

Тарасюгін В.М.**Косенко А.В.****Хоменко О.Є.****Кононенко М.М.**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СВЕРДЛОВИННОЇ ГІДРОМОНІТОРНОЇ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ МАСИВІВ БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУД

Мета. Удосконалення теорії алмазно-канатного різання кристалічних порід при відокремленні блоків **Мета.** Вивчення і розроблення раціональної методики розрахунку параметрів процесу свердловинної гідродезінтеграції масивів мартитових руд напірними обертовими струменями води.

Методи дослідження. Шахтні дослідно-методичні та дослідно-експериментальні роботи із: поетапним вивченням інженерно-геологічної обстановки рудних покладів і вибором дослідних ділянок; розробленням технологічних схем гідродезінтеграції рудного масиву та створення відповідного експериментального обладнання; добором засобів забезпечення гідровидобувних робіт; вибором методів контролю та вимірювання параметрів процесу гідродезінтеграції; узагальненням та аналізом результатів експериментів і розробленням рекомендацій щодо створення технології та обладнання з урахуванням досягнутих показників.

Результати. Розроблена методика розрахунку параметрів гідродезінтеграції масивів багатих мартитових руд на основі дослідження особливостей формування свердловинними гідромоніторами компактних обертових струменів води.

Наукова новизна. Встановлені залежності між структурно-морфологічними характеристиками та тріщинуватістю мартитових руд (пористістю, співвідношенням зернового складу руди, межею міцності на одновісне стиснення та кусковатістю) і параметрами гідромоніторного впливу (тиску води, початковим діаметром струменя та швидкістю його переміщення по відслоненню вибою), що дають можливість визначити раціональні технологічні параметри продуктів гідродезінтеграції.

Практична значимість. Свердловинна гідромоніторна дезінтеграція масивів мартитових руд є комбінованим процесом рудопідготовки, що включає збагачувальні операції подрібнення та класифікацію продуктів руйнування за гранулометричним складом у ході їх відмивання. Водночас відбувається селективне розкриття рудоутворюючих мінералів, що покращують якість руди на 0,5–1,5% порівняно з природним, зниження масової частки кремнезему від 2,0–1,2 до 0,5–0,3%, що забезпечує отримання залізорудної сировини найвищої якості – суперконцентратів із вмістом заліза 69,0–69,5%. 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: мартит; руда; гідротехнологія; насадка; гідродезінтеграція; збагачення; суперконцентрат

Вступ.

Розвиток залізорудної галузі має для України стратегічне значення, оскільки, по-перше, забезпечує сировиною металургію, що є найпотужнішим сектором внутрішнього виробництва, і по-друге, є орієнтованою на експорт галуззю економіки країни [1]. Водночас металургійний комплекс є важливою складовою української індустрії, сплата податків підприємствами галузі робить вагомий внесок у формування державного бюджету [1].

Установлено, що в надрах України знаходиться величезна кількість розвіданих запасів залізних руд (близько 21579,2 млн за категоріями А+В+С1) [1]. Водночас близько 80% усіх розвіданих запасів багатих залізних знаходиться на Українському щиті [2], в

Криворізькому залізорудному басейні (Кривбасі), розробка яких здійснюється підземним способом [3].

Масиви багатих залізних руд Кривбасу переважно представлені скельними і зв'язними породами, що умовно поділяють на три основні різновиди: мартитові (34%), гетит-гематит-мартитові (51%) і гетит-гематитові (15%) [4]. Міцнісні показники окремих руд і залізистих кварцитів змінюються в широких межах. Приблизно 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 [5]. Водночас на кожні 100 м глибини межа міцності руди на одновісне стиснення зменшується в середньому на 0,6–0,7 для південної і на 0,12–

0,14 для північної групи рудників, що викликано збільшенням частки дисперсно-гематитових руд і зміною кварцового цементу на силікат-карбонатний [5]. В масивах багатих залізних руд присутні вclusions прошарків залишкових мартизових роговиків і джеспілітів, внаслідок неповного їх гіпергенезу, межа міцності на одновісне стиснення яких – 90–150 МПа [5]. Основну масу запасів покладів (до 70%) становлять мартитові руди, що є переважно двокомпонентними агрегатами гематиту та кремнезему. З них до 25% запасів це дуже пористі маломіцні різновиди, які складені на 95–98% чистим гематитом з вмістом заліза 64–69%, що дозволяє здійснювати їх переробку у металургійному виробництві без попереднього збагачення [6]. Найбільш багаті пористі руди вилуговування займають центральну частину покладів, що створює перспективи їх селективної розробки, як запаси першої черги, з вмістом заліза $\geq 64\%$, і другої черги, з вмістом заліза $< 64\%$ [7]. Такі геологічна будова та фізико-механічні властивості значної частини запасів покладів багатих залізних руд створюють безпосередні передумови для розроблення й освоєння безпечної інноваційної свердловинної гідротехнології, що є альтернативною вибуховій [8–12]. Так як для свердловинної гідротехнології низька міцність і стійкість залізородних масивів на глибоких горизонтах шахт Кривбасу є сприятливими

факторами [7]. 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 оптимальних параметрів свердловинної гідротехнології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ефективність процесу дезінтеграції природних масивів гірських порід, напірними гідромоніторними обертовими водяними струменями, залежить від фізико-гідротехнологічних властивостей гірських порід, гідродинамічних характеристик і технології впливу водяних струменів на породний масив [13–15].

