

Technology of hydraulic mining of iron ore in the Kriviy Rig basin

Andrii Kosenko¹, Oleh Khomenko², Maksym Kononenko^{2*}

¹Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: kmn211179@gmail.com

Abstract. The development of rich iron ore deposits in the Kriviy Rig basin is carried out underground at significant depths. The mine method of extracting minerals is characterized by high labor intensity, capital and operating costs. As an alternative to this method of developing rich iron ore deposits, borehole mining can be used. The use of this method eliminates the process of explosive preparation of minerals for transportation. At the same time, there is no dust or gas contamination in the mine and surrounding atmosphere. This eliminates hard work that is harmful to people's health. The experimental studies carried out made it possible to establish that borehole mining is promising in the process of developing ore deposits below average strength. It can be used for unmanned excavation of vertical isolated mine workings, creation of isolated quasi-cylindrical and combined chambers for various purposes. Based on experimental studies, mathematical expressions were obtained for calculating the rational parameters of borehole disintegration of martite ore mass by rotating water jets. The relationships between structural and morphological characteristics, fracturing of martite ores and parameters of hydraulic mining influence have been established. It has been established that the use of borehole mining ensures selective disclosure of ore-forming minerals. In this case, the quality of the ore improves and the mass fraction of silica decreases, which ensures the production of iron ore raw materials of the highest quality – master concentrates. Moreover, this technology is a combined ore preparation process, including enrichment grinding operations and classification of destruction products by particle size distribution during their laundering. Control of the granulometric composition of hydrodisintegration products is achieved by regulating the initial water pressure at the outlet of the jet nozzle, the speed of movement of the jet along the face exposure and the orientation of the jet relative to the elements of occurrence and texture of the ores.

Keywords: rich iron ores; martite ores; borehole mining; axial pressure; rotating water jet; hydraulic mining; beneficiation

Технологія гідравлічного видобування залізних руд в умовах Криворізького басейну

Андрій Косенко¹, Олег Хоменко², Максим Кононенко^{2*}

¹Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: kmn211179@gmail.com

Анотація. Розробка покладів багатих залізних руд в Криворізькому басейні здійснюється підземним способом в умовах значних глибин. Шахтний спосіб видобутку корисної копалини характеризується високою трудомісткістю, капітальними та експлуатаційними витратами. В якості альтернативи цьому способу розробки багатих залізрудних родовищ може бути використана свердловинна гідротехнологія. За умов застосування даного способу виключається

процес вибухової підготовки корисної копалини до транспортування. Водночас відсутнє запилення і загазованість рудничної та навколишньої атмосфери. Таким чином виключається важка і шкідлива для здоров'я людей праця. Проведені експериментальні дослідження дали змогу встановити, що свердловинна гідротехнологія є перспективною у процесі розробки рудних покладів нижче середньої міцності. Вона може бути використана для безлюдної проходки вертикальних відокремлених виробок, створення ізольованих квазіциліндричних та об'єднаних камер різного призначення. На основі експериментальних досліджень отримані математичні вирази для розрахунку раціональних параметрів свердловинної дезінтеграції масивів мартитових руд обертовими струменями води. Встановлені залежності між структурно-морфологічними характеристиками та тріщинуватістю мартитових руд і параметрами гідромоніторного впливу. Встановлено, що застосування свердловинної гідротехнології забезпечує селективне розкриття рудоутворюючих мінералів. В цьому випадку покращується якість руди та знижується масова частка кремнезему, що забезпечує отримання залізорудної сировини найвищої якості – суперконцентратів. Водночас дана технологія є комбінованим процесом рудопідготовки, що включає збагачувальні операції подрібнення та класифікацію продуктів руйнування за гранулометричним складом у ході їх відмивання. Управління гранулометричним складом продуктів гідродезінтеграції досягається завдяки регулюванню початковим тиском води на виході з гідромоніторної насадки, швидкістю переміщення струменя по відслоненню вибою й орієнтацією струменя щодо елементів залягання та текстури руд.

Ключові слова: *багаті залізни руди; мартитові руди; свердловинна гідротехнологія; осьовий тиск; обертовий водяний струмінь; гідромонітор; збагачення*

1. Вступ

Економічний потенціал гірничо-металургійного комплексу України значною мірою залежить від сучасного стану і перспектив подальшого сталого розвитку та перетворень сировинної бази, техніки і технології видобутку багатих залізних руд [1]. Водночас встановлено, що близько 80% усіх розвіданих запасів багатих залізних знаходиться на Українському щиті [2], в Криворізькому залізорудному басейні (Кривбасі) [3]. Розробка цих запасів здійснюється валово підземним способом [4] в межах глибин 1100–1300 м [5] із застосуванням різних варіантів системи підповерхового обвалення [6]. Для руйнування рудного масиву застосовують вибухове відбивання [7] віялами глибоких свердловин різної орієнтації [8] і площинним недозованим випуском рудної маси через воронки [9].

