А для руд шахти «Покровська» Криворізького басейну розроблено схему переробки видобутої сировини, яка побудована на процесах рудопідготовки та магнітного збагачення для отримання декількох концентратів різної якості [10].

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу мінералого-технологічних властивостей гематитових кварцитів підземного видобутку на показники їх подрібнення та наступного збагачення.

Для досліджень була відібрана технологічна проба гематитової руди підземного видобутку крупністю 16-0 мм та вмістом заліза близько 56%, більша частина якої представлена тонкошаруватими гематитовими кварцитами з мартитовими та дисперсно-гематит-мартитовими різновидами. Близько 20% від загальної маси проби представлено гематитовими середньшаруватими, безрудними та малорудними кварцитами та сланцями. В руді присутні такі мінерали, як магнетит, гематит, мартит, гідрогетит, що належать до рудної складової та немагнітні мінерали – кварц, хлорит, апатит, карбонат та інші. Отримана проба дробилась у валковій дробарці до крупності 5-0 мм та поділена на дві частини, одна з яких призначалась для вивчення кінетики подрібнення, друга – для досліджень з використанням сухої магнітної сепарації.

Вивчення кінетики подрібнення здійснювалось використовуючи вихідну руду, дроблену до крупності 5-0 мм, яка

подрібнювалася у млині, об'ємом 14 л при часі подрібнення 10, 20, 30, 40, 60 хвилин за методикою, розробленою С.Ф. Шинкоренко (табл. 1, рис. 1).

На підставі детального вивчення проби руди, дробленої до крупності 5-0 мм з'ясовано, що мартит у класі крупності $-0,071+0,05$ мм має показник розкриття на рівні 88%, а вже класі $-0,05$ мм він є розкритим повністю. В той же час дисперсний гематит не розкривається навіть у класі $-0,05$ мм.

Таблиця 1. – Результати подрібнення досліджуваної сировини при різному часі у лабораторному млині, об'ємом 14 л.

Класи крупності, мм	Вихід класів крупності при різному часі подрібнення, %				
	t=0 хв.	t=10 хв.	t=20 хв.	t=30 хв.	t=40 хв.
+5	4,0	2,25	0,29	-	-
-5+2	50,75	14,43	4,49	-	-
-2+1	27,83	4,57	0,87	-	-
-1+0,5	4,83	4,65	0,55	-	-
-0,5+0,25	2,83	10,81	2,70	1,85	-
-0,25+0,16	1,08	8,27	4,89	2,77	1,32
-0,16+0,071	2,58	16,41	21,09	18,50	1,72
-0,071+0,05	2,83	6,10	11,84	15,86	12,68
-0,05+0,01	3,00	31,71	49,42	56,03	66,07
-0,01+0	0,27	0,80	3,86	4,99	18,21
Всього	100,0	100,0	0,29	100,0	100,0

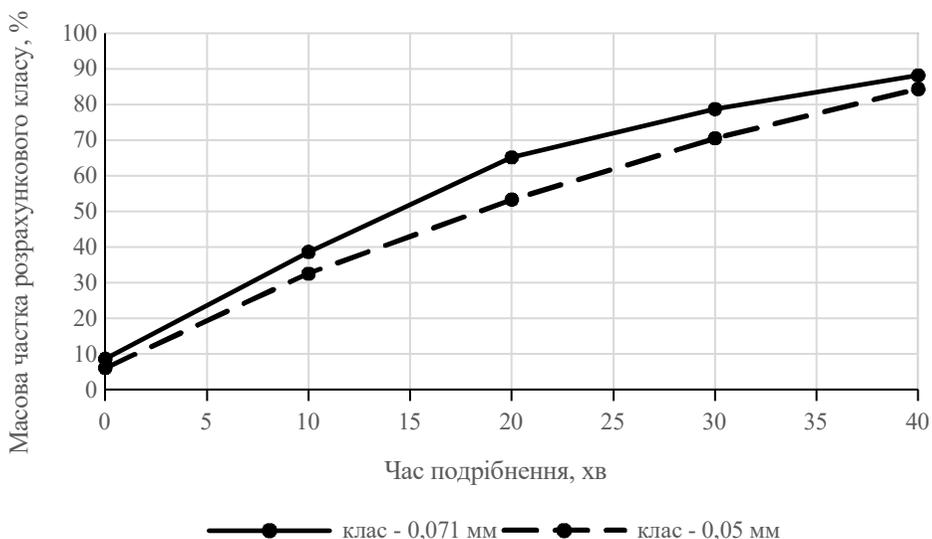
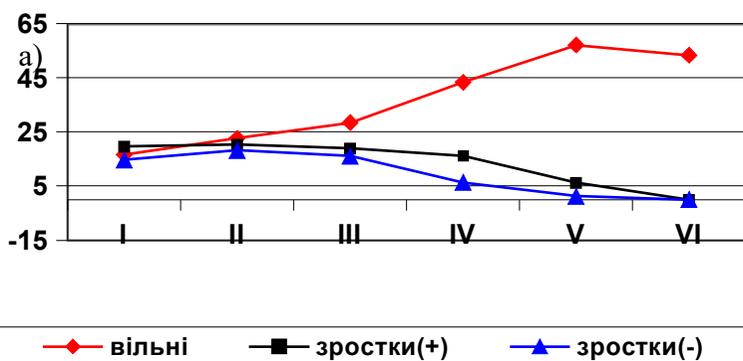