Встановлено, що загальноприйнятим інтегральним критерієм оцінки якості струменя рідини є її компактність [16]. Інтегральний критерій характеризується комплексом взаємозв'язаних геометричних і гідродинамічних параметрів: конусністю зовнішніх меж і довжиною структурних частин струменя; закономірностями зміни осьових (P_M) і середніх (P_C) динамічних тисків за довжиною струменя; поперечним перетином струменя (S_{cm}) на якійсь певній відстані (L) від насадки. На рис. 1 подано світліни водяного струменя, що виходить з насадки із зазначенням основних його технологічних параметрів

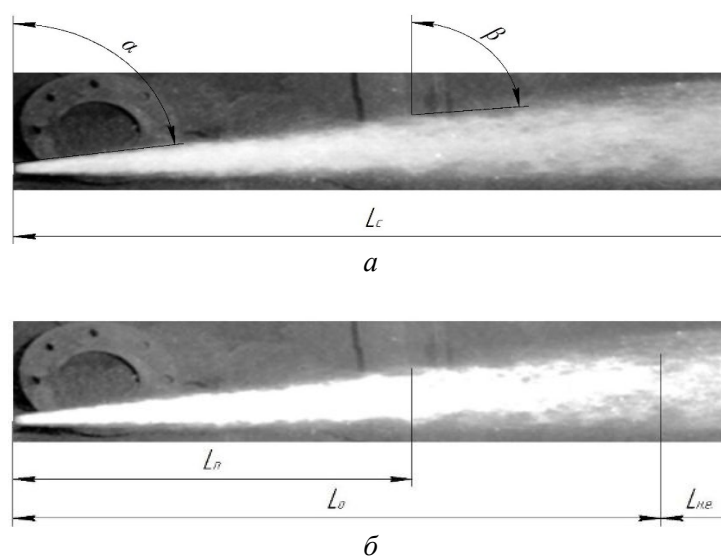


Рис. 1. Світліни водяного струменя, що виходить з насадки (а) і його активної центральної частини (б): L_c – довжина струменя; L_n – початкова ділянка струменя; L_o – основна ділянка струменя; $L_{не}$ – неефективна ділянка струменя; α , β – кути зовнішніх меж струменя

Структурно стаціонарний водяний струмінь, що виходить з насадки гідромонітора в повітряне середовище, може бути представлений трьома ділянками (рис. 1): початковою ділянкою (L_n), 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_o), на якому струмінь має порівняно щільну центральну зону, але поблизу меж поверхні вже насичений бульбашками повітря; неефективною ділянкою ($L_{н.е.}$), що складається з елементарних струменів і крапель води, які переміщуються в повітрі зі швидкістю, що постійно зменшується.

Результатами дослідження [13–15, 17, 18] встановлено, що характер зміни основних параметрів струменя за довжиною, у значній мірі, залежить від початкового тиску води на виході з насоса й умови підтікання потоку в каналах, які підводяться до насадки. Найбільш простою й оптимальною, з точки зору гідродинаміки потоку, конструкцією каналу, що підводиться до насадки, є пряма труба, довжина якої перевищує 50 діаметрів її внутрішнього каналу та закінчується насадкою конструкції Ніконова-Шавловського [19].

Узагальнення експериментальних даних [13–15, 17, 18, 20, 21] 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) [22].

Дослідженнями встановлено [13, 17], що змінюючи властивості рідини можна суттєво покращити параметри струменя. Найкращим чином це досягається завдяки додаванню у воду різних полімерних добавок.