Водночас близько 51% покладів багатих залізних руд мають межу міцності на одновісне стиснення менше 40 МПа, 32% – 40–60 МПа, 13% – 60–80 МПа і лише 4% – більше 80 МПа [10]. Також відомо, що у надрах Кривбасу залягають від 20 до 30% балансових запасів високоякісних, чистих за домішками мартитових руд [11]. Це створює виключно перспективні передумови для організації видобутку та виробництва залізорудних концентратів високої якості ($Fe = 67\text{--}70\%$, $SiO_2 = 2,5\text{--}0,15\%$) [11]. Отримані концентрати використовуються для виробництва залізних порошків універсального призначення, що використовуються у електросталеплавильній, порошковій та феритовій металургії [12]. Проте структурно-мінералогічні особливості будови високоякісних мартитових руд не дозволяють ефективно їх готувати до процесів збагачення фізичними методами на основі вибухового відбивання [13] та механічного подрібнення [14].

Таким чином з переходом гірничих робіт на більш глибокі горизонти шахт (1200–1500 м), пріоритетною й актуальною стає проблема розширення номенклатури залізорудної продукції [11]. Це може бути забезпечено лише завдяки підвищенню якості видобутої рудної маси, без збільшення кількісних втрат і собівартості [15]. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є застосування нетрадиційних видобувних геотехнологій [16]. Такою технологією є свердловинна гідротехнологія [17]. Так як для свердловинної гідротехнології низька міцність і стійкість залізорудних масивів на глибоких горизонтах шахт Кривбасу є сприятливими факторами [11]. Водночас

руйнування масивів гірських порід струменем води високого тиску є перспективним методом. Проте для його реалізації потрібно вирішити низку наукових і технічних питань. Основними з яких є визначення та обґрунтування раціональних параметрів свердловинної гідротехнології.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Однією з неодмінних умов застосування свердловинної гідротехнології для дезінтеграції гірських порід [18] є необхідність отримання на вильоті з насадки струменів з хорошими гідродинамічними властивостями [19]. Водночас ефективність процесу гідродезінтеграції залежить від фізико-гідротехнологічних властивостей гірських порід, гідродинамічних характеристик і технології впливу водяних струменів на породний масив [20].

Загальноприйнятим критерієм оцінки гідродинамічних властивостей струменя та його структури є поняття компактного струменя [21]. Під цим поняттям розуміється здатність струменя зберігати свою кінетичну енергію на тій чи іншій відстані від насадки [22]. В ході порівняння напірних водяних струменів загального поняття компактності струменя буває недостатньо [23]. Це пов'язано з вивченням впливу різних факторів на гідродинамічні властивості струменя та його працездатність у процесі руйнування гірського масиву. Коли для конкретного судження про властивості струменя та його структуру використовується один з гідралічних або геометричних параметрів [24]. Такими параметрами, залежно від умов і наявних засобів дослідження, є [25]: конусність зовнішніх меж струменя, що визначається відповідними кутами (α, β) і залежить від осьового тиску (P_o) та вихідного діаметру насадки (d_o); довжина початкової ділянки струменя, в межах якої осьовий динамічний тиск (P_M) залишається незмінним і рівним вихідному; сила удару струменя на відслонення вибою на певній відстані від насадки (або крива зміни сили удару струменя залежно від відстані); епора розподілу осьового (P_M) і середніх (P_c) динамічних тисків за довжиною струменя; поперечний перетин струменя на якійсь певній відстані від насадки. Перелічені параметри струменя знаходяться у певній функціональній залежності між собою і можуть характеризувати компактність струменя як у ході одночасного розгляду, так і під час кожного параметра окремо [25]. На рис. 1 зображено схему водяного струменя, що виходить з насадки із зазначенням основних його технологічних параметрів.

Структурно стаціонарний водяний струмінь, що виходить з насадки гідромонітора в повітряне середовище, може бути представлений трьома ділянками (рис. 1) [25]: початковою ділянкою (L_m), що характеризується наявністю щільного осьового ядра, в якому швидкість (v_c) і осьовий динамічний тиск (P_M) води постійні та рівні швидкості (v_o) і динамічному вильоту струменя з насадки; основною ділянкою (L_j), на якій струмінь має порівняно щільну центральну зону, але поблизу меж поверхні вже насичений бульбашками повітря; неефективною ділянкою ($L_{n.e.}$), що складається з елементарних струменів і крапель води, які перемішуються в повітрі зі швидкістю, що постійно зменшується.

