

**О.В. Швидкий***Криворізький національний університет, м Кривий Ріг, Україна**e-mail: Shvidkiyalexandr@ukr.net*

## Енергоефективний спосіб при збагаченні залізистих кварцитів

Основою статті є дослідження, при якому визначався вплив речовинного складу залізистих кварцитів на їх міцність. Показник міцності визначається непрямим способом, а за допомогою затрат електроенергії під час подрібнення рудного матеріалу до відповідного класу. Наведено теоретичне обґрунтування та розрахунок витрат електричної енергії на дроблення залізистих кварцитів. Задля зменшення витрат електроенергії запропонований спосіб, який передбачає вилучення частини крупнокускової фракції рудного матеріалу з процесу збагачення. Наведено розрахунок очікуваного економічного ефекту. Базуючись на результатах проведеного дослідження, представлені відповідні висновки та рекомендації з їх обґрунтуванням та критичним аналізом.

**енергозатрати, залізисті кварцити, вміст магнетиту, міцність, збагачення, гранулометричний склад, контроль якості**

**Постановка проблеми.** В даній статті процеси дроблення та подрібнення як такі, що використовуються для розкриття зерен корисного компоненту. Під час помелу слід проводити операції грохочення та класифікації. Всі ці процеси є енергоємні, тому задача стоїть дуже гостро, щоб отримати повноцінний, готовий, якісний продукт і з найменшими затратами енергії та ефективним використанням гірничого обладнання. Енергозбереження є задачею номер один у світовому масштабі.

Рудний матеріал повинен відповідати певним характеристиками на кожній стадії процесу збагачення починаючи від видобутку до відвантаження уже готової продукції.

Оскільки сировина, що надходить на збагачувальні фабрики, має грудки критичного розміру (для відкритих гірничих виробок 1200-1500 мм, для підземних 600-800 мм), процес дроблення і подрібнення проводять в декілька стадій. Технологічно грамотно процеси дроблення супроводжувати операціями грохочення, а процеси подрібнення операціями класифікації. При цьому дотримується так званий «принцип Чеччота» - «не дробити нічого зайвого», своєчасно виводити з процесу готовий по крупності клас, що виключає переподроблення продукту, економить електроенергію та збільшує термін служби футерувальних плит дробарок і млинів. Між дробленням і подрібненням немає принципових відмінностей. Умовно вважають, що при дробленні одержують продукт з максимальним розміром зерен більше 5 мм, а при подрібненні – менше 5 мм [1].

Якщо взяти процеси збагачення корисних копалин, які є досить енергоємними, затратними, то вочевидь самим дешевим способом отримання готової продукції це безпосередній забір корисних копалин з багатим, високим вмістом цінного компоненту. В надрах природи корисні копалини звісно перемежуються і потім постає питання про те, що робити з корисними копалинами, які мають невеликий відсоток цінного компоненту. Зрозуміло, що це задача оптимізації використання багатих і бідних руд одночасно в суміші.

Кожне родовище має свої характеристики пород, що залягають, і складаючи технологічні карти враховують ці характеристики і встановлюють для кожного із них відповідні критерії. Наприклад один із таких критеріїв – мінімальний вміст магнітного заліза в руді, що вважатиметься некондиційною рудою, тобто не долучати до збагачення, а відправляти на складування.

Проблема економного використання енергоресурсів, зокрема електроенергії, в гірничій справі досліджується багатьма науковцями і винахідниками оскільки, вимагає все більш критичнішого підходу задля досягнення раціональнішого їх використання, що має привести до зниження собівартості продукції та її конкурентоспроможності.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Тривкість, твердість і міцність це загально прийняті поняття, які символізують сукупність фізико-механічних властивостей гірських порід, що виявляється в різних технологічних процесах при видобутку і переробці корисних копалин. Ці поняття визначають здатність гірських порід чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх сил але характеризують свою сторону фізико-механічних властивостей гірських порід [2].

