

Вплив попередньої обробки руди на процес руйнування окислених залізистих кварцитів у млині

У статті було досліджено закономірності руйнування окислених залізистих кварцитів у процесі подрібнення з використанням реагенту та визначення оптимальних умов для максимального розкриття мінеральних зерен гематиту та кварцу з метою зниження енерговитрат на процес. Традиційне подрібнення таких руд пов'язане з високими енерговитратами та неминучим переподрібненням корисного мінералу.

Визначено, що сучасним рішенням цієї проблеми є застосування спеціальних реагентів та їх розчинів, які модифікують процес руйнування на фізико-хімічному рівні, знижуючи поверхневу енергію та сприяючи більш легкому поширенню тріщин. Розглядаються механізми впливу реагентної обробки окислених залізистих кварцитів на ефективність дезінтеграції у млині під час їх подрібнення.

Наведено розрахунок енергетичної складової процесу дезінтеграції окислених залізистих кварцитів. Розраховано загальну енергію, що буде витрачатися на руйнування мінерального зерна з врахуванням подрібнювального середовища та створюваного розчином хлориду магнію додаткового ефекту розклинання за рахунок його адсорбції на поверхні зерен гематиту і кварцу, що буде спрямована на селективне розкриття мінеральних комплексів. Ефект розклинання дозволить визначити додаткову роботу, необхідну для руйнування зерен по тріщинах.

Наведений розрахунок дозволяє визначити вплив розчину хлористого магнію на кінетику і динаміку руйнування зерен окислених залізистих кварцитів під час подрібнення у млині. Стендові випробування дозволили визначити оптимальне значення концентрації розчину для досліджуваних руд та вплив на показники руйнування при її зміні. В інших умовах цей показник потребує уточнення та проведення додаткових досліджень.

Ключові слова: окислені залізисті кварцити; мінеральне зерно; крупність; вкрапленість; розкриття; реагент; подрібнення; руйнування.

Актуальність теми. Окислені залізисті кварцити становлять значну частину мінерально-сировинної бази України, зокрема Криворізького залізорудного басейну. Вони містять залізо переважно у формі гематиту, мартиту, гетиту та гідрогетиту [1], що ускладнює їх збагачення традиційними методами. Складність залучення окислених руд у переробку пояснюється їх властивостями та недосконалістю існуючих технологій збагачення.

Довгий час окислені залізисті кварцити, які складавалися у відвали, вважалися малоперспективною або резервною сировиною через технологічні складнощі їх переробки. Однак у сучасних реаліях під впливом низки глобальних чинників окислені залізисті кварцити перетворюються зі «збалансованої» сировини на перспективно важливий ресурс. Актуальність їх освоєння продиктована поєднанням економічної доцільності, ресурсної безпеки та екологічних вимог.

Окислені залізисті кварцити складаються переважно з гематиту та кварцу і характеризуються нерівномірним вкрапленням мінералів заліза та часто дрібнозернистим характером зрощення корисних мінералів та порожньої породи. Ця структурна особливість обумовлює основну вимогу до процесу збагачення – необхідність високого ступеня подрібнення для розкриття мінералів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Розкриття мінеральних зерен є фундаментальним завданням процесів рудопідготовки, яке визначає принципову можливість подальшого ефективного поділу корисного мінералу від пустої породи [2]. Для окислених кварцитів цей процес має низку ключових особливостей.

Досліджуючи процеси рудопідготовки окислених кварцитів, можна розглянути такі етапи, а саме: механічний вплив на сукупність кусків руди зовнішньої сили та агрегація тонких частинок мінералів. Це дає змогу визначити те, що процес дезінтеграції пов'язаний з проблемою міцності окремих мінеральних різновидів та агрегативної стійкості [3]. В процесах рудопідготовки деякі мінерали окислених кварцитів досить часто здатні утворювати зернисті та шламові продукти, що пов'язано з їх невеликою міцністю. Внаслідок цього при підготовці сировини до збагачення необхідно приділяти особливу увагу процесу шламоутворення [4, 5].

