

УДК 622.023.2:622.232.5:622.341.1:622.272

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-149-160>**Гарасютін В.М., Косенко А.В., Хоменко О.Є., Кононенко М.М.**

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДЕЗІНТЕГРАЦІЇ МАРТИТОВИХ ЗАЛІЗНИХ РУД ОБЕРТОВИМИ СТРУМЕНЯМИ ВОДИ

**Мета.** Отримання основних вихідних експериментальних даних, для встановлення комплексу розрахункових залежностей визначення параметрів процесу свердловинної гідродезінтеграції масивів багатих мартитових руд, задля подальшого проектування промислової шахтної ділянки свердловинного гідровидобутку та виробничого комплексу очисних робіт.

**Методи дослідження.** Випробування експериментальної гідромоніторної установки й обладнання, для здійснення технологічного процесу гідродезінтеграції багатих мартитових руд через експлуатаційні свердловини діаметром 105 мм. Уточнення критерію гідродезінтеграції багатих мартитових руд напірними гідромоніторними струменями середнього діаметра, в умовах природного залягання рудного масиву. Визначення впливу напору робочого діаметра струменя та швидкості його переміщення по відслоненню вибою на дальність і продуктивність гідродезінтеграції. Визначення впливу геолого-структурних характеристик рудного масиву на параметри процесу гідродезінтеграції. Встановлення раціональних режимів впливу на рудний масив гідромоніторного обертового струменя, для отримання заданого гранулометричного складу рудної маси.

**Результати.** Доведено принципову можливість гідродезінтеграції через свердловини, обертовими струменями води, масивів багатих мартитових руд з вмістом заліза більше 65%, пористістю більше 20% і межею міцності на одновісне стиснення менше 20 МПа. Встановлено, що гідродезінтеграція масивів мартитових руд починається з проникнення напірної води в тріщини на глибину 0,10–0,15 м. Водночас збільшення тиску в гідромоніторній насадці підвищує продуктивність гідромонітору, а використання двох гідромоніторних обертових насадок сприяє підвищенню продуктивності гідромонітору в 2,0–2,7 рази. Процес гідродезінтеграції супроводжується підвищенням масової частки заліза в руді від 67,2 до 68,2%, завдяки виносу з гідросуміші безрудних частинок і шламів. Гідродезінтеграція забезпечує високу ступінь розкриття рудних мінералів, на 40–60% вище ніж у процесі механічного подрібнення в шаровому млині.

**Наукова новизна.** Встановлено залежності зміни продуктивності гідромонітору та питомих витрат води від тиску води в гідромоніторній насадці. Отримано залежність зміни відсоткового вмісту заліза в продуктах дезінтеграції мартитової руди від класу їх крупності.

**Практична значимість.** Застосування свердловинної гідромоніторної дезінтеграції покладів багатих мартитових руд, у процесі їх підземної розробки, забезпечує підвищення (вище природної) якості видобутої рудної сировини та здійснення її збагачення безпосередньо на місці видобування.

**Ключові слова:** багаті залізні руди, суперконцентрати, свердловинна гідротехнологія, збагачення рудної маси, гідродезінтеграція.

**Вступ.** Розвиток залізорудної галузі України має для країни стратегічне значення [1]. Цей факт обумовлений тим, що залізорудна галузь є важливою складовою національного гірничо-металургійного комплексу [2]. Обсяги її виробництва, до моменту повномасштабного вторгнення російських військ на територію України, сягали 12 % ВВП країни [3]. За обсягами запасів залізних руд Україна є одним зі світових лідерів, в надрах якої сконцентровано 11,14 % світових запасів [4]. Надра країни містять 80 крупних залізорудних родовищ і перспективних рудних проявів. Запаси 52-х з них мають промислове значення й узяті на державний баланс [5]. Основні запаси залізних руд і потужності добувних підприємств розташовані у великих залізорудних басейнах [6]: Криворізькому (72 % запасів), Кременчуцькому (16 %), Білозерському (10 %) та Приазовському (2 %). Отже найбільшим гірничодобувним регіоном в Україні є Криворізький залізорудний басейн. Водночас у надрах Кривбасу сконцентрована величезна кількість запасів (1,6 млрд т) багатих залізних руд з вмістом заліза 46–67 % [7], що розробляються підземним способом підприємствами АТ «Криворізький залізорудний комбінат», ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та ПрАТ

«Євраз Суха Балка» [8]. Близько 70 % запасів покладів багатих залізних руд Кривбасу становлять мартитові руди [9]. З них до 40 % запасів дуже пористі (пористість знаходиться в межах 20–38 %) маломіцні (межа міцності на одновісне стиснення знаходиться в межах 0,08–40 МПа) різновиди з вмістом заліза 65–69% [10].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У зв'язку зі збільшенням глибини гірничих робіт до 1100–1400 м на залізородних шахтах [11], видобуток багатих залізних руд у Кривбасі різко ускладнюється [12], а техніко-економічні показники постійно погіршуються [13]. Це пов'язано зі значними втратами (до 25%) вже підготовлених до очисної виїмки рудних запасів очисних панелей і зниженням якості видобутої рудної сировини до 53–57 % [14].

Споживачами залізородної сировини (руд і рудних концентратів) є доменне, електросталеплавильне, феритове, акумуляторне виробництво, порошкова металургія, виробництво феритів та лакофарбова промисловість [15]. Промислова цінність залізородної сировини визначається вмістом заліза, співвідношенням і хімічним складом рудних та нерудних мінералів, гранулометричним складом, фізичними властивостями та витратами на збагачення [16].