Також необхідно зазначити, що останнім часом у розумінні механізму руху рідини в каналах, турбулентності в струменях пристінкових течій, відбулися

суттєві зміни, що пов'язані з виявленням когерентних структур [23]. Тобто квазідвовимірних великомасштабних вихрових утворень, що розвиваються на тлі дрібномасштабної турбулентності [23]. Такі пульсаційні порожнисті вихори здатні, завдяки стисненню, збільшувати в кілька разів лінійну швидкість рідин, що обертається в них, підвищуючи майже на порядок його енергію динамічного тиску, порівняно з середнім перерізом струменя. Водночас відомо [24], що свердловинний простір зумовлює обмеження габаритів гідромоніторних оголовків і бічне розташування струменеутворюючих насадок, що істотно зменшує довжину початкової ділянки струменя, сприяє більш швидкому її розпаду і, як наслідок, знижує руйнівну здатність струменя. Тому дослідження особливостей формування свердловинними гідромоніторами компактних струменів та розробка методики розрахунку їх параметрів є одним із основних завдань гідродезінтеграції масивів багатих мартитових руд.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є вивчення і розроблення раціональної методики розрахунку параметрів процесу свердловинної гідродезінтеграції масивів мартитових руд напірними обертовими струменями води.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати геолого-мінералогічні характеристики та фізико-гідротехнологічні властивості пухкопов'язаних мартитових руд в умовах глибоких горизонтів шахт і вибір ділянок проведення експериментів.

2. Дослідити свердловинні гідромоніторні струмені високого тиску.

3. Експериментально вивчити особливості і визначити основні параметри та залежності, що характеризують процес гідродезінтеграції високоякісних мартитових руд напірними обертовими водяними струменями через свердловини.

4. Розробити методику інженерних розрахунків параметрів технологічного процесу свердловинної гідромоніторної дезінтеграції масивів мартитових руд.

Методи дослідження.

Загальна методика досліджень включала поетапне виконання шахтних дослідно-методичних і дослідно-експериментальних робіт від випробувань найпростіших технологічних схем та гідромоніторного обладнання до розробки наукових засад технології керованої гідродезінтеграції масивів мартитових руд. На кожному з етапів робіт передбачалося: 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.

Виклад основного матеріалу.

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.

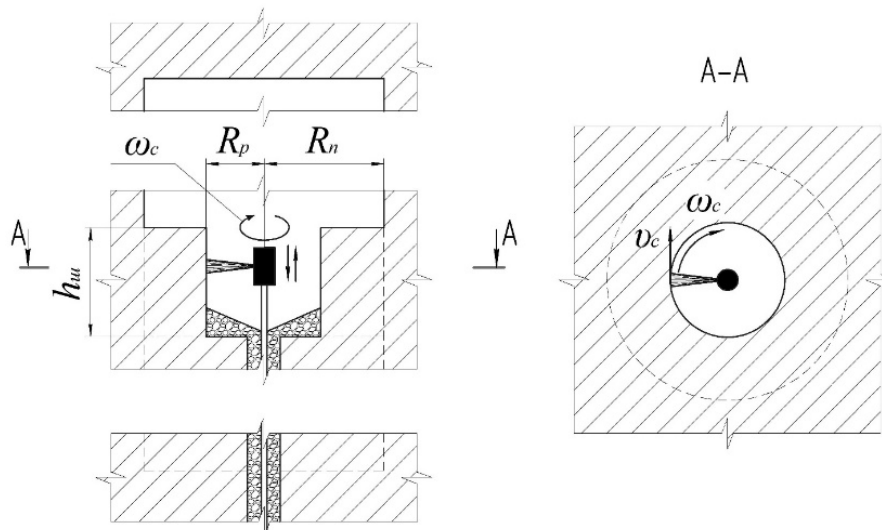


Рис. 2. Розрахункова схема гідромоніторного руйнування мартитових руд обертовим водяним струменем: R_p – радіус руйнування масиву; R_n – проектний радіус виробки; h_m – висота шару руди, що відбивається; v_c , ω_c – відповідно лінійна та кутова швидкість переміщення струменя по відслоненню вибою

Експериментально процес гідромоніторного руйнування високоякісних пухкоп’язаних мартитових руд вивчався в умовах горизонтів 950–1240 м шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суша Балка», і шахти «Криворізька» АТ «Криворізький залізорудний комбінат» [7]. Між межею міцності руд на одновісне стискання та їх пористістю встановлена залежність

$$[\sigma_{cm}] = [\sigma_{cm}^o] \cdot (1 - \eta) \cdot e^{-\eta}, \text{ М} \quad (1)$$

де $[\sigma_{cm}^o] = 180\text{--}230$ 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_n), на якому осьовий динамічний тиск (P_M) дорівнює осьовому тиску води на

вильоті зі струменеформуєної насадки (P_o). Довжину початкової ділянки струменя (L_n) можна визначити експериментально або розрахувати за виразом

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

де d_o – діаметр вихідного отвору струменеформуєної 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, $\text{м}^2/\text{с}$; v_o – початкова швидкість вильоту струменя з насадки, $\text{м}/\text{с}$

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

де P_o – осьовий тиск струменя на вильоті зі струменеформуєної 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 осьового динамічного тиску (P_M) за межами ділянки L_n у загальному випадку визначається зі співвідношення

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

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

$$L_p \leq 6L_n, \text{ м} \quad (6)$$

Так як у процесі гідромоніторної дезінтеграції (збільшення виробленого простору) осьовий динамічний тиск (P_M) за межами початкової ділянки струменя (L_n) 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

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

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

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

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

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

або

$$[P_o] \approx [\sigma_{cm}], \text{ МПа} \quad (10)$$

Таким чином, тиск струменя на виході з насадки гідромонітора повинен бути не менше межі міцності мартизової 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 ($[L_p]$).