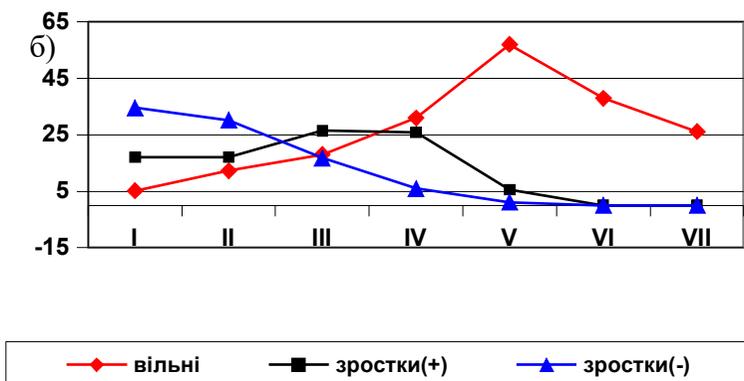
Рис. 1. Кінетика подрібнення вихідної руди у крупності 5-0 мм

Аналізуючи результати розкриття мінеральних зростків при часі подрібнення 10 та 20 хвилин з'ясовано, що при подрібненні протягом 10 хвилин до крупності 38% класу $-0,071$ мм спостерігається зменшення кількості уламків гематитових руд та сланців у 1,5-2 рази. При цьому, кількість вільних мартитових уламків у класі крупності $-0,071+0,05$ мм збільшується лише на 1,2%. При подрібненні до крупності вже 65% класу $-0,071$ мм спостерігається подальше зменшення кількості уламків гематитових руд, а кількість вільних уламків мартиту у класі крупності $-0,071+0,05$ мм підвищується на більше ніж 10%. Як зазначалось раніше, повне розкриття мартиту досягається крупності $-0,05$ мм (рис. 2). Загальний мінеральний склад подрібненої окисленої руди протягом 10 та 20 хвилини наведено у таблиці 2.

мартит



мартит



мартит

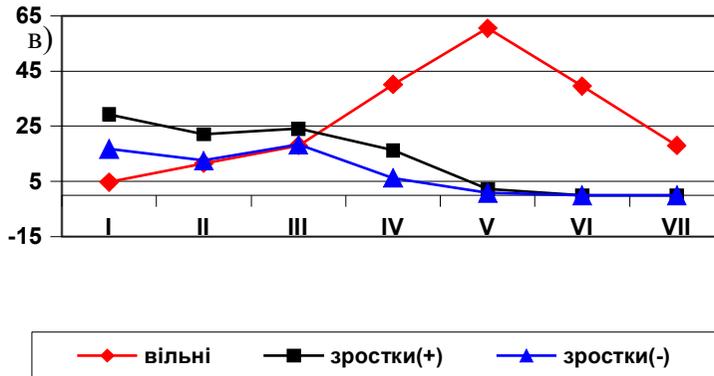


Рис. 2. Розподілення вільних уламків мартиту та його зростків у продуктах дроблення (а) і подрібнення протягом 10 хв. (б) та 20 хв. (в) Зростки (+) – багаті зростки; зростки (-) – бідні зростки.

Таблиця 2. – Мінеральний склад подрібненої руди.