Доменне виробництво є основним споживачем багатих окислених руд підземного Кривбасу [17] та висуває до них порівняно прості, традиційно постійні вимоги щодо вмісту заліза, фосфору, сірки, нерозчинного залишку та гранулометричного складу [18]. Однак сьогодні, у зв'язку з економіко-екологічними умовами функціонування гірничо-металургійних комплексів, вимоги до доменного сировини постійно підвищуються [19]. Адже збільшення вмісту заліза в шихті доменного виробництва на 1 % знижує витрати коксу на 1,5 % і підвищує продуктивність доменних печей на 2,2 % [20].

Поряд з традиційним доменним виробництвом, у провідних промислових країнах світу, інтенсивно розвиваються прогресивні технології якісної металургії для отримання бездоменних сталей, залістистих порошків, виробництва магнітотвердих і магнітом'яких феритів, акумуляторних мас, що засновані на відновленні заліза з порошкоподібних оксидів заліза [21]. В якості вихідного продукту, для даного виду металургії, все більше використовуються високоякісні залізородні концентрати та суперконцентрати, з гранично високими хіміко-технологічними параметрами [22]. Так сировина для найбільш великотоннажного електросталеплавильного виробництва повинна мати вміст заліза вище 67% і кремнезему нижче 3% [23].

Тому одним із основних шляхів сталого розвитку гірничо-металургійного комплексу країни є подальше перетворення техніки та технології очисних робіт у складних інженерно-геологічних умовах. Водночас 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 дозволяє здійснювати процес збагачення рудної маси безпосередньо на місцях ведення очисних робіт.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є отримання основних вихідних експериментальних даних, для встановлення комплексу розрахункових залежностей визначення параметрів процесу свердловинної гідродезінтеграції масивів багатих мартитових руд, задля подальшого проєктування промислової шахтної ділянки свердловинного гідровидобутку та виробничого технологічного комплексу видобувних робіт.

**Методика дослідження.** Загальна методика експериментальних досліджень включала: випробування експериментальної гідромоніторної установки й обладнання, для здійснення технологічного процесу гідродезінтеграції багатих мартитових руд через експлуатаційні свердловини діаметром 105 мм; уточнення критерію гідродезінтеграції багатих мартитових руд напірними гідромоніторними струменями середнього діаметра,

в умовах природного залягання рудного масиву; визначення впливу напору робочого діаметра струменя та швидкості його переміщення по відслоненню вибою на далекість і продуктивність гідродезінтеграції; визначення впливу геолого-структурних характеристик рудного масиву на параметри процесу гідродезінтеграції; встановлення раціональних режимів впливу на рудний масив гідромоніторного обертового струменя, для отримання заданого гранулометричного складу рудної маси.

**Виклад основного матеріалу й обговорення результатів.** У ході вибору місць проведення експериментальних робіт, були враховані результати дослідно-методичних досліджень з гідродезінтеграції мартитових руд переносною дослідно-методичною гідромоніторною установкою [24], а також результати мінерально-хімічного аналізу і визначень гірничо-технологічних властивостей багатих мартитових руд [10]. Необхідною умовою була можливість підведення енергоносіїв і розміщення експериментального обладнання в гірничих виробках.

На шахті «Ювілейна» ПрАТ «Євраз Суха Балка» експериментальні дослідження, з дезінтеграції високоякісних залізних руд гідромоніторними струменями середнього діаметра ( $d_o=10$  мм) через свердловини, проводилися в орті-заїзді 59 осі гор. 940 м покладу «Шурфів 42–46», відповідно до затвердженого головним інженером шахти регламенту. Рудний поклад має плаstopодібну форму з потужністю до 32 м і кутом падіння 55–57°. Центральна його частина представлена в основному багатими мартитовими рудами: пористими, розсланцьованими, тріщинуватими, низької стійкості. Вибій орту-заїзду розташований в масиві високоякісної мартитової руди з вмістом заліза вище 65%. Середнє значення межі міцності на одновісне стиснення, як і в дослідно-методичних роботах, складало 1,62 МПа. В орті-заїзді були забезпечені всі необхідні умови для шахтних експериментів: лінії водо-, пневмо- та електромагістралей; водостічна канавка; під'їзд залізничного транспорту; належні умови техніки безпеки.

Сортовий склад та якісна характеристика, в межах попередньо оконтуреної зони багатой частини покладу «Шурфів 42–46», проводилося на підставі геологічного випробування, що включає відбір кернів руди, їх хімічний аналіз і  $\gamma$ -каротаж по свердловинам.

Свердловини довжиною 5–10 м бурилися верстатом НКР-100МПа за заданою схемою. У боковій стінці орту-заїзду під кутом 45° пробурювалась технологічна свердловина (Т), паралельно їй зверху на відстані 0,3–0,4 м, було пробурено спостережну (С) і знизу – дренажно-спостережну (ДС) свердловини. Для проведення дослідних робіт з гідродезінтеграції було використано обладнання, що подано в роботі [15].

Керни відбиралися спеціальним керновідбірником, з довжиною інтервалу випробування 0,5 м. Незважаючи на всі спроби отримати, з рудних інтервалів, керни непорушеної структури не вдалося.

Вода з шахтної магістралі через рукав високого тиску довжиною 6 м підводилася до бурового верстата і по ставу бурових штанг до гідромоніторної насадки.

Тиск води в гідромоніторній насадці встановлювався за показником манометра, з робочою шкалою 0,2–5,0 МПа. Дезінтеграція рудного масиву свердловинним гідромонітором здійснювалося в процесі зворотно-поступального і обертального переміщення струменя води вздовж і навколо осі свердловини, в діапазоні довжини ходу штанги 0,4 м, з керованою швидкістю обертання до мітки, що встановлена на ставі штанг і за допомогою секундоміра.