Кожен тип руд характеризується широким діапазоном розмірів вкраплень корисних мінералів. Розмір зерна, до якого матеріал необхідно подрібнити, буде залежати від розміру вкраплень корисних мінералів і використовуваного процесу збагачення. Чим більше буде відсоток розкриття мінеральних

зерен, тим ефективніше буде відбуватися подальше їх збагачення. Крупність подрібнення мінеральної сировини залежатиме не тільки від мінерального складу та вкраплення мінералів, а й від гранулометричного складу вихідної сировини, який відіграє важливу роль у процесах рудопідготовки. Його оцінка дозволить визначити ступінь розкриття мінеральних зерен [6–8].

Як відомо, подрібнення руди відбувається через поширення тріщин. Автори [9] в своїх дослідженнях пропонують класифікувати процес подрібнення руди на чотири стадії, а саме: поява дрібних тріщинок, їх поступове збільшення з утворенням мікротріщин, перехід у великі тріщини та наприкінці утворення тріщинуватості. Таким чином, ступінь розкриття зерен мінералів буде залежати від режиму подрібнення. Міжзернові тріщини, що виникають у зоні тріщиноутворення, будуть мати вагоме значення у підвищенні ступеня розкриття мінералів у дрібних фракціях.

Велика увага повинна приділятися закономірностям зниження енерговитрат при подрібненні [10]. Ефективність подрібнення безпосередньо визначає технологічні та економічні показники всього подальшого процесу збагачення, що робить цей етап найважливішим у переробці окислених залізистих кварцитів.

Через те, що процес подрібнення характеризується високою енергоємністю, необхідно створити додаткові умови, що будуть сприяти зниженню енерговитрат при досягненні максимального ступеня розкриття мінеральних комплексів для подальшого отримання залізорудного концентрату високої якості.

Метою статті є дослідження впливу розчину хлористого магнію при подрібненні окислених залізистих кварцитів на процес дезінтеграції мінеральних зерен.

Викладення основного матеріалу. В процесах подрібнення залізорудної сировини існує багато факторів, які мають важливе значення та впливатимуть на селективність розкриття мінеральних комплексів. Тому для підвищення селективності розкриття зерен мінералів окислених залізистих кварцитів потрібно додатково створити необхідні умови, що сприятимуть зниженню їх міцнісних властивостей шляхом ефекту розклинення, який можливо досягти, використовуючи різні реагенти при подрібненні, що направлені на досягнення додаткової дезінтеграції матеріалу у млині. Використання хімічних реагентів у процесах подрібнення є сучасним та ефективним інструментом для оптимізації технології. Хоча подрібнення вважається механічним процесом, реагенти можуть суттєво впливати на його ефективність, знижуючи енерговитрати та покращуючи ступінь розкриття корисних мінералів.

Як реагент можна використати водний розчин хлористого магнію, який сприятиме підвищенню селективності подрібнення. Він здатен адсорбуватися на поверхні мінералів та впливати на їх фізико-механічні властивості. Для розуміння механізму його дії потрібне теоретичне дослідження енергетичної складової процесу.

Розрахунок ведеться для визначення енергії, що буде витрачатися для руйнування мінерального зерна з використанням розчину хлористого магнію. Адсорбція цього реагенту на поверхні мінеральних зерен окислених залізистих кварцитів призводить до необхідності визначення розклинювального тиску, використовуючи таке рівняння:

$$P = \frac{\pi \varepsilon}{8} \cdot \frac{RT}{ez} \cdot \frac{1}{h^2}, \quad (1)$$

де P – розклинювальний тиск, Па;

ε – діелектрична проникливість хлористого магнію, що адсорбується на мінеральній поверхні;

e – заряд електрону, к;

z – валентність іонів ($Z=1$);

h – висота плівки, м;

R – універсальна стала (8,31 Дж/моль⁻¹/К);

T – абсолютна температура мінеральної поверхні, К.

Прикладаючи безперервне навантаження на мінеральні частинки, визначатиметься умова пошкоджуваності мінерального зерна за Бейлі:

$$\int_0^{t^x} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \quad (2)$$

де t^x – час, необхідний для руйнування мінеральної частинки при змінених напруженнях.