З виразів (8) і (9) маємо

$$[L_p] = \frac{P_o \cdot L_o}{0,15[\sigma_{cm}]}, \text{ м} \quad (11)$$

Ступінь дезінтеграції (d_i) і продуктивність руйнування руди Π , залежать від швидкості переміщення водяного струменя (v_c) 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_c) води в щільному осьовому ядрі струменя становить

$$v_c = 2\pi \cdot L_p \cdot \omega_c, \text{ м}/\text{с} \quad (12)$$

де ω_c – кутова швидкість обертання струменя навколо осі ставу свердловинного гідромонітора, об/хв.

Час контакту обертового струменя з

масивом (t_k) відповідає співвідношенню

$$t_k = \frac{D_c}{V_c}, \text{ с} \quad (13)$$

де D_c – середній діаметр руйнуючого струменя, що рухається по відслоненню вибою, м

$$D_c = 10d_o, \quad (14)$$

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

$$I_M = \frac{P_M \cdot 5d_o}{L_p \cdot \pi \cdot \omega_c}, \text{ Н/с} \quad (15)$$

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 (15) буде мати вигляд

$$I_M = \frac{K}{L_p^2 \cdot \omega_c}, \text{ Н/с} \quad (16)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує типорозмір гідромонітора

$$K = 1,59P_o \cdot L_n \cdot d_o \quad (17)$$

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 (15) видно, що керованим параметром, який забезпечує заданий режим дезінтеграції рудного масиву свердловинними гідромоніторами, за умов контрольованої початкової ділянки струменя (L_n), є кутова швидкість обертання (ω_c).

З огляду на те, що для кожного типорозміру гідромонітора параметри P_o , L_n , d_o мають конкретні значення та враховуючи те, що заданий фракційний склад контролюється постійною величиною $[I_M]$, вираз (16) перетвориться до виду

$$L_p^2 \cdot \omega_c = \frac{K}{[I_M]} = [W] \approx \text{const} \quad (18)$$

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

$$[W] = \frac{P_o \cdot L_n \cdot d_o}{[I_M]} \quad (19)$$

Продуктивність гідромонітора становить

$$P = q \cdot Q_o, \text{ т/год} \quad (20)$$

де q – питома продуктивність гідродезінтеграції, т/м³.

Для насосу з робочими параметрами: подача води – $Q_o = 41$ м³/год; напір води – $P_o = 7-8$ МПа; потужність електродвигуна – $N_{ед.} = 45$ кВт; діаметр насадки гідромонітора – $d_o = 15$ мм; гідромоніторний агрегат НКР-100МПА (швидкість обертання насадки – $n = 0-80$ об/хв., довжина вертикальної свердловини – $H_{св} = 5$ м) – визначені, за наведеними вище виразами, основні параметри свердловинної гідротехнології, що зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри свердловинної гідротехнології

Q_o , м ³ /год	P_o , МПа	d_o , мм	L_n , м	$[L_p]$, м	$[P_M]$, МПа	d_p , мм	P , т/год.
41	7	15	0,4	1,5	1,5	< 30	50

Для згущення пульпи прийнято гідроциклон ГЦ-15 з параметрами: продуктивність – 70 м³/год; ступінь згущення – 80%. Згущена рудна маса розміщується у виробці скреперування поблизу гідровидобувної ніші. Дренована вода, що становить 10% від маси гідросуміші, по виробці скреперування стікає у гідроприймальну свердловину, яка пробурена на транспортний горизонт. Відділена в гідроциклоні частина технологічної води з домішками глинистих і пилових часток (1–2% від зруйнованої маси) по дільничному трубопроводу подається у відстійник-накопичувач, що розташований у виробці поблизу насосного агрегату.

Обговорення результатів.

У ході проведених досліджень було встановлено, що механізм гідродезінтеграції рудного масиву обумовлений одночасним проявом різних сил і залежить від властивостей порід, умов течії та параметрів впливу струменя. Всі існуючі методи розрахунку параметрів свердловинної гідротехнології засновані на емпіричних залежностях, що отримані для гірничо-геологічних умов конкретних родовищ. Водночас інтегральним критерієм руйнування для скельних, напівскельних і в'язких порід є межа міцності руди на однісіне стиснення.