Узагальнення експериментальних даних показало, що найбільш зручною гідродинамічною характеристикою, яка описує компактність струменя є осьовий динамічний тиск (P_M), що знаходиться в тісному зв'язку з іншими характеристиками. У загальному вигляді осьовий динамічний тиск струменя (P_M), що виходить з насадки заданої форми та розмірів, за умов постійної витрати води, залежить від середньої швидкості струменя в початковому перерізі (v_o), діаметра насадки (d_o) і відстані від неї (L), щільності (ρ), в'язкості (μ) та поверхневого натягу води (δ) [25].

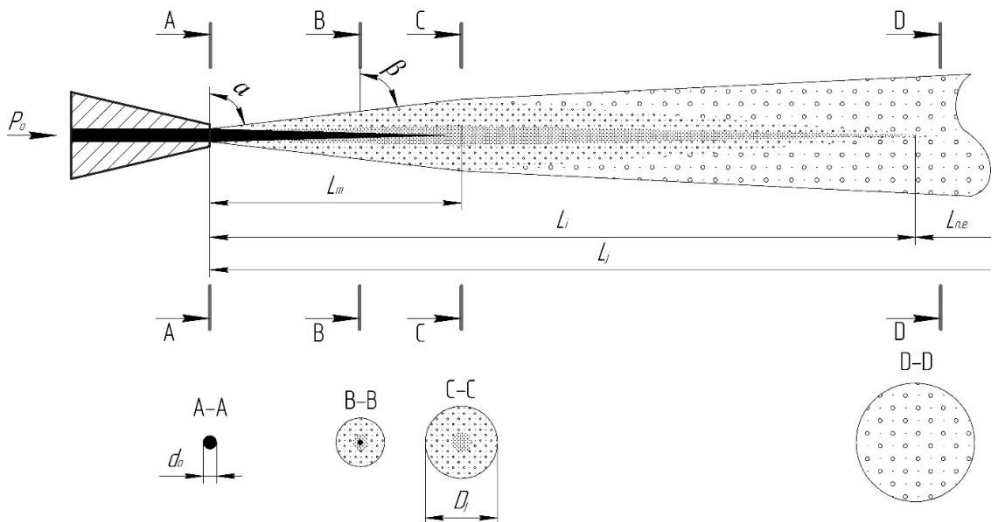


Рисунок 1. Схема водяного струменя: P_o – осевий тиск струменя; d_o – вихідний діаметр насадки; D_j – діаметр струменя, що рухається по відслоненню вибою; L_j – довжина струменя; L_m – початкова ділянка струменя; L_i – основна ділянка струменя; $L_{n.e.}$ – неефективна ділянка струменя; α, β – кути зовнішніх меж струменя

Водночас дослідні роботи зі свердловинної гідротехнології, у процесі розробки покладів багатих залізних руд, проводилися лише в умовах Велико-Троїцького родовища Курської магнітної аномалії [17]. Де поклади розробляються в складних гідрогеологічних умовах напірнообводненими струменями води [17]. Основні труднощі у цьому випадку пов'язані з недосконалістю процесів керування та незабезпечення належного наукового обґрунтування раціональних параметрів свердловинної гідротехнології [17]. Тому дослідження особливостей формування свердловинними гідромоніторами компактних струменів та розробка методики розрахунку їх параметрів є одним із основних завдань гідродезінтеграції масивів багатих мартитових руд.

3. Методика проведення досліджень

Метою дослідження є проведення експериментальних досліджень задля встановлення раціональних параметрів свердловинної гідротехнології при розробці покладів мартитових руд в умовах значних глибин.

Загальна методика досліджень включала поетапне виконання шахтних експериментів з руйнування масиву мартитових руд обертовим струменем води через гідромоніторну насадку. На кожному з етапів робіт здійснювалося: вивчення інженерно-геологічної обстановки рудних покладів і вибір дослідних ділянок; розроблення технологічних схем гідродезінтеграції руди та створення відповідного експериментального обладнання; добір засобів забезпечення гідровидобувних робіт; вибір методів контролю та вимірювання параметрів процесу гідродезінтеграції; узагальнення й аналіз результатів експериментів і розроблення рекомендацій щодо створення технології та обладнання з урахуванням досягнутих показників.

4. Результати та обговорення

Схематично гідромоніторна дезінтеграція рудного масиву обертовими водяними струменями через свердловини (рис. 2) представляє собою нестационарний процес, що

залежить від гідродинамічних параметрів, які постійно змінюються за довжиною струменя, розмірів утворених очисних просторів, способу прикладання струменя до відслонення вибою та геолого-технологічних характеристик рудного масиву.