Дроблення і подрібнення є підготовчими операціями збагачення і призначені для роз'єднання (розкриття) рудних зерен різних мінералів, що містяться в корисних копалинах у вигляді тісно переплєтених зростків. Чим повніше розкриваються, звільняються один від іншого мінерали при дробленні і подрібненні, тим успішніше протікає подальший процес збагачення корисних копалин. Крупність зерен, до якої необхідно дробити або подрібнювати матеріал перед збагаченням, визначається розміром вкраплення цінних мінералів і процесом, що прийнятий для збагачення корисної копалини [3].

Процеси збагачення корисних копалин, метою яких є підвищення вмісту цінних компонентів у перероблюваній природній сировині відіграють все зростаючу роль у розвитку сучасної економіки. Це пов'язано, зокрема, з тим, що родовища багатих руд у багатьох випадках вже відпрацьовані і для підтримки виробничих потужностей підприємств на необхідному рівні доводиться залучати в експлуатацію бідні руди. Підвищення вмісту корисних компонентів у концентраті є однією з основних задач при інтенсифікації технологічних процесів в гірничо-видобувній, хімічній, металургійній та інших галузях промисловості [3].

Речовинний склад руд Криворізького басейну визначає фізико-механічні властивості залізистих порід. Ранніми дослідниками, що вивчали властивості руд даного басейну, вказувалося, що для всіх порід і руд зі збільшенням вмісту кварцу характеристики по міцності збільшуються, а зі зростом вмісту магнетиту міцність зменшується.

Практика руйнування руд показує, що лише невелика частина витраченої на руйнування енергії перетворюється в корисну роботу. Тобто для одержання необхідного гранулометричного складу руди обмін енергією між джерелом і тілом, що руйнується, не завжди здійснюється адекватно поставленому завданню [1].

При цьому ефективність процесу збагачення залежить від того, наскільки повно вдалося розкрити зростки мінералів для більш повного розділення корисного компоненту від пустої породи. Це в свою чергу впливає на якість проміжного продукту яке надходить на наступні стадії збагачення і безпосередньо вплине на якість кінцевого продукту.

Погіршення якості сировини, підвищення вимог до повноти і комплексності її використання, розробки ресурсо- і енергозберігаючих технологій роблять усе більш актуальною проблему раціонального руйнування руд, розкриття і збагачення мінералів [4].

У технології збагачування руд найбільш енергоємним процесом є дезінтеграція (дроблення і подрібнення) руд, частка якого складає понад 50-70 % загальних витрат. Відомо, що по електрозатратам тільки 5% витрачається на процеси дроблення, а близько 60% – на процеси подрібнення [6, 7].

Так, для раціональнішого використання електроенергії, деякими дослідниками, пропонується до процесу дроблення пред'явити вищі вимоги, тобто проводити помел до меншого класу крупності вихідного матеріалу. Таким чином, має відбутися перерозподіл енергозатрат із більш затратного переділу в менш затратний, що в свою чергу, повинно призвести до зниження собівартості кінцевого продукту.

Тому перспективною є концепція перерозподілу енерговитрат між процесами дроблення і подрібнення, збільшення питомої ваги циклу дроблення в загальному процесі дезінтеграції руд. Для цього необхідно зменшити крупність дробленого продукту з 25-30 мм до 10 мм, бо кожний міліметр зниження крупності дробленої руди дозволяє на 1,2-1,5% знизити енергоємність і на стільки ж підвищити продуктивність наступних операцій рудо підготовки [6].

**Постановка задачі.** Визначивши ступінь впливу речовинного складу залізистих кварцитів на міцність по енергозатратам під час їх подрібнення, здійснити пошук з мінімізації інтегральної енергоємності їх руйнування, тобто основною метою є досягнення зменшення енерговитрат при видобуванні та переробці залізо-містких руд, в залежності від їх фізичних та хімічних властивостей.