Гідросуміш в процесі експериментальних досліджень відводилася з очисного простору через зазор між стінками видобувної свердловини та ставом бурових штанг, гирловий пульпопровід і гнучкий рукав в мірну ємність об'ємом 0,053 м<sup>3</sup> і на спеціально обгороджену стінками з дошок та ізолювану поліетиленовою плівкою карту-наміву продуктів гідродезінтеграції. В процесі гідродезінтеграції фіксували час наповнення

ємності гідросумішшю, тиск води в гідромоніторі, кількість твердої фази та води в ємності після її наповнення.

Основні параметри процесу гідродезінтеграції – продуктивність по гідросуміші та твердій фракції, щільність пульпи, за умови заданих витрат і тиску рідини, визначалися за допомогою періодичного забору продуктів руйнування в мірну ємність.

Проби продуктів гідродезінтеграції відправлялися в лабораторію для аналізу вмісту заліза та оксиду кварцу, а також відсоткового складу за фракціями. Водночас було проведено механічне подрібнення проб мартитової руди для порівняння з фракційним складом рудного матеріалу, що утворився у процесі дезінтеграції.

Хімічний аналіз проб було проведено в лабораторії Криворізької геологорозвідувальної експедиції, а  $\gamma\gamma$ -каротаж – у всіх експериментальних свердловинах приладом РСР-3 за стандартною методикою через 0,5 м. Результати хімічних аналізів і радіометричних вимірювань подано в табл. 1.

**Таблиця 1** – Результати хімічних аналізів і радіометричних вимірювань

Інтервал вимірювань, м	$\gamma\gamma$ -каротаж, Fe, %			Хімічний аналіз	
	свердловина				
	<i>C</i>	<i>ДС</i>	<i>T</i>	<i>T</i>	
	<i>Fe, %</i>	<i>Fe, %</i>	<i>Fe, %</i>	<i>Fe, %</i>	<i>SiO<sub>2</sub>, %</i>
0,0–1,0	67,7	67,8	67,8	68,0	1,4
1,0–1,5	67,8	67,8	67,8	68,1	1,3
1,5–2,0	67,8	67,8	67,8	67,9	1,5
2,0–2,5	65,4	67,8	67,8	67,0	1,7
2,5–3,0	63,1	67,7	67,8	67,0	1,7
3,0–3,5	61,2	63,3	67,8	67,1	1,7
3,5–4,0	–	61,4	65,0	65,3	1,9
4,0–4,5	–	–	61,1	–	–
4,5–5,0	–	–	51,6	–	–

З табл. 1 видно, що в зоні експериментальних досліджень масив мартитових руд однорідний за змістом заліза і кварцу. Водночас мартитова руда з масовим вмістом загального заліза понад 67% і кремнезему 1,6% являє собою пухку масу, що представлена в основному зернами й агрегатами мартита з включеннями зерен кварцу (рис. 1). Таким чином якісний мінеральний склад видобутих мартитових руд, з вмістом заліза 65,3–68,1% і кремнезему 1,3–1,9%, на 2–3% перевищує якість концентратів гірничо-збагачувальних комбінатів, що дозволяє розглядати їх як високосортні залізні концентрати, які придатні для бездоменної металургії.

Визначення водно-фізичних властивостей на пробах зруйнованої руди були проведені в лабораторних умовах (відстоювання води, водовіддача і водопроникності, фільтрація). Встановлено, що в перші хвилини в осад, з приготовленої пульпи, випадає з високою швидкістю до 98% руди. Водночас питома водовіддача складає 145–147 л/м<sup>3</sup>, а коефіцієнт фільтрації зруйнованої рудної маси – 1,85 см/год, що класифікує її як слабопроникну.

Експерименти зі свердловинної гідродезінтеграції руди проводилися в технологічній свердловині (*T*) в діапазоні 3,5–0,5 м від гирла. Результати експериментальних вимірювань і розрахунків параметрів процесу гідродезінтеграції

багатих маритових руд, за умов тиску води  $P_o=1,0; 1,2; 1,4$  МПа в насадці діаметром 10 мм, подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри процесу гідродезінтеграції багатой маритової руди