У процесі взаємодії струменя з рудним масивом, що руйнується, виникають і розвиваються багаторівневі складнодиференційовані поля додаткових напружень. Ці поля викликані нормальною і дотичною складовими сили удару та розтікання струменя, а також безперервною зміною геометрії поверхні контакту. Вони обумовлюють, залежно від способу застосування струменя, кінетику процесу гідродезінтеграції з утворенням на першому етапі врубової виїмки або «лійки» чи «борозни», і на другому етапі власне порожнини. Тому величина та розподіл навантажень у привибійному шарі рудного масиву повинні оптимально поєднуватися зі швидкістю деформування та тривалістю навантаження задля мінімізації втрат енергії руйнування.

У процесі гідравлічного впливу в рудному масиві автоматично забезпечується можливість розвитку систем існуючих тріщин, а також утворення нових вхідних

тріщин у місцях виходу на поверхню відслонення масиву міжзернових контактів – міжфазної межі або дефектів міжзернових поверхонь. Під дією тиску потік рідини спрямовується до вершини тріщини, викликаючи їхнє зростання. Але у зв'язку з тим, що перебіг рідини у вузькій тріщині пов'язаний з помітними гідравлічними та тепловими втратами, тиск її в іншій частині тріщин швидко зменшується і стає недостатнім для розриву. Проте цей тиск продовжує відігравати роль важеля або клину, збільшуючи концентрацію розтягуючих напружень у вершині тріщини. Цей ефект має значення для подовження тріщин на наступному акті впливу струменя. Водночас в масиві руди виникають додаткові напруження, під дією яких відбувається впорядковане руйнування у вигляді кусків руди, агрегатів зерен і власне зерен мінералів. Зерна та агрегати зерен формуються в тонкому шарі у поверхні відслонень внаслідок руйнування, тобто розмиву міжзернових контактів. Водночас кускова частина формується на деякій відстані від відслонення вибою вглиб масиву, в результаті відриву за тріщинами. Тому в процесі гідромоніторної дезінтеграції в рудному шарі, поблизу поверхні відслонення рудного масиву, створювані напруження повинні бути високоградієнтними, що досягають максимуму в зоні поверхонь розділу мінеральних фаз. Так як міжзернові поверхні – це області природної концентрації внутрішніх напружень середовища, що забезпечують більш селективне розкриття мінеральних фаз внаслідок міжкристалічного характеру руйнування. Таким чином напірна гідродезінтеграція рудного масиву може замінити всю технологічну лінію подрібнення рудного матеріалу, від стадії підготовки до збагачення, із забезпеченням високих показників економічної ефективності. Водночас організація процесу гідродезінтеграції має забезпечити негайне виведення готового продукту з робочої зони.

З викладеної схеми механізму дезінтеграції можна стверджувати, що гідроруйнування, в скельних масивах високопористих мартизових руд обертовими водяними струменями, буде відбуватися шляхом розвитку й об'єднання систем тріщин під дією розтягуючих напружень і розклинюючої дії води. Глибина розвитку руйнівних напружень буде пропорційна

тиску води, а час їх існування залежить від тривалості впливу струменя. Водночас механізм руйнування може характеризуватись такими гірничо-технологічними властивостями, в яких проявляється характер структурних зв'язків, що зумовлює опір породи впливу напірного струменя. Це кристалізаційні, переважно ковалентні зв'язки.

Висновки.

1. Установлено, що процес свердловинної гідромоніторної дезінтеграції мартитових руд і виведення із зони продуктів руйнування є комбінованим процесом рудопідготовки, що включає збагачувальні операції подрібнення та класифікацію продуктів руйнування за гранулометричним складом у ході їх розмиву. Водночас відбувається селективне розкриття рудоутворюючих мінералів, що покращують якість руди на 0,5–1,5% порівняно з природним, зниження масової частки кремнезему від 2,0–1,2 до 0,5–0,3%, що забезпечує отримання залізородної сировини найвищої якості – суперконцентратів із вмістом заліза 69,0–69,5%. 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.

2. На підставі шахтних експериментів встановлено, що розробку маломіцних нестійких багатих мартитових руд, можливо здійснювати свердловинними гідромоніторами, утворюючи висхідні вертикальні чи похилі квазіциліндричні порожнини висотою до 40 м і діаметром до 6 м, за умов початкового тиску в насадці гідромонітора від 2 до 5 МПа. Водночас високопористі мартитові руди, з масовим вмістом заліза в масиві більше 66%, починають руйнуватися за умов динамічного тиску водяних струменів на контакті з рудним масивом в межах 0,4–0,7 МПа та ефективно руйнуються, коли тиск перевищує 1,0 МПа.