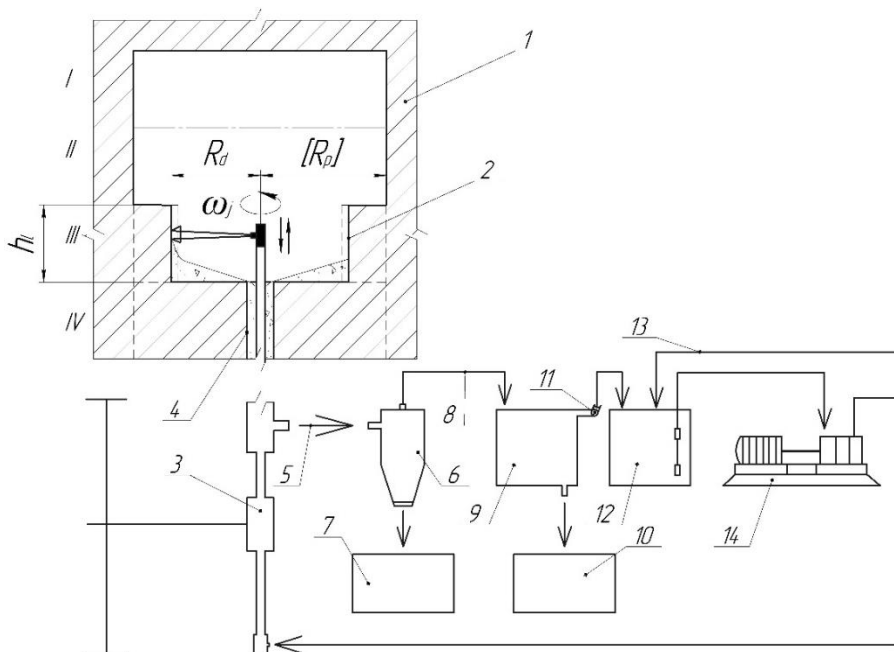


Рисунок 2. Технологічна схема ланцюга і обладнання модульного комплексу свердловинної гідромоніторної дезінтеграції мартитових руд обертовим водяним струменем: R_d – радіус руйнування масиву; $[R_p]$ – проєктний радіус порожнини; h_1 – висота шару руди, що відбивається; ω_j – кутова швидкість переміщення струменя по відслоненню вибою; I, II, III, IV – інтервали формування порожнини, що становлять 1 м; 1 – рудний масив; 2 – відслонення вибою; 3 – гідромоніторний агрегат; 4 – доставна свердловина; 5 – пульпопровід; 6 – батарея гідроциклонів; 7 – контейнер суперконцентрату; 8 – шламовідвід; 9 – дешламатор; 10 – контейнер осадового концентрату; 11 – насос для перекачування; 12 – ємність для технологічної води; 13 – водопровід технічної води; 14 – високонапірний насос з електродвигуном

Комплекс прохідницького обладнання свердловинної гідротехнології включає свердловинний гідромонітор, що складається із керуючої установки, бурових штанг, оголовку зі струменеформуючою насадкою та превентора. У якості керуючої гідромоніторної установки використовується буровий верстат НКР-100МПА або КБУ-1. Він дозволяє здійснювати операції буріння свердловин і переміщення гідромоніторного струменя води із заданою швидкістю вздовж свердловини або із заданим інтервалом та обертанням навколо її осі. Габарити та вага агрегату дозволяють легко переміщувати гідромонітор у будь-яке місце. Довжина свердловин може сягати 40 м, а діаметр – 105–130 мм. Квазіциліндрична порожнина формується від вибою до гирла свердловини з інтервалом 1 м. Доставка гідросуміші здійснюється під силою власної ваги по затрубному простору технологічної свердловини. Далі, через встановлений у гирлі свердловини пульповід, по трубах $\varnothing 100$ –150 мм до місця згущення у виробці доставки.

Блок зневоднення складається з батареї гідроциклонів ГД-15, що переробляє до 70 м³/год гідросуміші до стану вологості 25–30%, системи трубопроводів, водозбірника-освітлювача (камери насосної станції). Блок підготовки технологічної води включає насосну станцію з комплектом трубопроводів, контрольно-вимірвальної та запірно-регулюючої апаратури і відцентрового високонапірного насосу «Sunflo» Р2000 з робочими параметрами: подача води – 41 м³/год, напір води – 7–8 МПа, потужність електродвигуна – 45 кВт.

Свердловинний гідромоніторний агрегат може розташовуватись як у нижній, так і у верхній частині майбутньої виробки. Світлини процесу формування відокремленої та об'єднаної порожнин у масиві мартитових руд у ході його свердловинної гідромоніторної дезінтеграції подано на рис. 3.