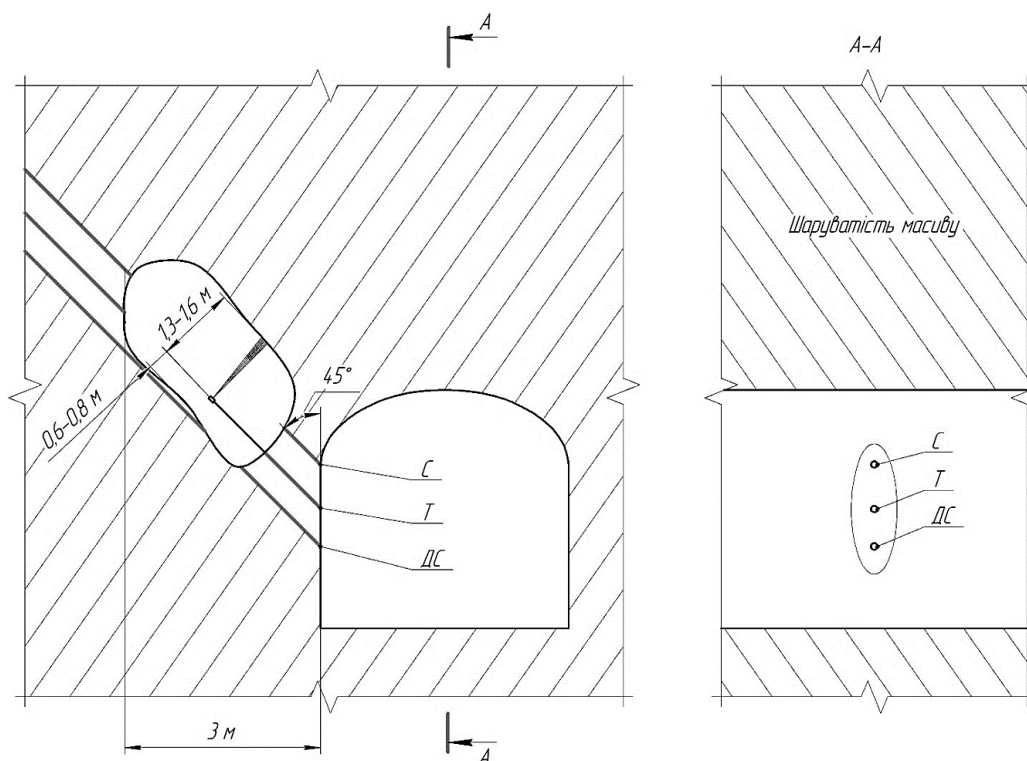
№ з/п	Час, $t, c$	Висота шару руди в контейнері, м		Витрати води, $Q_o,$ м <sup>3</sup> /год	Продуктивність		Питомі витрати води		Цільність пульпи $\rho_n \cdot 10^{-3},$ кг/м <sup>3</sup>
		$h_p$	$h_e$		по пульпі $P_n,$ м <sup>3</sup> /год	по твердій фракції $P_m,$ т/год	$q_{во},$ м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$q_v,$ м <sup>3</sup> /т	
$P_o= 1,0$ МПа									
1	54	0,030	0,200	11,87	14,01	7,07	6,67	2,02	1,35
2	57	0,030	0,200	11,87	13,9	6,63	6,67	2,02	1,33
3	53	0,034	0,196	11,87	14,04	7,15	5,76	1,75	1,36
4	57	0,032	0,192	11,87	13,9	6,69	6,19	1,88	1,33
5	52	0,033	0,197	11,87	14,09	7,31	5,97	1,81	1,36
Ср	55	0,032	0,197	11,87	13,99	6,97	6,25	1,9	1,35
$P_o= 1,2$ МПа									
6	56	0,031	0,199	11,87	13,94	6,84	6,42	1,55	1,34
7	57	0,029	0,201	11,87	13,90	6,69	6,93	2,03	1,33
8	50	0,037	0,197	11,87	14,16	7,57	5,22	1,58	1,37
9	55	0,035	0,195	11,87	13,96	6,91	5,57	2,09	1,34
10	52	0,032	0,198	11,87	14,11	6,91	6,19	1,88	1,3
Ср	54	0,033	0,198	11,87	14,14	6,99	6,07	1,83	1,34
$P_o= 1,4$ МПа									
11	30	0,054	0,176	14,04	17,89	12,72	3,26	0,99	1,5
12	34	0,050	0,180	14,04	17,48	11,36	3,6	1,09	1,45
13	35	0,053	0,177	14,04	17,31	10,78	3,34	1,06	1,43
14	34	0,052	0,178	14,04	17,54	11,56	3,42	1,04	1,46
15	29	0,051	0,179	14,04	18,06	13,25	3,51	1,01	1,51
Ср	32,4	0,052	0,178	14,04	17,66	11,93	3,43	1,04	1,47

Визначення радіуса ефективного руйнування масиву гідромоніторним агрегатом, коли тиск води 1,0–1,4 МПа, здійснювалося наступним чином. Оголовок гідромонітора розміщувався в свердловині на глибині 2,5 м і переміщувався до гирла свердловини з кроком 0,4 м до моменту різкого зниження концентрації твердої фракції в гідросуміші до 1,05 т/м<sup>3</sup>. Після чого порожнину на межі з контуром виробки розкривали ручним способом і проводилися вимірювання її геометричних розмірів (рис. 1). Встановлено, що радіус руйнування досягав 1,3–1,6 м (рис. 2), водночас загальний об'єм порожнини склав 3,5–4,0 м<sup>3</sup> (12–15 т). Необхідно зазначити відсутність у виробленому просторі негабаритних кусків руди ( $d_k < 20$  мм), дренажу води в підстилаючий масив через шар

зруйнованої руди, утвореної на підшві порожнини і погане його руйнування струменем води.

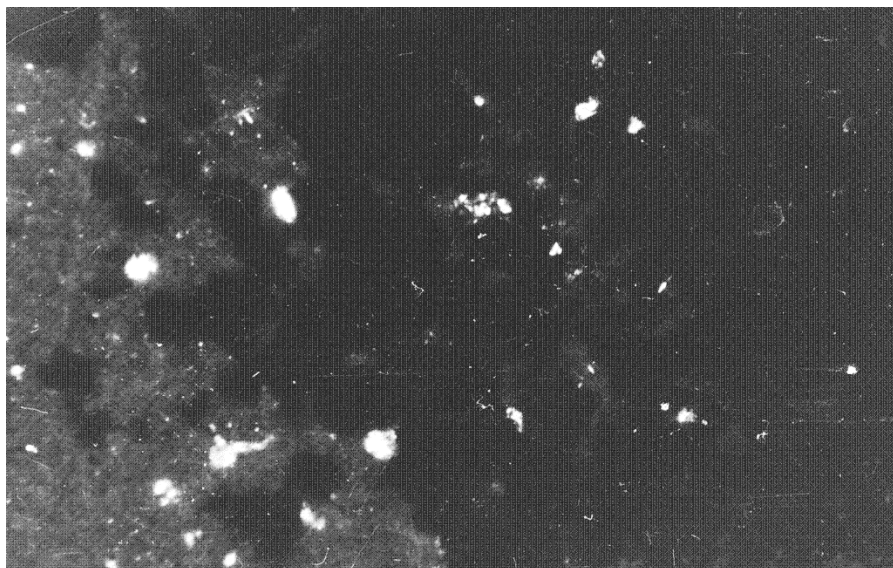


**Рисунок 1** – Світлина загального виду порожнини, що утворилася у процесі гідродезінтеграції масиву маритової руди на межі стінки орту-заїзду