Використовуючи досвід напрацьований в Проблемно-галузевій науково-дослідній лабораторії при Криворізькому національному університеті, який направлений на дослідження фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей гірських порід і руд, зробити кількісне та якісне обґрунтування припущення, що задля зменшення енерговитрат вилучати крупно-кусову фракцію з подальшого процесу збагачення. Оскільки в даній фракції вміст корисного компоненту нижчий, а міцність більша. Передбачається, що вилучення виконувати на прикінцевих стадіях дроблення.

**Викладення основного матеріалу та результатів.** Використовуючи матеріали, які були опубліковані на IX Міжнародній науково-практичній конференції [8], де представлений аналіз більш ніж 240 вимірювань. Для визначення кількісного виходу фракцій проводився розсів, за яким було зроблено висновок, що чим менший вміст магнетиту, тим більший вихід крупного класу в продуктах дроблення.

Також був проведений розрахунок по витраті електроенергії під час подрібнення. І в вигляді питомої витрати електроенергії на одиницю маси проби була отримана функція залежності від вмісту магнетиту, що описується рівнянням (1).

$$E = 0,7658 \cdot (\text{Fe})^2 - 66,24 \cdot (\text{Fe}) + 2078 , \quad (1)$$

де надійність апроксимації  $R^2$  становить 0,99 [8].

Одним з недоліків даного дослідження це те, що не використовувались проби руд з низьким вмістом магнетиту, що в свою чергу говорить, про неповноту дослідження. Хоча, це не заважає над отриманою залежністю провести екстраполяцію до менших значень масової частки заліза магнітного. Вид кривої при такому підході продемонстровано на рис.1.

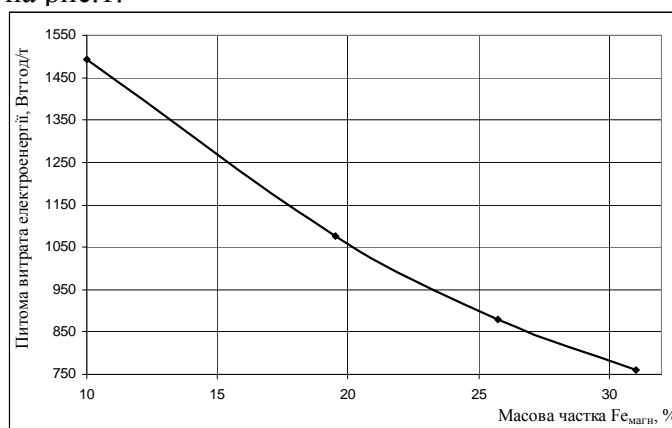


Рисунок 1 – Залежність питомої витрати електроенергії на подрібнення руди від масової частки магнетиту з екстраполяцією

Джерело: зроблено автором

Таким чином, аналізуючи характер кривої, можна стверджувати, що питома витрата електроенергії для руд з нижчим вмістом магнетиту буде більшою.

Екстраполяція показує суттєві і навіть невиправдано великі затрати електроенергії на подрібнення руд з бідним вмістом корисного компоненту. В даному випадку екстраполяція обмежена на рівні 10% масової частки магнетиту в руді.

Беручи до уваги все вище сказане, проведемо розрахунок економічного ефекту від запропонованого підходу, а саме відділення крупно-кускової фракції, яка є за вмістом заліза біднішою, з циклу збагачення. Кількість вилученого матеріалу обмежимо на рівні 5%, бо більше чи менше це вже питання іншого дослідження. А якщо взяти до уваги різні дробильні фабрики, де наявне різне устаткування для проведення дроблення, то обґрунтування доцільності такого підходу для кожної буде своїм, та може бути відчутно різним.

Звернемось до передбачуваного економічного ефекту. В даний час на території Криворізького басейну розміщено п'ять гірничо-збагачувальних комбінатів: ПівдГЗК, ІнГЗК, ЦГЗК, ПівнГЗК та НКГЗК.

За даними з відкритих джерел видобуток руди на цих підприємствах на рік сягає: ПівнГЗК 26,6 млн. тонн, НКГЗК 15,2 млн. тонн, ЦГЗК 15 млн. тонн, ІнГЗК 36 млн. тонн, ПівдГЗК 18 млн. тонн. Це середньозважені показники на рік.