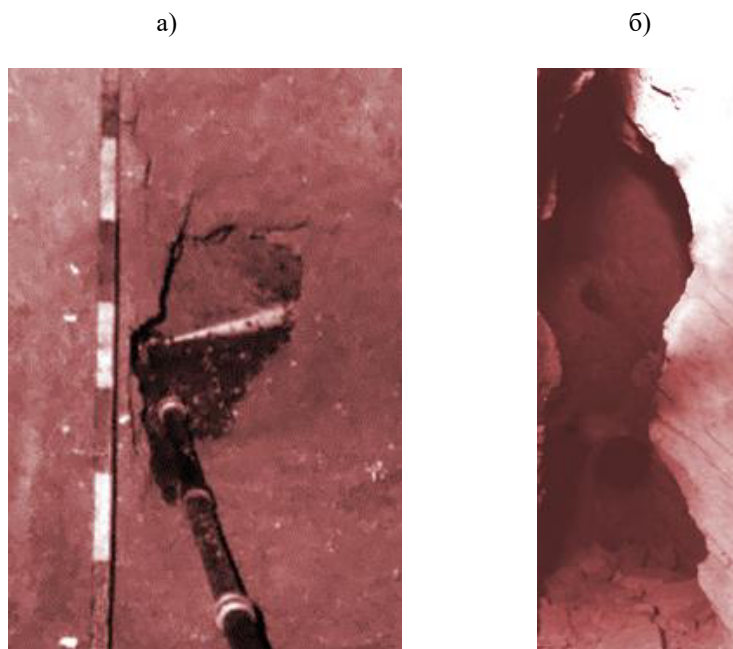


Рисунок 3. Світлини процесу формування відокремленої (а) та об'єднаної (б) порожнин у масиві мартитових руд у ході його свердловинної гідромоніторної дезінтеграції

Експериментально процес гідромоніторного руйнування високоякісних пухкопов'язаних мартитових руд вивчався в умовах горизонтів 950–1240 м шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суша Балка», і шахти «Криворізька» АТ «Криворізький залізорудний комбінат» [11]. Між межею міцності руд на одновісне стискання та їх пористістю встановлена залежність [11].

$$\sigma_c = \sigma_c^o \cdot (1 - \eta) \cdot e^{-9\eta}, \text{ м}, \quad (1)$$

де $\sigma_c^o = 180\text{--}230$ межа міцності на одновісне стиснення зразків окислених кварцитів, аналогічних за генезисом, складу та структурі пористим мартитовим рудам, МПа; η – загальна пористість зразків руд, ч. од.

Показники гідромоніторної дезінтеграції характеризуються декількома гідродинамічними показниками, у тому числі інтегральним параметром компактності струменя. Тобто довжиною його початкової ділянки (L_m), на якому осьовий динамічний тиск (P_M) дорівнює осьовому тиску (P_o) води на вильоті зі струменеформуючої насадки.

Довжину початкової ділянки струменя (L_m) можна визначити експериментально або розрахувати за виразом

$$L_m = (A - B \text{Re}) \cdot d_o, \text{ м}, \quad (2)$$

де d_o – діаметр вихідного отвору струменеформуючої насадки, м; A і B – емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу і якості виготовлення насадки та конструкції гідромонітора; Re – число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V_o \cdot d_o}{\nu}, \quad (3)$$

де ν – кінематична в'язкість рідини, м²/с; V_o – початкова швидкість вильоту струменя з насадки, м/с

$$V_o = 42\sqrt{P_o}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

де P_o – осьовий тиск струменя на вильоті зі струменеформуючої насадки, МПа.

Для свердловинних гідромоніторів, коли $d_o = (5-15) \cdot 10^{-3}$ м і $P_o = 1-8$ МПа величини A і B відповідно приймають значення $80-100$ і $(45-50) \cdot 10^{-6}$.

Характер зміни параметра P_M за межами ділянки L_m у загальному випадку визначається зі співвідношення

$$P_M = P_o \left(\frac{L_m}{L_w} \right)^k, \text{ МПа}, \quad (5)$$

де k – показник, що залежить від осьового тиску, типу та якості виготовлення насадки, приймається $k = 1$; L_w – довжина робочої ділянки струменя, м

$$L_w \leq 6L_m, \text{ м}. \quad (6)$$

Так як у процесі гідромоніторної дезінтеграції (збільшення виробленого простору) осьовий динамічний тиск (P_M) за межами початкової ділянки струменя (L_m) закономірно зменшується, то необхідно для кожного типу або сорту руд регламентувати його критичну величину [P_M], переходячи через яку процес руйнування припиняється за будь-яких умов

$$[P_M] \leq 0,15\sigma_c, \text{ МПа}. \quad (7)$$

З огляду виразів (5) і (6), граничне значення [P_M] на відстані [L_w] буде визначатися за формулою

$$P_M = \frac{P_o \cdot L_m}{[L_w]} = \frac{P_o \cdot L_m}{6L_m} = \frac{P_o}{6} \approx 0,15P_o, \text{ МПа}. \quad (8)$$