**Рисунок 2** – Схема проведення експериментальних досліджень гідродезінтеграції покладів маритових залізних руд обертовими струменями води

Навантаження продукту гідродезінтеграції здійснювали через 13 днів після виконання процесу і розміщували на карті-намиву. Рудний продукт являв собою сипку масу, що легко переміщується. З карти намиву рудний продукт навантажувався в контейнери. Це підтверджує факт виносу в процесі зневоднення з гідросуміші саме глинистих, шламових і в'язучих частинок. В шламовому відділенні накопичувалися шлами кварцу, що легко візуально відрізняються від рудної маси за кольором (рис 3).



**Рисунок 3** – Мікросвітлина структури окисленої залізної руди у процесі гідродезінтеграції (М 250:1): білим позначено мінеральні зерна кварцу; сірим – пори та пустоти; темним – розкриті зерна мартиту

Аналіз ситового складу руди, що отримана під час гідродезінтеграції і механічному подрібненні подано в табл 3.

**Таблиця 3** – Ситовий склад і розкриття мінеральних зерен окисненої залізної руди, що підготовлена різними способами

Клас крупності, мм	Гідродезінтеграція			Механічне подрібнення		
	вихід, %	масова частка заліза, %	розкриття, %	вихід, %	масова частка заліза, %	розкриття, %
+2,0	2,8	62,7	0,0	3,0	63,8	0,0
-2,0 – +1,0	11,3	68,3	2,0	9,6	65,5	0,0
-1,0 – +0,5	16,8	68,8	5,0	13,7	68,0	3,0
-0,5 – +0,25	14,8	67,8	10,0	13,0	66,7	8,0
-0,25 – +0,1	26,5	68,9	96,0	3,3	67,3	50,0
-0,1 – +0,074	12,7	67,2	100,0	14,8	68,6	60,0
-0,074 – +0,044	7,0	67,9	100,0	6,3	67,7	85,0
-0,044	8,1	68,7	100,0	36,3	67,1	90,0
Всього	100	68,3	–	100	67,2	–

З табл. 3 встановлено, що якість рудної маси, яка отримана в процесі гідродезінтеграції, на 1,1 % вище ніж у процесі механічного подрібнення. Водночас у класах крупності +2,0 мм спостерігається різке зниження масової частки заліза. У інших класах розподіл загального заліза перебуває у межах від 66,7 до 68,9%. Співвідношення класів крупності в обох варіантах дезінтеграції руди істотно різняться. Якщо за першим варіантом класу  $-0,25+0,1$  мм міститься 26,5%, то у разі механічного подрібнення – 3,3%, а вихід класу  $-0,044$  мм за першим варіантом становить 8,1% проти 36,3% за другим варіантом. Це пояснюється тим, що рудні мінерали у процесі механічного впливу дуже подрібнюються. Так як мінерали мартиту мають «губчату» структуру.

Мікроскопічним вивченням продуктів ситового аналізу встановлено, що у процесі гідродезінтеграції досягається повне розкриття рудних частинок крупністю менше 0,25 мм, в той же час за в процесі механічного подрібнення гранична крупність становить 0,044 мм.

Гравітаційний аналіз також показав, що в процесі гідродезінтеграції забезпечується найкраще розкриття мінералів, водночас утворюється близько 0,2% шламів, заразом у процесі механічного подрібнення збільшується вихід шламів до 12,7%. Це пояснюється тим, що в процесі гідродезінтеграції здійснюється високий ступінь розкриття мінералів.

Таким чином наявність, в залізрудних родовищах України, запасів багатих мартитових руд, що містять 65–67 % заліза та незначну кількість домішок, створює виключно перспективні передумови для розробки й освоєння інноваційного виробництва залізрудних концентратів вищої якості, які є сировинною базою високотехнологічних металургійних виробництв.

**Висновки.** У ході проведених досліджень було встановлено наступне:

доведено принципову можливість гідродезінтеграції багатих мартитових руд з вмістом заліза більше 65%, пористістю більше 20% і межею міцності на одновісне стиснення менше 20 МПа;

процес руйнування починається з проникнення напірної води в тріщини на глибину 0,10–0,15 м, утворюючи воронку впровадження, а потім у ході переміщення струменя уздовж осі свердловини – розширюється у врубіву щілину;

за умов зміни тиску води від 1,0 до 1,4 МПа, у ході формування струменя через насадку діаметром 10 мм, параметри процесу гідродезінтеграції змінюються відповідно: об'ємна продуктивність по пульпі – від 14 до 18 м<sup>3</sup>/год; продуктивність по твердій фракції (в тому числі зерновій) – від 7,6 до 13,3 т/год; питомі витрати води – від 1,0 до 2 м<sup>3</sup>/т; питома продуктивність гідродезінтеграції – від 0,28 до 0,56 т/м<sup>3</sup>; щільність пульпи – від 1,3 до 1,5 кг/м<sup>3</sup>;

радіус ефективної гідродезінтеграції мартитових руд з межею міцності на одновісне стиснення 1,62 МПа досягає 1,3–1,5 м, водночас уздовж шаруватості рудного масиву процес гідродезінтеграції відбувається ефективніше;

зі збільшенням діаметра насадки до 10–12 мм та їх кількості продуктивність гідродезінтеграції підвищується в 2,0–2,7 рази;