3. Установлено, що критерієм дезінтеграції пухкопов'язаних мартитових руд є динамічний осьовий тиск водяного струменя, що становить 0,1 від межі міцності руди на одновісне стиснення, якщо

руйнування відбувається уздовж рудних шарів і 0,2 – за умов руйнування впоперек рудних шарів. Водночас продуктивність руйнування збільшується в 2,5–3,0 рази за умови напрямку струменя води вздовж шаруватості, або паралельно площині основної тріщинуватості мартитової руди.

4. Уперше встановлені залежності між структурно-морфологічними характеристиками та тріщинуватістю мартитових руд (пористістю, співвідношенням зернового складу руди, межею міцності на одновісне стиснення та кусковатістю) і параметрами гідромоніторного впливу (тиском води, початковим діаметром струменя та швидкістю його переміщення по відслоненню вибою), що дають можливість визначити оптимальні технологічні параметри продуктів гідродезінтеграції. Водночас управління гранулометричним складом продуктів гідродезінтеграції досягається завдяки регулюванню початковим тиском води на виході з гідромоніторної насадки, швидкістю переміщення струменя по відслоненню вибою й орієнтацією його щодо елементів залягання та текстури руд. Так за умов різних способів і режимів гідродезінтеграції вихід фракції руди розміром 1,0 мм змінюється від 70 до 95%, фракції – 0,5 мм – від 50 до 70%, фракції – 0,25 мм – від 30 до 50%.

5. Розроблено принципово новий метод селективної дезінтеграції пухкопов'язаних мартитових руд по міжфазних межах мінеральних зерен та їх агрегатів, шляхом гідравлічного гідромоніторного впливу на їхню структуру, завдяки розмиву масиву водяним струменем, що проникає під тиском у тріщини та пори. Свердловинна гідродезінтеграція забезпечує 100% рівень розкриття зерен рудних мінералів крупністю нижче 0,25 мм, що на 30–50% вище, ніж за умов механічного подрібнення. Водночас вихід шламової (незбагачуваної) фракції руди, що руйнується, знижується в 2–4 рази.

6. Свердловинну гідротехнологію можливо використовувати у промислових масштабах для розробки покладів багатих залізних руд нижче середньої міцності, що дасть можливість зменшити негативне навантаження на екосистему, знизити загальні витрати на видобуток, підвищити продуктивність праці та здійснювати збагачення корисної копалини безпосередньо

на місці видобутку, не створюючи відвалів супутніх гірських порід на земній поверхні.

Список літаератури

1. Ляденко Т.В. Особливості виробничо-збутової діяльності вітчизняних залізрудних підприємств на сучасному етапі їх розвитку. *Ефективна економіка*. 2019. №4. С. 1–8. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.34>
2. Khomenko O., & Kononenko M. Geo-energetics of Ukrainian crystalline shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. №3. Pp. 12–21. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/3>
3. Kosenko A.V. Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №1. Pp. 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
4. Василенко А.П. Мінерально-сировинна база України стаття 2. Стан мінерально-сировинної бази металічних корисних копалин України та основні напрями геологорозвідувальних робіт. *Мінеральні ресурси України*. 2014. № 3. С. 3–7.
5. Глушко В.Т., Борисенко В.Г. *Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений*. М.: Недра, 1978. 253 с.
6. Тарасютін В.М., Косенко А.В. Обґрунтування ресурсозберігаючих технологічних процесів при підземному видобутку різносортих залізних руд Кривбасу. *Вісник КНУ*. 2018. №46. С. 152–159.
7. Tarasyutin V.M. Geotechnology features of high quality marlite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. №1. Pp. 54–60.
8. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining Of Mineral Deposits*. 2019. №13(3). Pp. 22–30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
9. Khomenko O., Kononenko M., Myronova I., Savchenko M. Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*. 2019. №123. P. 01039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
10. Kononenko M., Khomenko O. New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. №15(2). Pp.111–123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
11. Кононенко М.М., Хоменко О.Є., Коробка Є.О. Параметри буропідричних робіт для проведення гірничих виробок. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*. 2021. №23. С. 54–71. <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.004>
12. Кононенко М.М., Хоменко О.Є., Косенко А.В. Чисельне моделювання лінії найменшо-го опору при підриванні зарядів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2022. №69. С. 43–57. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.043>
13. 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»*. 2018. №56. P. 01025 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185601025>
14. Franco-Medrano, F. 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*. 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2521.8081>
15. Fermin Franco-Medrano, Yasuhide Fukumoto. Analytical model for the dynamics of an atomizing liquid jet. *Conference: XIV Japan Society of Fluid Mechanics Western Branch Conferenc*. 2015. Pp. 1–4. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3180.4326>
16. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol.28. №3. Pp. 607–617. <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0305.023>
17. Fermín Franco Medrano, Yasuhide Fukumoto, Clara Marika Velte, Azur Hodžić. Mass entrainment rate of an ideal momentum turbulent round jet. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2017. №86(3). Pp. 034401.1–034401.10. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.034401>
18. Effect of process parameters of Plain Water Jet on the cleaning quality, surface and material integrity of Inconel 718 milled by Abrasive Water Jet. / Cano-Salinas, L., Sourd, X., Moussaoui, K. and etc.// *Tribology International*, 2023. №86(3). P. 108094. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108094>
19. Ковбик М.К. Визначення виходу фракційного матеріалу при руйнуванні мартизових руд струменями води в залежності від напрямку їх зрізання. *Збірник наукових праць НГУ*. 2022. №69-03 С. 35–42. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.035>
20. Маланчук З.Р., Боблях С.Р. Дослідження процесу розмиву зернистих фосфоритів гідромоніторним струменем. *Вісник КТУ*. 2007. №16. С. 33–38.
21. Стець С.Е. Експериментальне дослідження процесу гідророзмиву цеоліт-сметкитових туфів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2006. № 4(36), Ч.1. 2006. С.365–370.
22. Numerical investigation of the flow field inside and outside high-pressure abrasive waterjet nozzle / Baisheng N., Hui W., Lei L. and etc.// *Procedia Engineering*. 2011. №26. Pp. 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2138>
23. Турик В. М., Кочін В.О. Пасивні методи керування когерентними вихровими структурами у вихрових камерах. Частина 1. Спектральні оцінки ефективності. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2015. №6(104). С. 54–65.
24. Тарасютін В.М., Гирин В.С., Монастырський Ю.А. Экспериментальные исследования процессов скважинной гидротехнологии в шахтных условиях. *Разработка рудных месторождений*. 1998. №.63. С. 16–20.