Якщо узагальнити показники, то видобуток гірничорудними підприємствами Криворіжжя варіюється в межах 100 млн. тонн на рік.

За даними Міністерства статистики України найбільшими споживачами електроенергії в Україні є чорна металургія 28% [9]. Щодо споживання електроенергії питома вага гірничорудного виробництва складає більше 25% [5].

По вітчизняних ГЗК показники електроенергоефективності виглядають наступним чином: середня питома витрата електроенергії на ГЗК, де кінцевий продукт – обкотиші, – 62-63 кВт·год/т., а де залізорудний концентрат – 38-45 кВт·год/т. [10].

У собівартості готового продукту процеси руйнування являються вагомою частиною від всіх затрат.

За отриманими результатами проведеного дослідження можна стверджувати, що одним із шляхів зниження енерговитрат при видобутку та переробці залізистих кварцитів це відділення крупно-кускової фракції після дроблення від гірничої маси, що йде на наступні етапи переробки руди. Це підтверджено рис.1, що на їх подрібнення буде витрачено більше електроенергії.

Якщо взяти, що кількість електроенергії, яка затрачається на обробку однієї тонни руди становить близько 40 кВт·год. З урахуванням річного обсягу видобутку залізистих кварцитів у ГЗК Кривбасу, приблизно 100 млн. т., то видалення 5% крупно-кускової фракції руди від загальної маси дозволить знизити енерговитрати приблизно на  $0,05 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 40 = 200$  млн. кВт на рік. А враховуючи, що вартість однієї кВт·год для підприємств становить понад 10 грн., то загальна сума витрат перевищить 2 млрд. грн.

Даний висновок не можна сприймати, як необхідність, а як суто той, що впливає із дослідження. Тому що, говорити про досягнення економії електроенергії можливо тільки при комплексному підході, де враховані всі ділянки ГЗК. Оскільки вилучення крупно-кускової фракції під час дроблення може привести до погіршення наступного підготовчого процесу – подрібнення, бо в сировині буде менша кількість міцної фракції, яка відіграє не останню роль в процесі подрібнення. Наступне те що, вилучення частини уже видобутої сировини безпосередньо збільшить об'єм бурових, вибухових, а також навантаження на транспортні перевезення, щоб зберегти оптимальну, і в той же час, ефективну роботу всього переділу ГЗК.

Також, доцільно було б не просто частину крупного матеріалу вилучати з процесу збагачення, а проводити контроль якості матеріалу, що вилучатиметься. Це дасть можливість правильно оцінити необхідність вилучати крупно-кускову фракцію з переділу чи пустити на повторне коло дроблення. Тому є необхідним впровадження в технологічні процеси засобів оперативного контролю параметрів сировини [11].

Адже контроль плинус технологічних процесів збагачення є важливим питанням. Тому розробка і впровадження датчиків та визначників, дозволить оптимально налаштувати технологічну лінію в цілому, або окремі її ділянки, і проводити моніторинг роботи гірничого обладнання. Це дає змогу оперативнo виявляти відхилення в роботі і, при належному реагуванні на збої, відновлювати роботу ГЗК [11].

Дроблення і подрібнення є найбільш енергоємними і дорогими процесами у циклі збагачення корисних копалин. Капітальні та експлуатаційні витрати на них можуть досягати 70 % від усіх затрат на збагачення. Тому удосконалення дробильного і подрібнювального обладнання, застосування найбільш ефективних і економічних способів і схем підготовчих операцій мають важливе народногосподарське значення [11].

Для підвищення конкурентної спроможності залізовмісної продукції в Україні, необхідно впроваджувати і використовувати енергозберігаючі заходи, методи, способи, технології, обладнання і т. ін., щоб продукція мала попит не тільки на місцевому рівні.

Використовуючи результати дослідження і рекомендований підхід до вилучення крупно-кускової фракції, можна досягти зниження енерговитрат при дробленні рудного матеріалу. Кількісна оцінка, по вилученні даної фракції, і на якій стадії дроблення це впроваджувати, то для кожного ГЗК буде відмінна, і потребує детальнішого вивчення.