Визначається середнє значення напруження:

$$\tau[\sigma(t)] = \tau_0 \exp \left[\frac{A_0 - n\sigma(t)}{kt} \right], \quad (3)$$

де τ_0 – передекспоненціальний множник, що чисельно дорівнює періоду теплових коливань атомів (10^{-13} – 10^{-12} с);

A_0 – енергія активації процесу руйнування, Дж;

n – структурно-чутливий коефіцієнт з розмірністю об'єму, м³;

k – стала Больцмана ($k = 1,380662(44) \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Розчин хлориду магнію, що адсорбуватиметься на мінеральних поверхнях, буде впливати на динаміку і кінетику руйнування частинок. На підставі цього визначатиметься енергія активації процесу руйнування мінеральних зерен з використанням реагенту:

$$A = A_p - A_1, \quad (4)$$

де A_p – енергія механічного руйнування у водному середовищі;

A_1 – енергія, пов'язана з розклинювальним ефектом.

Енергія механічного руйнування A_p деякого об'єму залізорудної сировини буде складатись з енергії, необхідної на механічне переміщення шматків руди A_n , енергії, що витрачатиметься на утворення нової поверхні A_s та енергії, що витрачатиметься на виділення тепла за рахунок тертя куль між собою, рудою та футеруванням млина A_0 :

$$A = A_n + A_s + A_0, \quad (5)$$

Енергія, що витрачатиметься на утворення нової поверхні при руйнуванні, визначиться за формулою:

$$A_s = \sigma_s \cdot \Delta S, \quad (6)$$

де σ_s – ефективна питома енергія механічного руйнування зерен мінералів, Дж/м²;

ΔS – знов утворена поверхня, м².

Енергія, необхідна на механічне переміщення шматків подрібненої руди:

$$A_n = b\rho V_0, \quad (7)$$

де b – коефіцієнт пропорційності;

ρ – об'ємна густина руди, кг/м³;

V_0 – об'єм мінеральної сировини, м³.

Коефіцієнт корисної дії процесу руйнування мінеральних часток окислених залізистих кварцитів визначиться враховуючи те, що не вся механічна енергія буде витрачатися на утворення нових поверхонь мінеральних частинок, що подрібнюються:

$$\eta = 1 - \frac{A_0}{A_p}, \quad (8)$$

Враховуючи механічний вплив кульового навантаження на мінеральні частинки, відбудеться збільшення площі поверхні подрібнюваного матеріалу внаслідок утворення уламків. Таким чином, загальна енергія, витрачена на руйнування мінеральної частинки у млині, визначиться:

$$A_p = \frac{\sigma_s(1+k)}{(\eta\Delta S_e)} + \frac{[b\rho + \sigma_s(k-a')]}{\eta V}, \quad (9)$$

де k та a' – коефіцієнти пропорційності, які враховують процес механічного руйнування руди у млині за рахунок зовнішніх та внутрішніх тріщин;

ΔS_e – приріст поверхні мінеральних зерен за рахунок руйнування від первинного значення, м².

$$\Delta S_e = S - S_0, \quad (10)$$

де V – об'єм зерен, які руйнуються, м³.

Активність води і водного розчину хлористого магнію можливо оцінити за ентальпією. Хлористий магній збільшує активність води приблизно в 27 разів. У такому випадку енергія активації в процесі подрібнення окислених залізистих кварцитів з розчином хлористого магнію може визначатися як рухома сила, що дозволяє втягувати цей розчин у мікротріщини та мікропори мінерального зерна. Тут виникне закріплення комплексного іона на знов утвореній поверхні кварцу.

При руйнуванні мінерального зерна вода під дією розчину збільшуватиме свій розклинювальний тиск $P_{(H)}$ у тріщинах.

Тут також виникне тиск Лапласа P_L внаслідок наявності меніска рідини між контактуючими поверхнями зерен, що буде прагнути їх зблизити. Сумарний тиск капілярного прошарку рідини буде дорівнювати:

$$P_K = P_L + P_{(H)}, \quad (11)$$

де P_K – сумарний тиск капілярного прошарку рідини, Па;

P_L – тиск Лапласа, Па;

$P_{(H)}$ – розклинювальний тиск води з розчином, Па.

Визначається величина розклинювального ефекту розчину:

$$P(H) = -dW(H)/dH, \quad (12)$$

де $W(H)$ – додаткова енергія тонкого шару рідини, Дж.