Тоді з урахуванням виразу (7), вираз (8) буде мати вигляд

$$[P_M] = 0,15P_o = 0,15\sigma_c, \text{ МПа}; \quad (9)$$

або

$$[P_o] \approx \sigma_c, \text{ МПа}. \quad (10)$$

Таким чином, тиск струменя на виході з насадки гідромонітора повинен бути не менше межі міцності маргітової руди на стиснення, визначеного із залежності (1). Так коли межа міцності на одновісне стиснення знаходиться в межах від 0,1 до 7,0 МПа, необхідно, щоб осьовий тиск становив не менше аніж 7,0 МПа.

Основним конструктивним параметром є гранична для порід, що руйнуються довжина робочої ділянки струменя ($[L_w]$).

З виразів (8) і (9) маємо

$$[L_w] = \frac{P_o \cdot L_o}{0,15\sigma_c}, \text{ м}. \quad (11)$$

Ступінь дезінтеграції (d_i) і продуктивність руйнування руди Π , залежать від швидкості переміщення водяного струменя (v_j) по відслоненню вибою, тобто від часу контакту струменя з масивом (t_k).

Для струменя, що переміщується по окружності у свердловині на якійсь відстані від насадки (L), швидкість руху (v_j) води в щільному осьовому ядрі струменя становить

$$v_j = 2\pi \cdot L \cdot \omega_j, \text{ м/с}, \quad (12)$$

де L – відстань від насадки до відслонення вибою, м; ω_j – кутова швидкість обертання струменя навколо осі ставу свердловинного гідромонітора, об/хв

Час контакту обертального струменя з масивом (t_k) відповідає співвідношенню

$$t_k = \frac{D_a}{V_j}, \text{ с}, \quad (13)$$

де D_a – середній діаметр руйнуючого струменя, рухається по відслоненню вибою, м
 $D_a = 10d_o$, (14)

Аналіз показав, що процес дезінтеграції масиву руди водяним струменем, що обертається, характеризується питомим імпульсом його силового динамічного тиску на масив (I_M), який визначається за формулою

$$I_M = P_M \cdot t_k, \text{ Н/с}, \quad (15)$$

або

$$I_M = \frac{P_M \cdot 5d_o}{L_M \cdot \pi \cdot \omega_c}, \text{ Н/с}, \quad (16)$$

де P_M – осьовий динамічний тиск струменя, що контактує з відслоненням вибою, який повинен бути більший за критичну величину $[P_M]$, переходячи через яку процес руйнування припиняється за будь-яких умов, МПа.

З огляду виразу (2), формула (16) буде мати вигляд

$$I_M = \frac{K}{L_w^2 \omega_j}, \text{ Н/с}, \quad (17)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує типорозмір гідромонітора

$$K = 1,59P_o \cdot L_m \cdot d_o. \quad (18)$$

Установлено, що для заданого фракційного складу продуктів гідродезінтеграції існує відповідно граничне значення питомого імпульсу ($[I_M]$) осьового динамічного тиску, що інтегрально відображає структурно-текстурні та мінералогічні особливості руд, геомеханічний стан рудного масиву, технологію і параметри впливу струменя на масив. Величина $[I_M]$ для конкретних інженерно-геологічних умов і заданого ступеня гідродезінтеграції встановлюється експериментально.

З виразу (17) видно, що керованим параметром, який забезпечує заданий режим дезінтеграції рудного масиву свердловинними гідромоніторами, за умов контрольованої початкової ділянки струменя (L_m), є кутова швидкість обертання (ω_j).

З огляду на те, що для кожного типорозміру гідромонітора параметри P_o , L_m , d_o мають конкретні значення та враховуючи те, що заданий фракційний склад контролюється постійною величиною $[I_M]$, вираз (17) перетвориться до виду

$$L_w^2 \cdot \omega_j = \frac{K}{[I_M]} = [W] \approx const, \quad (19)$$

де $[W]$ – постійна для конкретних умов величина, що інтегрально відображає інженерно-геологічної властивості масиву, задану ступінь дезінтеграції рудного масиву, параметри гідромонітора та технологію руйнування

$$[W] = \frac{P_o \cdot L_m \cdot d_o}{[I_M]} \quad (20)$$

У загальному випадку продуктивність гідромоніторного руйнування рудного шару за один оберт струменя буде визначатися з виразу

$$П = 5000 \frac{(P_o \cdot L_m)^{0,5} \cdot d_o \cdot \gamma}{L_w^{0,5} \cdot \omega_j}, \text{ т/оберт}, \quad (21)$$

де γ – об'ємна вага руди, т/м³.