**Висновки.** 1. За речовинним складом, чим менший вміст магнетиту, тим вища міцність залістистих кварцитів.

2. Відповідно до ситового аналізу вихід фракції крупного класу спостерігається на пробах з меншим вмістом магнетиту.

3. За розподілом енерговитрат, відомо, що 5% витрачається на дроблення і близько 60% – на процеси подрібнення, тому доцільно перерозподілити з більш витратного переділу на менш витратний, що має призвести до зниження енерговитрат. Для цього потрібно проводити помел до меншого класу крупності.

4. Щоб під час дроблення досягти вищих показників і при цьому суттєво не збільшувати енерговитрат, то необхідно вилучати крупно-кускову фракцію з попередніх стадій дроблення, тобто вилучити надрешітний продукт.

5. І головне, вилучення з процесу дезінтеграції крупно-кускової фракції проводити з контролем якості, бо для різних родовищ і ГЗК різні вимоги щодо якості до залізородної сировини.

## Список літератури

1. Олійник Т.А., Скляр Л.В., Олійник М.О. Дослідження умов селективного руйнування мінеральних комплексів при збагаченні гематит-ільменітових руд. *Збагачення корисних копалин*. 2015. Вип. 60(101). URL: <https://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2015-60-101/07.pdf> (дата звернення 02.08.2025р).
2. Білецький В.С., Гайко Г.І., Торопчинова К.Л. Українська енциклопедія. Тематичний реєстр гасел з напрямку «Гірництво та науки про Землю»: енциклопедія. Київ: Державна наукова установа «Енциклопедичне видавництво», 2019. 248 с.
3. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин / Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 634 с.
4. Сокур М.І., Равінська В.О. Енергозбереження при переробці залізних руд. *Геотехнології*. 2022. Вип. 5. С. 31-36.
5. Сокур М.І., Білецький В.С. Дослідження енергоспоживання дробильно-збагачувальних фабрик. *Геотехнології*. 2021. Вип. 4. С. 14-20.
6. Імітаційна модель електроспоживання процесу рудопідготовки в умовах РЗФ-1 Північного ГЗК. / М.І. Сокур та ін. *Збагачення корисних копалин*. 2018. Вип. 71. С. 56-62.
7. Математичне моделювання електроспоживання на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК. / М.І. Сокур та ін. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 65(106). С. 72-77.
8. Азарян А.А., Трачук А.А., Швидкий О.В. Дослідження енергоефективності збагачення залістистих кварцитів. *Наукові дослідження: сучасні виклики та перспективи*: зб. матеріалів конф. IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 14-16 квіт. 2025р. Німеччина Мюнхен: MDPC, 2025. С. 230-234.
9. URL: [https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/energ.htm](https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm) (дата звернення 19.06.2025).
10. Сінчук І.О., Методологічні засади оцінювання електроефективності залізородних підприємств: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2019, 248 с.

11. Оперативний контроль та управління якістю при видобутку і переробці мінеральної сировини: монографія / А.А. Азарян та ін. Прага: OKTAN PRINT, 2020. 500 с.
12. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / М.І. Сокур та ін. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с.