Тиск Лапласа буде визначатися, виходячи з:

$$P_L = \frac{\sigma_{ж.г.}}{(\frac{y}{2}) - \Delta h - (\frac{\Delta h}{n})}, \quad (13)$$

де $\sigma_{ж.г.}$ – поверхневий натяг рідини, Н/м;

y – товщина шару рідини, м;

Δh – товщина плівки рідини за меніском, м;

n – коефіцієнт, що визначає зниження питомої поверхневої енергії зі зміною товщини плівки.

Внаслідок розклинювального ефекту розчину хлористого магнію виникне додаткова робота, яка необхідна для руйнування мінерального зерна по тріщинках внаслідок дії розклинювального тиску води з реагентом:

$$W_{\text{рт}} = \int_0^H P(H) dH. \quad (14)$$

Загальна енергія, яка витратиться на руйнування куска руди, визначиться, враховуючи рівняння (9, 12, 13).

$$A = \frac{\sigma_S(1+k)}{\eta \Delta S_e} + \frac{[b\rho + \sigma_S(k-a)]}{\eta V} - \frac{\sigma_{\text{ж.г.}}}{\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \Delta h - \left(\frac{\Delta h}{n}\right)} - \int_0^H P(H) dH. \quad (15)$$

При постійному навантаженні час руйнування мінеральних зерен рудної і нерудної фази буде неоднаковим. Враховуючи необхідну крупність подрібнення мінеральної сировини, час, необхідний для її подрібнення, визначиться виходячи з:

$$t = \frac{t'_p \gamma_p + t'_n \gamma_n}{100}, \quad (16)$$

де t – час, необхідний для подрібнення мінеральної сировини до потрібної крупності;

t'_p, t'_n – час, необхідний для подрібнення мінеральної сировини до потрібної крупності відповідно рудних і нерудних мінералів;

γ_p, γ_n – масова частка відповідно рудних і нерудних мінералів у мінеральній сировині.

Незалежно від крупності та способу руйнування куска рудного або нерудного мінералу окислених кварцитів, утворюються нові мінеральні зерна, які подібні один одному. При цьому знов утворена поверхня та середня крупність нових зерен будуть визначатися вихідною крупністю куска. Таким чином, одночасна дія реагенту та механічного впливу на зерна призведе до того, що на кожному етапі руйнування з кожного зерна утвориться n^3 однакових і в той же час, більш дрібних частинок.

Окрім того, використання розчину хлориду магнію перед процесом подрібнення сприятиме не тільки руйнуванню мінеральних зерен по тріщинках та інших дефектах кристалічної структури, а й змінім електрокінетичного потенціалу поверхні частинок, що впливатиме на їх флокуляцію.

Однак, окрім зазначених вище факторів, що будуть впливати на ефективність подрібнення окислених кварцитів, зокрема роботу на руйнування мінеральної частинки та часу подрібнення, слід звернути увагу на концентрацію розчину хлористого магнію, що є не менш важливим фактором при подрібненні окислених залізистих кварцитів. При стендових випробуваннях було визначено, що оптимальне значення концентрації розчину хлористого магнію знаходиться в межах 20–40 % (рис. 1). При цьому зменшення концентрації розчину призводить до зростання часу руйнування мінерального зразка.