Клас крупності	Вихід, %	Мінерали				
		гематит		магнетит	кварц	інші
		мартит+ зал.сл.	дисп. гем.			
10 хв.						
+5,0	2,25	40,15	11,67	3,9	39,78	4,5
-5,0+2,0	14,43	35,82	15,82	3,15	40,08	5,13
-2,0+1,0	4,57	38,31	12,79	3,59	39,99	5,31
-1,0+0,5	4,65	56,90	14,80	1,70	24,70	1,90
-0,5+0,25	10,81	59,60	13,30	1,90	23,10	2,10
-0,25+0,16	8,27	61,20	12,70	1,60	22,10	2,40
-0,16+0,074	16,41	62,60	12,20	1,90	20,60	2,70
-0,074+0,05	6,10	63,60	11,60	2,60	20,10	2,10
-0,05	31,71	37,90	26,60	2,80	26,30	6,40
шлами	0,80	26,10	39,30	1,10	25,40	8,10
Всього	100,00	48,35	17,77	2,49	27,13	4,26
20 хв.						
+5,0	0,29	39,68	10,39	4,32	40,72	4,88
-5,0+2,0	4,49	36,62	14,5	3,62	39,87	5,38
-2,0+1,0	0,87	38,5	13,42	3,97	39,23	4,88
-1,0+0,5	0,55	50,90	11,10	1,90	34,20	1,90
-0,5+0,25	2,70	46,30	10,90	2,10	38,60	2,10
-0,25+0,16	4,89	60,40	9,30	1,80	26,70	1,80

-0,16+0,074	21,09	62,70	8,60	2,30	24,80	1,60
-0,074+0,05	11,84	63,60	8,10	2,10	24,30	1,90
-0,05	49,42	39,60	22,30	2,30	32,60	3,20
шлами	3,86	18,00	46,90	1,60	24,20	9,30
Всього	100,00	47,60	17,21	2,30	29,94	2,96

У зв'язку з суттєвою різницею мінералів руди в їх магнітних властивостях доцільно дослідити особливості їх розділення використовуючи магнітне збагачення. Тому, другу частину технологічної проби дробленої до крупності 5-0 мм направлено на суху магнітну сепарацію з метою визначення її доцільності для даної крупності (табл. 3).

Таблиця 3. – Результати сухої магнітної сепарація руди дробленої до крупності 5 - 0 мм

Продукт	Індукція, Тл	Вихід, %	Fe _{заг}	Fe _м	Вилучення Fe _{заг} , %	Вилучення Fe _м , %
немагнітний	0	70,67	45,4	0,04	65,54	3,25
сильномагнітний	300	3,08	50,7	6,23	3,19	21,32
магнітний	600	10,08	56,9	4,57	11,72	51,18
слабомагнітний	1000	16,17	59,2	1,35	19,55	24,25
Всього		100,0	48,9 5	0,9	100,00	100,0

Однак, суха сепарація не дала позитивних результатів та виявилася малоефективною, тому що тільки при індукції магнітного поля 1,0 Тл можливо отримати магнітний продукт з вмістом заліза 59,2%, але з невеликим його виходом (16,17%) (табл. 3) та немагнітну фракцію з масовою часткою заліза 45,4%.

Таким чином, для проведення подальших досліджень з вивчення збагачуваності гематитових кварцитів підземного видобутку необхідно подрібнювати всю руду протягом 20 хвилини до крупності 65% класу -0,071 мм, досягаючи максимального розкриття мінеральних зростків. При цьому продуктивними класами крупності є -0,071+0,05 мм та -0,05+0,01 мм.

При дослідженні збагачуваності проведено магнітний аналіз в сильному полі індукцією 0,2, 0,6, 1,0 Тл руди, подрібненої до крупності 65% класу -0,071 мм (табл. 4). Згідно проведеного мінералогічного аналізу продуктів розділення з'ясовано, що магнітна

фракція при індукції поля 0,2 Тл містить 65,0 об.% мартиту та дисперсного гематиту, а також приблизно 26,0 об.% кварцу. Немагнітна фракція містить близько 67 об.% гематиту та близько 30,0 об.% кварцу. Цей продукт був направлений високоградієнтну сепарацію при індукції поля 0,6 Тл де отримано магнітну фракцію, яка на 86,0 об.% складена гематитом та 13,0 об.% кварцом. Немагнітна фракція містила приблизно 60,0 об.% кварцу та 34,0 об.% дисперсного гематиту. При подальшій сепарації з індукцією поля 1,0 Тл отримано магнітну фракцію при вмісті гематиту і кварцу 92,0 і 5,0 об.% відповідно. У немагнітній фракції сконцентровано близько 27,0 об.% дисперсного гематиту.

Виходячи з результатів магнітного аналізу подрібненої до крупності 65% класу -0,071 мм (табл. 4) та мінералогічного дослідження продуктів сепарації можна зробити висновок, що оптимальною для максимального розділення компонентів руди є індукція магнітного поля 1,0 Тл, де отримано кращі показники розділення.