5. Висновки

Аналіз проведених експериментальних досліджень зі свердловинної гідромоніторної дезінтеграції мартитових руд показав перспективність та доцільність його використання у процесі розробки нових технологій видобутку руд нижче середньої міцності. Свердловина гідротехнологія може бути використана для безлюдної проходки вертикальних відокремлених виробок, створення ізольованих квазіциліндричних та об'єднаних камер різного призначення.

У результаті проведених досліджень технологічного процесу гідромоніторної дезінтеграції високоякісних маломіцних залізних руд через свердловини встановлено наступне:

- руйнування рудного масиву обертювим струменем води відбувається за умови, коли тиск води в струмені буде становити 10–20% від межі міцності на одновісне стиснення;
- продуктивність гідромонітора по руді при тиску струменя води в межах 1.0–2.5 МПа змінюється від 9 до 25 т/год;
- питома витрата води при гідромоніторній дезінтеграції знаходиться в межах 0.7–2.5 м³/т або 2.7–9.6 м³/м³;
- радіуси утворених порожнин у масивах мартитових рудах з пористістю 20–35% та межею міцності на стиснення 5–10 МПа становить 1.6–2.2 м;
- процес гідравлічного руйнування пухких мартитових руд на 70-90% є процесом селективної гідродезінтеграції, за якої руйнування відбувається по міжфазних межах мінеральних зерен та агрегатів руди;
- питома витрата води, ефективний радіус руйнування, фракційний склад рудної маси значно залежать від орієнтації водяних струменів щодо шаруватості рудного масиву;
- якщо руйнування відбувається вздовж шаруватості, то майже в 2,5 рази зменшується витрата води (до 0,7 м³/т), в 1,3–1,5 рази збільшується радіус руйнування та на 5-10% збільшується вихід відкритих класів руди;
- зі зростанням швидкості переміщення струменя по відслоненню вибою (швидкості обертання струменя навколо своєї осі) збільшується вихід дрібних зернових (розкритих) фракцій руди та знижується продуктивність гідроруйнування завдяки зменшенню часу контакту струменя з масивом і зменшення проникаючої можливості струменя в масив за структурними порушеннями (тріщинами, порами);
- ефективність процесу гідродезінтеграції підвищується більше завдяки збільшенню діаметра насадок гідромонітора, аніж завдяки збільшенню тиску, що дозволяє спростити систему підготовки та підведення до гідромонітора технологічної води;
- процес гідродезінтеграції ефективно здійснюється за системою замкнутого кругообігу технологічної води;
- довжина самопливної доставки рудної пульпи по горизонталі становить 10–30 м;
- параметри напірного водяного струменя (конусність зовнішніх меж, довжина початкової ділянки, характер зміни динамічного тиску по осі) забезпечуються при заданій витраті та тиску води, формою і розмірами насадки;

– гідромоніторний оголовок може оснащуватися двома насадками для врівноваження реактивних сил реакції струменя, що розгойдують став гідромонітора;

– у процесі зневоднення гідросуміші відбувається винесення шламової частини рудного матеріалу (продуктів гідродезінтеграції) спільно з домішками глини, що суттєво змінює властивості рудної маси на карті наміву наближаючи їх до пісків, різко знижуючи злежуваність;

– регулюючи режим впливу гідромоніторного струменя на відслонення вибою можна здійснювати процеси селективної дезінтеграції з одержанням суперконцентрату із вмістом заліза 69,0–69,5% для бездомного виробництва сталей із залишенням у надрах міжрудних сланців і залізистих кварцитів, що утворюють породні шматки.