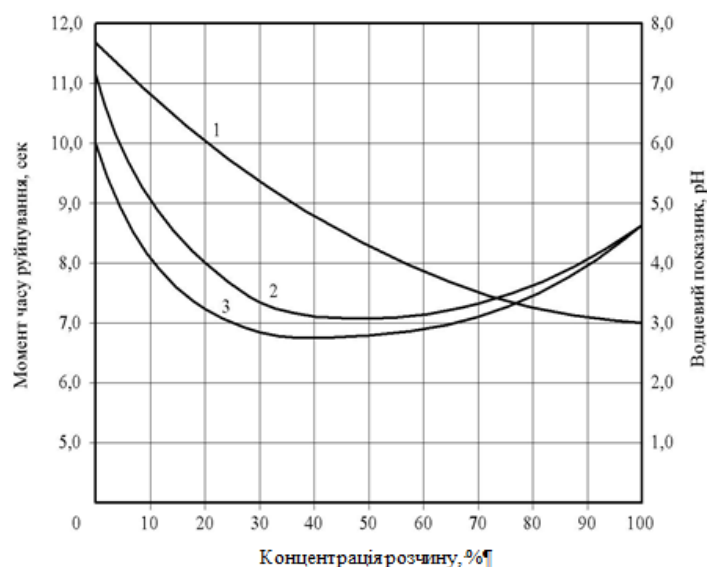


Рис. 1. Залежність водневого показника (pH) розчину хлористого магнію (1) та моменту часу руйнування кварцу (2), гематиту (3) від концентрації реагенту при стискаючому навантаженні 170 МПа

Попередня обробка розчином хлористого магнію окислених кварцитів перед процесом подрібнення зумовлює той факт, що реагент залишатиметься на поверхні мінеральних частинок в момент їх руйнування. Це пояснюється великою сорбційною здатністю, зокрема частинок кварцу як основного нерудного мінералу, та високою активністю розчину хлориду магнію.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Ефективність подрібнення безпосередньо визначає технологічні та економічні показники всього подальшого процесу збагачення, що робить цей етап найважливішим у переробці окислених залізистих кварцитів. Тому забезпечення всіх умов, наведених у дослідженні, сприятиме зменшенню енерговитрат при подрібненні окислених залізистих кварцитів та більш ефективній підготовці мінеральної сировини до подальшого збагачення магнітною сепарацією у сильному полі для отримання якісного залізородного концентрату.

Список використаної літератури:

1. Особливості збагачення гематитових руд підземного видобутку Кривбасу в крупності 1-0 мм / Т.А. Олійник, О.В. Булах, Л.В. Скляр, М.О. Олійник // Гірничий вісник Криворізького національного університету. – 2024. – Вип. 112. – С. 33–39. DOI: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-33-39.
2. Ore crushing in the high-pressure roller-press as a modelling object under stochastic properties of feed materials / T.Oliinyk, P.Nikolaenko, K.Nikolaenko, M.Oliinyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 1, № 1 (109). – P. 54–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224939.
3. Кравцов С.М. Особливості технології отримання залізородного концентрату з низькою масовою часткою кремнезему : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.08 / С.М. Кравцов. – Кривий Ріг, 2006. – 20 с.
4. Development of concentration technology for medium-impregnated hematite quartzite of Kryvyi Rih iron ore basin / M.I. Stupnik, V.V. Peregudov, V.S. Morkun and other. – 2020. – Vol. 16, № 6. – P. 56–71. DOI: 10.15407/scine16.06.056.
5. Булах О.В. Розвиток технологій переробки бідних залізних руд гематит-мартитового складу / О.В. Булах // Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 73 (114). – С. 16–20.
6. Adaptive control of ore mill charge / N.Morkun, T.Oliinyk, I.Kasatkina, O.Rytsko // E3S Web of Conferences. – 2019. – P. 1–11. DOI: 10.1051/e3sconf/201912301038.
7. Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego / T.Oliinyk, L.Sklyar, N.Kushniruk and other // Inżynieria Mineralna. – 2023. – P. 33–44. DOI: 10.29227/IM-2023-01-04.
8. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина I. Підготовчі процеси / В.С. Білецький та ін. – Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2019. – 200 с.
9. Comminution behavior and mineral liberation characteristics of lowgrade hematite ore in high pressure grinding roll / J.Cao, L.Liu, Y.Han, A.Feng // Physicochem. Probl. Miner. Process. – 2019. – Vol. 55 (2). – P. 575–585. DOI: 10.5277/ppmp18169.
10. Identification of factors to reduce the energy costs of dispersing in jets / L.Gorobets, I.Verkhobina, V.Biletskyi and other // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 6, № 1 (108). – P. 55–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217253.