буровий верстат НКР-100МПа з комплектом нестандартного обладнання може служити основною технічною базою видобувної свердловини гідромоніторного агрегату, що дозволяє через став шланг пропускати від насоса до гідромоніторної насадки технологічну воду під тиском 3–8 МПа без спеціальних конструктивних змін, а також переміщати поступально струмінь води уздовж відслонення вибою на величину 0,4 м і обертати струмінь води навколо осі свердловини з круговою швидкістю 0–80 об/хв., водночас утворюється вздовж осі свердловини квазіциліндрична порожнина;

висока пористість і тріщинуватість покладу «Шурфів 42-46» сприяє ефективній гідродезінтеграції складових мінеральних агрегатів за умов невисокого силового впливу;



процес гідродезінтеграції (відділення і подрібнення) супроводжується підвищенням масової частки заліза в руді від 67,2 до 68,2%, або на 1,1% завдяки виносу з гідросуміші безрудних частинок і шламів;

гідродезінтеграція забезпечує високу ступінь розкриття рудних мінералів, так за умови гранулометричного складу менше 0,25 мм розкриття рудних частинок повне, що на 40–60% вище, ніж у процесі механічного подрібнення в шаровому млині.

### Список літератури

1. Ляденко Т.В. Особливості виробничо-збутової діяльності вітчизняних залізрудних підприємств на сучасному етапі їх розвитку. *Ефективна економіка*. 2019. №4. – URL: [http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4\\_2019/36.pdf](http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2019/36.pdf) (дата звернення: 21.06.2023) <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.34>
2. Гончарук О.В., Рябко О.І., Оверковський Б.М. Гірничо-металургійний комплекс України: сучасні тенденції та результати. *Економіка та управління підприємствами*. 2021. №55. С. 86–97. <https://doi.org/10.32843/infrastruct55-15>
3. Слюсаренко А.В. Структурні зміни в економіці України. *Modern Economics*. 2019. № 14(2019). С. 253-257. [https://doi.org/10.31521/modecon.V14\(2019\)-39](https://doi.org/10.31521/modecon.V14(2019)-39)
4. Бодюк А.В. Надрокористування як джерело фіскальних ресурсів. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія : Гірництво*. 2015. №. 27. С. 112-119.
5. Кирику М.В. Державна стратегія управління інвестиційно-інноваційним розвитком підприємств залізрудної галузі України. *Ефективна економіка*. 2013. №11. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4115> (дата звернення: 21.06.2023)
6. Просандєєв М.І. Забезпеченість запасами руд чорних металів гірничих підприємств України та проблеми їх експлуатації. *Екологія і природокористування*. 2010. №13. С. 32–48.
7. 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>
8. Україна: видобувна промисловість – URL: <https://vue.gov.ua/Україна: видобувна промисловість> (дата звернення: 18.08.2023)
9. [Тарасютін 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. Вісті ДГІ. 2023. № 1(52). С. 86–96. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-86-96>
10. Tarasyutin V.M. Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. № 1. Pp. 54–60.
11. Косенко А. В.. Удосконалення та обґрунтування проектних рішень у разі застосування самохідної навантажувально-доставочної техніки на технологічному процесі доставки рудної маси (на прикладі шахти «Октябрська» ПАТ «Кривбасзалізрудком»). *Молодий вчений*. 2017. №2 (42), 183-190.
12. Fedko, M.V.; Muzyka, I.O. ; Pysmennyi, S.V.; Kalinichenko, O.V. Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2019. № 1. P. 37-41. <https://doi.org/10.29202/nvngu/20191/20>
13. Pysmennyi S., Fedko M., Shvahaer N., Chukharev S. Mining of rich iron ore deposits of complex structure under the conditions of rock pressure development. *E3S Web of Conferences*, 2020. № №11(1)201. P. 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101022>
14. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., Pysmennyi, S. Morhun O. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. № 12(4). Pp. 56–62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>
15. Тарасютін В.М., Косенко А.В. Обґрунтування ресурсозберігаючих технологічних процесів при підземному видобутку різносортих залізних руд Кривбасу. *Вісник КНУ*. 2018. № 46. С. 152–159.
16. Лялюк В.П., Кетлер С.В., Шмельцер Е.О., Кассим Д.А., Ляхова І.А. Оценка влияния прочности кокса на работу доменных печей ПАО «Арселормиттал Кривой Рог». Литво. *Металургія*. 2020: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя). Запоріжжя: АА Тандем, 2020. С. 234–235.
17. An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications. / Mecit Oge et. al. *Materials Today: Proceedings*. 2019. № 11(1). Pp. 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.023>

18. Ismael Matino, Stefano Dettori, Valentina Colla, Valentine Weber, Sahar Salame. Application of Echo State Neural Networks to forecast blast furnace gas production: pave the way to off-gas optimized management. / Ismael Matino et. al. *Energy Procedia*. 2019. № 158. Pp. 4037–4042. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.835>
19. Matinde E., Simate, G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. № 118(8). Pp. 825–844. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>
20. Comprehensive analysis of corrosion failure of blast furnace gas pipeline in a steel plant. / Tianqi Chen et. al. *Engineering Failure Analysis*. 2023. № 154. P. 107651. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107651>
21. Shen L., Li X., Lindberg D., Taskinen P. Tungsten extractive metallurgy: A review of processes and their challenges for sustainability. *Minerals Engineering*. 2019. № 142. P. 105934. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105934>
22. Пелевин А.Е. Пути повышения эффективности технологии обогащения железорудного сырья. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. № 75(2). С. 137–146. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-2-137-146>
23. Control of slag formation in the electric furnace smelting of ferronickel for an energy-saving production. / J. Luo et. al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. № 287. P. 125082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125082>
24. Тарасютин В.М., Гирин В. С., Монастырский Ю. А. Экспериментальные исследования процессов скважинной гидротехнологии в шахтных условиях. *Разработка рудных месторождений*. 1998. № 63. С.16–20.