Таблиця 4. – Магнітний аналіз руди, подрібненої до крупності 65% класу -0,071 мм

Продукт	Вихід, %		Масова частка заліза Fe _{зал} , %	Вилучення Fe _{заг} від вихідного, %
	від операції, %	від вихідного, %		
Подрібнена руда 65 % класу мінус 0,071 мм				
магнітний 0,2 Тл	75,71	75,71	47,96	76,28
немагнітний	24,29	24,29	46,48	23,72
всього	100	100	47,6	100,00
магнітний 0,6 Тл	62,5	15,18	60,27	19,22
немагнітний 0,6 Тл	37,5	9,11	25,17	4,50
всього	100	24,29	46,48	23,72
магнітний 1,0 Тл	60	14,57	65,85	20,16
немагнітний 1,0 Тл	40	9,72	17,44	3,56
всього	100	24,29	46,48	23,72

Магнітні продукти, отримані при індукції магнітного поля 0,2 Тл та 0,6 Тл для одержання концентрату з вмістом заліза 64 – 65% та масовою часткою кремнезему не більше 8% доцільно направити на подальше гравітаційне збагачення.

У результаті виконання роботи досліджено особливості подрібнення та розділення магнітною сепарацією гематитових кварцитів підземного видобутку. Встановлено, що оптимальною

крупністю подрібнення є 65% класу -0,071 мм, де відбувається максимальне розкриття мінеральних зерен, що дозволяє у подальшому ефективно збагачувати руду магнітною сепарацією у сильному полі індукцією 1,0 Тл для отримання концентрату, який задовольняє вимогам за якістю та буде конкурентоспроможним на ринку залізорудної сировини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.В. Булах. Вдосконалення технології збагачення змішаних руд. Гірничий вісник. Вип. 102. Кривий Ріг, 2017. С. 183–187.
2. В.Г. Губіна, С.С. Черноног. Стан і перспективи залізорудної галузі України. Геохімія техногенезу. №38(2024). Київ, 2024. С. 20–27.
3. Україна: видобувна промисловість. URL: <https://vue.gov.ua/Україна: видобувна промисловість> (дата звернення 03.10.2025).
4. С.О. Попов, Є.К. Бабец, В.О. Колосов, Г.І. Рудько. Стан і перспективи розвитку залізорудної промисловості України. Збірник наукових праць «Науково-дослідного гірничорудного інституту» Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет». №55. Кривий Ріг, 2015. С. 12–36.
5. Т.А. Олійник, О.В. Булах, Л.В. Скляр, М.О. Олійник. Особливості збагачення гематитових руд підземного видобутку Кривбасу в крупності 1-0 мм. Гірничий вісник Криворізького національного університету. Вип. №112. Кривий Ріг, 2024. С. 163–166.
6. M.I. Stupnik, V.V. Peregudov, V.S. Morkun, T.A. Oliinyk and M.K. Korolenko. Development of concentration technology for medium-impregnated hematite quartzite of Kryvyi Rih iron ore basin. Sci. innov. V.16. № 6. 2020. P. 56–71.
7. О.В. Булах. Підвищення ефективності переробки окислених руд на підставі дослідження особливостей їх збагачення. Збагачення корисних копалин. Вип. 63(104). Дніпропетровськ, 2016. С. 16–22.
8. Я.В. Мянєвська, Л.В. Камкіна, В.П. Іващенко, Р.В. Анкудінов, О.Г. Безшкурєнко, О.І. Дворковий. Дослідження впливу електрохімічної дії на відновлення гематиту у складі окислених залізистих кварцитів. Теорія і практика металургії. №1. Дніпро. 2019. С. 71–76.
9. Микола Сокур, Роман Аргат, Володимир Білецький, Віта Равінська. Вибір раціональної принципової схеми збагачення залізистих кварцитів. Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. Вип. 1/2022 (132). 2022. С. 149–156.
10. А.В. Іванченко. Напрями утилізації відходів видобування залізних руд на прикладі шахти «Покровська» Криворізького басейну. Мінеральні ресурси України. №3. Київ, 2025. С. 46–50.