References:

1. Oliinyk, T.A., Bulakh, O.V., Sklyar, L.V. and Oliinyk, M.O. (2024), «Osoblyvosti zbahachennia hematytovykh rud pidzemnoho vydobutku Kryvbasu v krupnosti 1-0 mm», *Hirnychiy visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, Issue 112, pp. 33–39, doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-33-39.
2. Oliinyk, T., Nikolaenko, P., Nikolaenko, K. and Oliinyk M. (2021), «Ore crushing in the high-pressure roller-press as a modelling object under stochastic properties of feed materials», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No. 1 (109), pp. 54–62, doi: 10.15587/1729-4061.2021.224939.
3. Kravtsov, Ye.M. (2006), «Osoblyvosti tekhnologii otrymannia zalizorudnoho kontsentratu z nyzkoiu masovoiu chastkoiu kremnezemu», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.15.08, Kryvyi Rih, 20 p.
4. Stupnik, M.I., Peregudov, V.V., Morkun, V.S. et al. (2020), «Development of concentration technology for medium-impregnated hematite quartzite of Kryvyi Rih iron ore basin», Vol. 16, No. 6, pp. 56–71, doi: 10.15407/scine16.06.056.
5. Bulakh, O.V. (2019), «Rozvytok tekhnologii pererobky bidnykh zaliznykh rud hematyt-martytovoho skladu», *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, nauk.-tekh. zb., Issue 73 (114), pp. 16–20.
6. Morkun, N., Oliinyk, T., Kasatkina, I. and Rytsko, O. (2019), «Adaptive control of ore mill charge», *E3S Web of Conferences*, pp. 1–11, doi: 10.1051/e3sconf/201912301038.
7. Oliinyk, T., Sklyar, L., Kushniruk, N. et al. (2023), «Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego», *Inżynieria Mineralna*, pp. 33–44, doi: 10.29227/IM-2023-01-04.
8. Biletskyi, V.S. et al. (2019), *Tekhnika ta tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn. Chastyna I. Pidhotovchi protsesy*, Vydavets FOP Cherniavskiy D.O., Kryvyi Rih, 200 p.
9. Cao, J., Liu, L., Han, Y. and Feng, A. (2019), «Comminution behavior and mineral liberation characteristics of lowgrade hematite ore in high pressure grinding roll», *Physicochem. Probl. Miner. Process*, Vol. 55 (2), pp. 575–585, doi: 10.5277/ppmp18169.
10. Gorobets, L., Verkhobina, I., Biletskyi, V. et al. (2020), «Identification of factors to reduce the energy costs of dispersing in jets», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 1 (108), pp. 55–62, doi: 10.15587/1729-4061.2020.217253.

Булах Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри збагачення корисних копалин і хімії Криворізького національного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-0965-0053>.

Наукові інтереси:

- теорія і технологія збагачення залізних руд різних типів;
- особливості збагачення залізних руд техногенних родовищ.

Bulakh O.V.

The impact of ore pre-treatment on the comminution process of oxidized ferruginous quartzites in a mill

The article investigates the patterns of disintegration of oxidized ferruginous quartzites during the grinding process using a chemical reagent aiming to determine the optimal conditions for the maximum liberation of hematite and quartz mineral grains to reduce the energy consumption of the process. Traditional comminution of such ores is associated with high energy costs and the inevitable overgrinding of the valuable mineral.

It has been established that a modern solution to this problem is the application of special reagents and their solutions, which modify the disintegration process at a physical and chemical level by reducing surface energy and promoting easier crack propagation. The mechanisms of how reagent treatment affects the disintegration efficiency of oxidized ferruginous quartzites during mill grinding are examined.

The article provides a calculation of the energy component of the disintegration process for oxidized ferruginous quartzites. The total energy required for the disintegration of a mineral grain is calculated, taking into account the grinding medium and the additional wedging effect created by the magnesium chloride solution. This effect is due to its adsorption on the surface of hematite and quartz grains, which facilitates the selective liberation of mineral complexes. The wedging effect allows for the determination of the additional work required for grain failure along cracks.

The presented calculation enables the determination of the influence of the magnesium chloride solution on the kinetics and dynamics of the disintegration of oxidized ferruginous quartzite grains during mill grinding. Bench-scale tests helped determine the optimal solution concentration for the studied ores and its impact on the disintegration indices when the concentration is varied. Under different conditions, this parameter requires clarification and further research.

Keywords: oxidized ferruginous quartzites; mineral grain; particle size; dissemination; liberation; reagent; grinding; comminution; disintegration.

Стаття надійшла до редакції 18.09.2025.