## References

1. Lyadenko T.V. (2019). Peculiarities of production and marketing activities of domestic iron ore enterprises at the current stage of their development. [Osoblyvosti vyrobnycho-zbutovoyi diyal'nosti vitchyznyanykh zalizorudnykh pidpryyemstv na suchasnomu etapi yikh rozvytku]. *Efficient economy*, (4). (in Ukraine) – URL:[http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4\\_2019/36.pdf](http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2019/36.pdf) (access date: 03/09/2023). <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.34>
2. Honcharuk O.V., Ryabko O.I., Overkovskiy B.M. (2021). Mining and metallurgical complex of Ukraine: modern trends and results [Hirnycho-metallurhiynyy kompleks Ukrayiny: suchasni tendentsiyi ta rezul'taty]. *Economics and enterprise management*, (55), 86–97. (in Ukraine). <https://doi.org/10.32843/infrastruct55-15>
3. Slyusarenko A.V. (2019). Structural Changes in the Economy of Ukraine [Strukturni zminy v ekonomitsi Ukrayiny]. *Modern Economics*, 14(2019), 253–257. (in Ukraine) [https://doi.org/10.31521/modecon.V14\(2019\)-39](https://doi.org/10.31521/modecon.V14(2019)-39).
4. Bodyuk A.V. (2015). Subsoil use as a source of fiscal resources. [Nadrokorystuvannya yak dzherelo fiskal'nykh resursiv]. *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series: Mining*, (27), 112–119. (in Ukraine)
5. Kyryku M.V. (2013). State management strategy of investment - innovative development of enterprises of iron-ore industry in Ukraine. [Derzhavna stratehiya upravlinnya investytsiyno-innovatsiynym rozvytkom pidpryyemstv zalizorudnoyi haluzi Ukrayiny]. *Efficient economy*, (11). (in Ukraine) – URL:<http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4115> (access date: 21/06/2023).
6. Prosandeev M.I. (2010). Availability of reserves of ferrous metal ores of mining enterprises of Ukraine and problems of their exploitation. [Zabezpechenist' zapasamy rud chornykh metaliv hirnychykh pidpryyemstv Ukrayiny ta problemy yikh ekspluatatsiyi]. *Ecology and nature management*, (13), 32–48.
7. 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>
8. Ukraine: mining industry. [Ukrayina: vydobuvna promyslovisť]. (in Ukraine) — URL: <https://vue.gov.ua/Україна: видобувна промисловість> (access date: 18/08/2023)
9. Tarasyutin V.M., Kosenko A.V., Khomenko O.E., Kononenko M.M. (2023). Experimental research and development of a method for calculating the parameters of borehole hydromonitor disintegration of rich iron ore in place. [Eksperymental'ni doslidzhennya ta rozroblyennya metodyky rozrakhunku parametriv sverdlovyynoyi hidromonitornoyi dezintehratsiyi masyviv bahatykh zaliznykh rud]. *News of the DGI*, 1(52), 86–96. (in Ukraine) <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-86-96>
10. 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.
11. Kosenko A.V. (2017). Improvement and substantiation of design decisions in the case of the use of self-propelled loading and delivery equipment in the technological process of ore mass delivery (on the example of the Oktyabrsk mine of Kryvbaszalizrudkom PJSC). [Udoskonalennya ta obgruntuvannya proektnykh rishen' u razi

zastosuvannya samokhidnoyi navantazhuval'no-dostavochnoyi tekhniki na tekhnolohichnomu protsesi dostavky rudnoyi masy (na prykladi shakhty «Oktyabrs'ka» PAT «Kryvbaszalizrudkom»). *A young scientist*, 2 (42), 183-190. (in Ukraine)/

12. Fedko M.B.; Muzyka I.O. ; Pysmennyi S.V.; Kalinichenko O.V. (2019). Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (1), 37-41. <https://doi.org/10.29202/nvngu/20191/20>

13. . Pysmennyi S., Fedko M., Shvahaer N., Chukharev S. (2020). Mining of rich iron ore deposits of complex structure under the conditions of rock pressure development. *E3S Web of Conferences*, No. 201, 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101022>

14. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Morhun O. (2018). Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 56–62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>

15. Tarasyutin V.M., Kosenko A.V. (2018). Justification of resource-saving technological processes during underground mining of various types of iron ores in Kryvbas. [Obgruntuvannya resursozberihayuchykh tekhnolohichnykh protsesiv pry pidzemnomu vydobutku riznosortnykh zaliznykh rud Kryvbasu]. *Bulletin of KNU*, (46), 152–159. (in Ukraine)

16. Lyaluk V.P., Ketler S.V., Shmeltser E.O., Kassim D.A., Lyakhova I.A. (2020). Assessment of the effect of coke strength on the operation of blast furnaces of PJSC Arcelormittal Kryvyi Rih. [Otsenka vlyyannya prochnosti koksa na rabotu domennykh pechey PAO «Arselormyttal Kryvoy Roh»]. Casting. Metallurgy. 2020: Materials of the XVI International Scientific and Practical Conference (September 8-10, 2020, Zaporizhzhia). Zaporizhzhia: AA Tandem, 234–235. (in Russian)

17. Mecit Oge, Dervis Ozkan, M.Bahattin Celik, Mustafa Sabri Gok, Abdullah Cahit Karaoglanli. (2019). An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications. *Materials Today: Proceedings*, 11(1). 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.023>

18. Ismael Matino, Stefano Dettori, Valentina Colla, Valentine Weber, Sahar Salame. (2019). Application of Echo State Neural Networks to forecast blast furnace gas production: pave the way to off-gas optimized management. *Energy Procedia*, 158, 4037–4042. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.835>