References

1. Lyadenko, T.V. (2019). Osoblyvosti vyrobnycho-zbutovoyi diyal'nosti vitchyznyanykh zalizorudnykh pidpnyemstv na suchasnomu etapi yikh rozvytku. *Efektivna ekonomika*, (4), 1–8. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.34>
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. Kosenko, A.V. (2021). Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining.

- Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, №(1), 19–25.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
4. Vasylenko A.P. (2014). Mineral'no-syrovynna baza Ukrayiny statya 2. Stan mineral'no-syrovynnoyi bazy metalichnykh korysnykh kopalyn Ukrayiny ta osnovni napryamy heolohorozvidoval'nykh robit. *Mineral'ni resursy Ukrayiny*, 2014. № (3), 3–7. (in Ukrainian)
 5. Glushko, V.T. & Borisenko, V.G. (1978). *Inzhenerno-geologicheskiye osobennosti zhelezorudnykh mestorozhdeniy*. M.: Nedra, 253. (in Russian)
 6. Tarasyutin, V.M. & Kosenko, A.V. (2018). Obgruntuvannya resursozberihayuchykh tekhnolohichnykh protsesiv pry pidzemnomu vydobutku riznosortnykh zaliznykh rud Kryvbasu. *Visnyk KNU*, (46), 152–159. (in Ukrainian)
 7. Tarasyutin, V.M. (2015). Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 54–60.
 8. Kononenko, M., Khomenko, O., Savchenko, M. & Kovalenko, I. (2019). Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining Of Mineral Deposits*, 13(3), 22–30.
<https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
 9. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I. & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, (123), 01039.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
 10. 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>
 11. Kononenko, M.M., Khomenko, O.YE. & Korobka YE.O. (2021). Parametry burypidryvnykh robit dlya provedennya hirnychykh vyrobok. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (23), 54–71. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.004>
 12. Kononenko, M.M., Khomenko, O.YE. & Kosenko A.V. (2022). Chysel'ne modelyuvannya liniyi naymensho-ho oporu pry pidryvanni zaryadiv. *Zbirnyk naukovykh prats' NHU*, (69), 43–57. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.043>
 13. 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>
 14. Franco-Medrano, F. (2015). Numerical scheme model for the dynamics of a high-speed atomizing liquidjet. In Conference: Mathematics bridge over the Pacific for competitive edge in industry.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2521.8081>
 15. 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>
 16. Liu, S., Liu X., Chen, J. & Lin, M. (2015). Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(3), 607–617.
<https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0305.023>
 17. Fermín 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>
 18. 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>
 19. Kovbyk, M.K. (2022). Vyznachennya vykhodu fraktsiynoho materialu pry ruynuvanni martyvovykh rud strumenyamy vody v zalezhnosti vid napryamu yikh zrizannya. *Zbirnyk naukovykh prats' NHU*, 69-03, 35–42. (in Ukrainian)
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.035>
 20. Malanchuk, Z.R. & Boblyakh, S.R. (2007). Doslidzhennya protsessu rozmyvu zernistykh fosforytiv hidromonitornym strumenem. *Visnyk KTU*, (16), 33–38. (in Ukrainian)
 21. Stets', S.E. (2006). Eksperymental'ne doslidzhennya protsesu hidrorozmyvu tseolit-smektyvovykh tufiv. *Visnyk Natsional'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya*. 4(36), CH.1, 365–370. (in Ukrainian)
 22. Nie, Baisheng, Wang, Hui, Li, Lei, Zhang, Jufeng, Yang, Hua, Liu, Zhen, Wang, Longkang & Li, Hailong. (2011). Numerical investigation of the flow field inside and outside high-pressure abrasive waterjet nozzle. *Procedia Engineering*, (26), 48–55.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2138>
 23. Turyk, V.M. & Kochin, V.O. (2015). Pasyvni metody keruvannya koherentnykh vykhrovymy strukturamy u vykhrovnykh kamerakh. Chastyna 1. Spektral'ni otsinky efektyvnosti. *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 6(104), 54–65. (in Ukrainian)
 24. Tarasyutin, V.M., Girin, V.S. & Monastyrskiy YU.A. (1998). Eksperimental'nyye issledovaniya protsessov skvazhinnoy gidrotekhnologii v shakhtnykh usloviyakh. *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*, (63), 16–20. (in Russian)