REFERENCES

1. O.V. Bulakh. Vdoskonalennia tekhnolohii zbahachennia zmishanykh rud. Hirnychiy visnyk. Vyp. 102. Kryvyi Rih, 2017. S. 183–187.
2. V.H. Hubina, S.S. Chornonoh. Stan i perspektyvy zalizorudnoi haluzi Ukrainy. Heokhimiia tekhnohenezu. №38(2024). Kyiv, 2024. S. 20–27.
3. Ukraina: vydobuvna promyslovist. URL: <https://vue.gov.ua/Україна: видобувна промисловість> (data zvernennia 03.10.2025).
4. S.O. Popov, Ye.K. Babets, V.O. Kolosov, H.I. Rudko. Stan i perspektyvy rozvytku zalizorudnoi promyslovosti Ukrainy. Zbirnyk naukovykh prats «Naukovo-doslidnogo hirnychorudnogo instytutu» Derzhavnogo vyshchoho navchalnogo zakladu «Kryvorizkyi natsionalnyi universytet». №55. Kryvyi Rih, 2015. S. 12–36.
5. T.A. Oliinyk, O.V. Bulakh, L.V. Skliar, M.O. Oliinyk. Osoblyvosti zbahachennia hematytovykh rud pidzemnogo vydobutku Kryvbasu v krupnosti 1-0 mm. Hirnychiy visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu. Vyp. №112. Kryvyi Rih, 2024. S. 163–166.
6. M.I. Stupnik, V.V. Peregudov, V.S. Morkun, T.A. Oliinyk and M.K. Korolenko. Development of concentration technology for medium-impregnated hematite quartzite of Kryvyi Rih iron ore basin. Sci. innov. V.16. № 6. 2020. P. 56–71.
7. O.V. Bulakh. Pidvyshchennia efektyvnosti pererobky okyslenykh rud na pidstavi doslidzhennia osoblyvostei yikh zbahachennia. Zbahachennia korysnykh kopalyn. Vyp. 63(104). Dnipropetrovsk, 2016. S. 16–22.
8. Ya.V. Mianovska, L.V. Kamkina, V.P. Ivashchenko, R.V. Ankudinov, O.H. Bezshkurenko, O.I. Dvorkovi. Doslidzhennia vplyvu elektrokhimichnoi dii na vidnovlennia hematytu u skladi okyslenykh zalizystykh kvartsytiv. Teoriia i praktyka metalurhii. №1. Dnipro. 2019. S. 71–76.
9. Mykola Sokur, Roman Arhat, Volodymyr Biletskyi, Vita Ravinska. Vybir ratsionalnoi pryntsyypovoi skhemy zbahachennia zalizystykh kvartsytiv. Visnyk KrNU im. Mykhaila Ostrohradskoho. Vyp. 1/2022 (132). 2022. S. 149–156.
10. A.V. Ivanchenko. Napriamy utylizatsii vidkhodiv vydobuvannia zaliznykh rud na prykladi shakhty «Pokrovska» Kryvorizkoho baseinu. Mineralni resursy Ukrainy. №3. Kyiv, 2025. S. 46–50.

Oliinyk T.A., D.Sc. (Tech.), Professor, Bulakh O.V., Ph.D. (Tech.), Associate Professor (Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih)

RESEARCH INTO THE COMMINUTION AND MAGNETIC BENEFICIATION CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND-MINED HEMATITE QUARTZITES

The processing of underground-mined iron ores is driven by a complex of geological, economic, and technological factors, making this issue critically important for the metallurgical industry. The beneficiation of underground-mined hematite quartzites is a complex, multi-stage process that requires a deep understanding of the ore's mineralogy and the selection of an optimal processing method and equipment.

The article establishes that ores from the underground horizon are characterized by high strength, specific mineral composition, and fine mineral dissemination, which complicates their processing. Efficient and economically viable processing of such ores is impossible without preliminary fundamental research into their beneficiation properties, which is a relevant scientific and practical task. Furthermore, the global iron ore market demands high-quality concentrate with an iron content of no less than 64% and minimal content of harmful impurities such as sulfur, phosphorus, and silica. Without deep beneficiation, such ores cannot meet these standards or compete with higher-quality raw materials.

The aim of this work is to establish the patterns of influence of the mineralogical and technological properties of underground-mined hematite quartzites on their comminution and subsequent beneficiation indicators.

The conducted research allows for establishing the influence of hematite quartzite properties on the efficiency of comminution and subsequent separation. It was found that to achieve high separation indicators, the raw ore must be ground to a fineness of 65% passing 0.071 mm. At this size, the maximum percentage of ore grain liberation is achieved. The optimal ore grinding time was also determined experimentally. Subsequent beneficiation of the ground ore using high-intensity magnetic separation with a magnetic induction of 1.0 T allows for the effective separation of the mineral raw material.

Despite the challenges associated with the energy intensity and fine dissemination of the ore, modern technologies, such as high-intensity magnetic separation and efficient comminution, enable the production of high-quality iron ore concentrates.

Keywords: hematite quartzites, particle size, dissemination, comminution, liberation, magnetic analysis, magnetic induction, concentrate.