## References

1. Oliinyk, T.A., Skliar, L.V. & Oliinyk, M.O. (2015). Study of the conditions of selective destruction of mineral complexes during enrichment of hematite-ilmenite ores. *Mineral concentration*, 60(101). <https://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2015-60-101/07.pdf> [in Ukrainian].
2. Biletskyi, V.S., Haiko, H.I. & Toropchynova, K.L. (2019). *UKRAINIAN ENCYCLOPEDIA. THEMATIC REGISTER OF KEYWORDS in the field of "Mining and Earth Sciences"* V.S. Biletskyi (Ed.). K: State Scientific Institution "Encyclopedic Publishing House" [in Ukrainian].
3. Biletskyi, V.S., Oliinyk, T.A. & Smyrnov, V.O. et al. (2020). *Fundamentals techniques and technologies of mineral concentration*. Kyiv: Publishing Lira-K [in Ukrainian].
4. Sokur, M.I. & Ravinska, V.O. (2022). Energy saving in iron ore processing. *Geotechnologies*. 5, 31-36 [in Ukrainian].
5. Sokur, M.I. & Biletskyi, V.S. (2021). Research on energy consumption of crushing and enrichment plants. *Geotechnologies*. 4, 14-20 [in Ukrainian].
6. Sokur, M.I., Biletskyi, V.S., Bozhyk, D.P. & Kochatok, A.V. (2018). Simulation model of electricity consumption of the ore preparation process in the conditions of the ore processing plant 1 of the Northern Mining and Processing Plant. *Mineral concentration*. 71, 56-62 [in Ukrainian].
7. Sokur, M.I., Biletskyi, V.S., Sokur, L.M. & Sokur, I.M. (2017). Mathematical modeling of electricity consumption in crushing and grinding complexes of mining and processing plants. *Mineral concentration*. 65(106), 72-77 [in Ukrainian].
8. Azaryan, A.A., Trachuk, A.A. & Shvydkyi, O.V. (2025). Research on the energy efficiency of ferruginous quartzite concentration. *Scientific research: modern challenges and future prospects: Proceedings of the IX-th International scientific and practical conference* (pp 230-234). Munich: MDPC Publishing [in Germany].
9. URL: [https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/energ.htm](https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm) [in Ukrainian].
10. Sinchuk, I.O. (2019). *Methodological principles for assessing the electrical efficiency of iron ore enterprises*. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. [in Ukrainian].
11. Azaryan, A.A. et al. (2020). *Operational control and quality management in the extraction and processing of mineral raw materials*. Prague: OKTAN PRINT [in Ukrainian].
12. Sokur, M.I. et al. (2017). *Preparation minerals for beneficiation*. Kremenchuk: Kremenchuk National University named after M. Ostrogradsky, Academy of Mining Sciences of Ukraine. PP Shcherbatykh O.V. [in Ukrainian].

## Oleksandr Shvydkyi

*Kyryvyi Rih National University, Kyryvyi Rih, Ukraine*

### Energy Efficient Method for Concentration of Ferruginous Quartzites

The aim of the article was to search for and theoretically substantiate an energy-efficient method for the destruction of ferruginous quartzites. The physical and mechanical properties, namely the strength of ferruginous quartzites, depend on the material composition. When grinding magnetite ore, energy consumption is higher if the content of the useful component in the ore is lower, and the yield by fractions depends on the amount of quartzite in the material being ground. In view of this, the proposed method is to separate the coarse-lumpy fraction from the general beneficiation cycle.

The article is based on a study that determined the influence of the material composition of ferruginous quartzites on their strength. The strength indicator is determined indirectly, using the energy consumption during grinding of ore material to the appropriate class. Having determined the degree of influence of the material composition of ferruginous quartzites on the strength in terms of energy consumption during their grinding, a functional dependence was established. Then, the extrapolation of the obtained function was made. And as a result of the work, an approach was proposed that involves reducing the energy intensity during the destruction of ferruginous quartzites during their crushing. The theoretical justification of this method is given, since it provides a basis for predicting the disclosure of minerals and choosing the operating modes of technological equipment. The calculation of the expected economic effect for mining and processing enterprises of the Kyryvyi Rih basin is given.

According to the obtained results of the study, the relevant conclusions are presented: the grinding of ferruginous quartzites depends on their material composition and is inversely proportional to the magnetite content, with an increase in the strength of the ores, energy consumption per ton of mining mass increases. The main recommendation is the issue of implementing quality control systems. After all, these systems help to adjust the division for optimal operation, and to conduct continuous monitoring of its performance indicators. Also, as a recommendation, this is the introduction of energy-saving modern technologies.

**energy consumption, ferruginous quartzites, magnetite content, strength, beneficiation, granulometric composition, quality control**

*Одержано (Received) 20.10.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 20.01.2026*