References

1. Pysmennyi, S., Fedko, M., Shvager, N., & Chukharev, S. (2020). Mining of rich iron ore deposits of complex structure under the conditions of rock pressure development. *E3S Web of Conferences*, 201, 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101022>
2. Khomenko, O. & Kononenko, M. (2019). Geo-energetics of Ukrainian crystalline shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 12–21. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/3>
3. Smirnov, A.Ya., Yevtekhov, Ye.V., & Yevtekhov, V.D. (2014). Geological structure of hematite quartzite deposits in Kryvyi Rih basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 17–22.
4. Pysmennyi, S., Fedko, M., Chukharev, S., Rysbekov, K., Kyelgyenbai, K., & Anastasov, D. (2022). Technology for mining of complex-structured bodies of stable and unstable ores. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012040>
5. Pysmennyi, S., Shvager, N., Shepel, O. Kovbyk, K., & Dolgikh O. (2020). Development of resource-saving technology when mining ore bodies by blocks under rock pressure. *E3S Web of Conferences*, 166, 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602006>
6. Kosenko, A.V. (2021). Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
7. Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15(2), 111–123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
8. Kononenko M., Khomenko O., Kovalenko I., & Savchenko M. (2021). Control of density and velocity of emulsion explosives detonation for ore breaking. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 69–75. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/069>
9. Pysmennyi, S., Brovko, D., Shwager, N., Kasatkina, I., Paraniuk, D., & Serdiuk, O. (2018). Development of complexstructure ore deposits by means of chamber systems under conditions of the Kryvyi Rih iron ore field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(95)), 33–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142483>
10. Kononenko M., Khomenko O., Myronova I., & Kovalenko I. (2022). Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining. *Mining Machines*, 40(2), 88–97. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.4>
11. Tarasyutin V.M. (2015). Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 54–60.
12. Ai-min Yang, Tian-yu Jiang, Yang Han, Jie Li, Yi-fan Li, & Chun-yu Liu (2022). Research on application of on-line melting in-situ visual inspection of iron ore powder based on Faster R-CNN. *Alexandria Engineering Journal*, (61), 8963–8971. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.034>
13. Khomenko, O., Kononenko, M., & Myronova, I. (2013). Blasting works technology to decrease an emission of harmful matters into the mine atmosphere. *Annual Scientific-Technical Colletion - Mining of Mineral Deposit*, 231-235. <https://doi.org/10.1201/b16354-43>
14. Shuhui Zhang, Mingjun Rao, Rendong Xiao, Jinxiang You, Guanghui Li, Tao Jiang (2022). Enrichment of Nb and Ti from carbonatite pyrochlore ore via calcining-slaking followed by gravity separation. *International Journal of Mining Science and Technology*, (32), 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.02.005>

15. Nunna V., Hapugoda S., Pownceby M.I., & Sparrow G.J. (2021). Beneficiation of low-grade, goethite-rich iron ore using microwave-assisted magnetizing roasting. *Minerals Engineering*, (166), 106826. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106826>
16. Lina Zhang, & Jinman Wang (2023). Prediction of the soil saturated hydraulic conductivity in a mining area based on CT scanning technology. *Journal of Cleaner Production*, (383), 135364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135364>
17. Rochev V. (2018). Hydraulic borehole mining method possible application at Middle Larba alluvial gold field. *E3S Web of Conferences: VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources"*, 56, 01025 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185601025>
18. Khomenko, O.Ye. (2012). Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 44-54.
19. Cano-Salinas, L., Sourd, X., Moussaoui, K., Le Roux, S., Salem, M. b, Hor, A., & Zitoune, R. (2023). Effect of process parameters of Plain Water Jet on the cleaning quality, surface and material integrity of Inconel 718 milled by Abrasive Water Jet. *Tribology International*, (178), 108094. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108094>
20. Hao Yang, Guichuan Li, Xiaohui Dong, Tuo Deng, Jian Li, Xiaohui Qin, Wei Wang, Yongmin Zhang, & Lu Zhou (2022). Application of coalbed methane hydraulic jet-increasing permeability-nitrogen injection to increase production in Shanxi mining area. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (215), 110611. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110611>
21. Zenghui Liu, Zhengkuo Ma, Kai Liu, Shiguang Zhao, & Yijin Wang (2023). Coupled CEL-FDEM modeling of rock failure induced by high-pressure water jet. *Engineering Fracture Mechanics*, (277), 108958. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108958>
22. Momber A.W. (1998). The kinetic energy of wear particles generated by abrasive–water-jet erosion. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1–3), 121–126. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00050-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00050-8)
23. Franco-Medrano, F. (2015). Numerical scheme model for the dynamics of a high-speed atomizing liquid jet. In *Conference: Mathematics bridge over the Pacific for competitive edge in industry*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2521.8081>
24. Fermin Franco-Medrano & Yasuhide Fukumoto (2015). Analytical model for the dynamics of an atomizing liquid jet. Conference: XIV Japan Society of Fluid Mechanics Western Branch Conference, 1–4. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3180.4326>
25. Fermin Franco Medrano, Yasuhide Fukumoto, Clara Marika Velte, & Azur Hodžić (2017). Mass entrainment rate of an ideal momentum turbulent round jet. *Journal of the Physical Society of Japan*, 86(3), 034401.1–034401.10. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.034401>