19. Matinde E., Simate G. S., Ndlovu S. (2018). Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(8), 825-844. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>

20. Tianqi Chen , Liang Sun, Qing Li, Chao Liu, Zhiyong Liu, Xuequn Cheng, Xiaogang Li. (2023). Comprehensive analysis of corrosion failure of blast furnace gas pipeline in a steel plant. *Engineering Failure Analysis*, 154. 107651. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107651>

21. Shen L., Li X., Lindberg D., Taskinen P. (2019). Tungsten extractive metallurgy: A review of processes and their challenges for sustainability. *Minerals Engineering*, 142, 105934. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105934>

22. Pelevin A.E. (2019). Ways of efficiency increasing of iron ore raw materials concentration technology. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific , Technical and Economic Information*, 75(2), 137–146. (in Russian) <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-2-137-146>

23. Luo J., Li G., Rao M., Peng Z., Liang G., Jiang T., Guo X. (2021). Control of slag formation in the electric furnace smelting of ferronickel for an energy-saving production. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125082>

24. Tarasyutin V.M., Girin V.S., Monastyrsky Yu.A. (1998). Experimental studies of borehole hydraulic technology processes in mine conditions. [Eksperimental'nyye issledovaniya protsessov skvazhinnoy gidrotekhnologii v shakhtnykh usloviyakh. Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy]. *Development of ore deposits*, 63, 16–20. (in Russian)

Надійшла до редакції 27.10.2023

**Tarasyutin V. M., Kosenko A. V., Khomenko O. YE., Kononenko M. M.**

## EXPERIMENTAL STUDIES OF HYDRODISINTEGRATION OF MARTITE IRON ORE BY ROTATING WATER JETS

**Purpose.** Obtaining the main initial experimental data to establish a set of calculated dependencies for determining the parameters of the process of hydrodisintegration by boreholes of rich martite ore deposits, for further designing an industrial mine site for hydraulic mining by boreholes and a production technological complex for actual mining.

**Methods.** Testing of an experimental hydraulic monitor installation and equipment for the implementation of the technological process of hydrodisintegration of rich martite ores through production wells with a diameter

of 105 mm. Refinement of the criterion for the hydrodisintegration of rich martite ores by pressure jets of medium diameter, in the conditions of natural occurrence of the ore deposit. Determination of the influence of the pressure of the working diameter of the jet and the speed of its movement along the exposure of the face on the range and productivity of hydrodisintegration. Determination of the influence of the geological and structural characteristics of the ore deposit on the parameters of the hydrodisintegration process. Establishment of rational regimes for the impact on the ore massif of a rotating jet to obtain a given granulometric composition of the ore mass.

**Results.** Through wells with rotating jets of water, the fundamental possibility of hydrodisintegration of arrays of rich martite ores with an iron content of more than 65%, a porosity of more than 20% and a uniaxial compressive strength of less than 20 MPa has been proved. It has been established that the hydrodisintegration of rich martite ore massifs begins with the penetration of pressure water into cracks to a depth of 0.10–0.15 m. At the same time, an increase in pressure in the jet nozzle increases the productivity of the hydraulic monitor, and the use of two rotating jet nozzle increases the productivity of the hydraulic monitor by 2.7 times. The process of hydrodisintegration is accompanied by an increase in the mass fraction of iron in the ore from 67.2 to 68.2%, due to the removal of barren particles and sludge from the slurry. Hydrodisintegration provides a high degree of disclosure of ore minerals, 40–60% higher than in the process of mechanical grinding in a grinding mill.

**Scientific novelty.** The dependence of the change in the performance of the hydraulic monitor and the specific water consumption on the water pressure in the jet nozzle has been established. The dependence of the change in the percentage of iron in the disintegration products of martite ore on the class of their size has been obtained.

**Practical implication.** The use of hydrodisintegration by boreholes of deposits of rich martite ore in the course of their underground mining provides an increase (above natural) in the quality of the extracted ore raw materials and its beneficiation directly at the place of extraction.

**Keywords:** rich iron ores, superconcentrates, hydraulic mining by boreholes, ore mass beneficiation, hydrodisintegration.

### Відомості про авторів

**Тарасю́тін Ві́ктор Миха́йлович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин Криворізького національного університету (КНУ), Кривий Ріг, Україна, [viktortarasyutin@gmail.com](mailto:viktortarasyutin@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 (ВФГП ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [andreyvladimirovich@email.ua](mailto:andreyvladimirovich@email.ua).

**Хоменко Олег Євгенович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), Дніпро, Україна, [rudana.in.ua@gmail.com](mailto:rudana.in.ua@gmail.com)

**Кононенко Максим Миколайович**, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів (НТУ «ДП»), Дніпро, Україна, [kmn211179@gmail.com](mailto:kmn211179@gmail.com)

**Tarasyyutin Viktor Mykhaylovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University (KNU), Kryvyi Rih, Ukraine, [viktortarasyutin@gmail.com](mailto:viktortarasyutin@gmail.com).

**Kosenko Andrii Volodymyrovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher of Department of Rock Mass Condition Control, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (BPMF of IGTM of the NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [andreyvladimirovich@email.ua](mailto:andreyvladimirovich@email.ua).

**Khomenko Oleh Yevhenovych**, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Mining Engineering and Education Department, Dnipro University of Technology (DU of T), Dnipro, Ukraine, [rudana.in.ua@gmail.com](mailto:rudana.in.ua@gmail.com)

**Kononenko Maksym Mykolaiovych**, Doctor of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Transport systems and energy-mechanical complexes Department, Dnipro University of Technology (DU of T), Dnipro, Ukraine, [kmn211179@gmail.com](mailto:kmn211179@gmail.com).