Надійшла до редакції 13.04.2023

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Р. О. Дичковський

Тарасютін Віктор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин Криворізького національного університету (вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна)
E-mail: viktortarasutin@gmail.com

Косенко Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву, Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (вул. Сімферопольська, 15, 49600, м. Дніпро, Україна)

E-mail: andreyvladimirovich@email.ua

Хоменко Олег Євгенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (просп. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро, Україна)

E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

Кононенко Максим Миколайович – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів (просп. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро, Україна)

E-mail: kmn211179@gmail.com

EXPERIMENTAL RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF BOREHOLE HYDROMONITOR DISINTEGRATION OF RICH IRON ORE IN PLACE

Purpose. Study and development of a rational methodology for calculating the parameters of the process of downhole hydrodisintegration of martite ore massifs by pressure rotating water jets.

Methods. Mine experimental-methodical and experimental-experimental works on: stage-by-stage study of the engineering and geological situation of ore deposits and selection of experimental sites; development of technological schemes for the hydrodisintegration of the ore in place and the creation of appropriate experimental equipment; selection of means for providing hydro-extracting operations; the choice of methods for monitoring and measuring the parameters of the hydrodisintegration process; generalization and analysis of the results of experiments and development of recommendations for the creation of technology and equipment, taking into account the achieved indicators.

Results. A technique for calculating the parameters of hydrodisintegration of rich martite ores in places has been developed based on the study of the features of the formation of rotating compact water jets by borehole hydromonitors.

Scientific novelty. Relationships between the structural and morphological characteristics and jointing of martite ores (porosity, the ratio of the grain composition of the ore, the ultimate uniaxial compression strength of ore and lumpiness) and the parameters of the hydromonitoring effect (water pressure, the initial diameter of the jet and the speed of its movement along the exposure of the face), which make it possible to determine rational technological parameters of hydrodisintegration products.

Practical implication. Borehole hydromonitor disintegration of martite ores in place is a combined ore preparation process, including enrichment grinding operations and classification of destruction products according to their granulometric composition during their erosion. At the same time, there is a selective opening of ore-forming minerals that improve the quality of the ore by 0.5–1.5% compared to natural, a decrease in the mass fraction of silica from 2.0–1.2 to 0.5–0.3%, which ensures the production of iron ore raw materials of the highest quality - superconcentrates with an iron content of 69.0–69.5%. Control of the granulometric composition of hydrodisintegration products is achieved by adjusting the initial water pressure at the outlet of the jet nozzle, the speed 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: martite; ore; hydrotechnology; nozzle; hydrodisintegration; enrichment; masterbatch

Tarasyutin Viktor – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University (Vitaly Matusevich str, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine)

E-mail: viktortarasyutin@gmail.com

Kosenko Andrii – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior researcher of Department of Rock Mass Condition Control, Department of Physics of the Mining Processes of Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (Simferopolskaya st., 15, 49600, Dnipro, Ukraine)

E-mail: andreyvladimirovich@email.ua

Khomenko Oleh – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Mining Engineering and Education Department, Dnipro University of Technology (Dmitry Yavornitsky Ave., 19, 49005, Dnipro, Ukraine)

E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

Kononenko Maksym – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Transport systems and energy-mechanical complexes Department, Dnipro University of Technology (Dmitry Yavornitsky Ave., 19, 49005, Dnipro, Ukraine)

E-mail: kmn211179@gmail.com