

УДК 622.74:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-26>

ВИКОРИСТАННЯ ТОНКОГО ГРОХОЧЕННЯ В СХЕМАХ ПЕРЕРОБКИ ТОНКОПОДРІБНЕНИХ МАГНЕТИТОВИХ ПРОДУКТІВ ЗБАГАЧЕННЯ

Купін Андрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерних систем
та мереж технології будівельних виробів та матеріалів
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-7569-1721

Вільгельм Марина Миколаївна,

доктор філософії, провідний технолог
ТОВ «Метінвест Січсталь»
ORCID ID: 0009-0003-5303-2954

У цій статті розглядається актуальність використання операції тонкого грохочення в переробці корисних копалин. Огляд публікацій різних авторів дозволяє зробити висновок, що застосування тонкого грохочення відіграє вирішальну роль у класифікації тонкоподрібнених продуктів збагачення технологічних схем, безпосередньо впливаючи на якість кінцевого продукту та загальну продуктивність процесу. Метою даних досліджень є оцінка можливості застосування у схемах переробки тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення тонкого грохочення для доведення кінцевих концентратів. Дослідження базується на вивченні особливостей гранулометричного складу та співвідношення типів зростання і вмісту рудного компонента. Аналіз гранулометричного складу показав, що найбільший вміст заліза загально-скопцентрованої у класі $-0,02$ мм (68,56% та 69,8%), що підтверджено вмістом рудного компоненту (89% та 91%). Також на основі аналізу гранулометричного складу доведено доцільність використання для тонкого грохочення ситової панелі з розміром отворів $-0,053$ мм за рахунок високого вмісту в живленні грохоту класу $-0,05$ мм. Після вибору ситової панелі у дослідженні проведено експеримент з використанням грохоту Derrick Stack Sizer 2SG48-60W-1STK, який підтверджує доцільність застосування операції тонкого грохочення для тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення з метою підвищення якості товарної продукції. В статті також зазначено, що процес тонкого грохочення є багатфакторним і потребує більш детально вивчення з проведенням серії експериментів. Практичне значення цього дослідження полягає в обґрунтуванні доцільності застосування операцій тонкого грохочення для тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення.

Ключові слова: гранулометричний склад, крупність частинок, тонке грохочення, поверхні для грохочення, продуктивність, ефективність грохочення, магнетит, збагачення

Kupin Andrey, Vilhelm Maryna. The use of fine screening in processing circuits for finely ground magnetite products beneficiation

This article examines the relevance of using fine screening in mineral processing. A review of publications by various authors leads to the conclusion that the use of fine screening plays a decisive role in the classification of finely ground beneficiation products in processing schemes, directly affecting the quality of the final product and the overall productivity of the process. The aim of this research is to evaluate the feasibility of using fine screening in processing schemes for finely ground magnetite enrichment products to produce final concentrates. The study is based on an analysis of the characteristics of the particle size distribution and the ratio of grain growth types to the ore component content. Analysis of the particle size distribution showed that the highest content of total iron is concentrated in the -0.02 mm fraction (68.56% and 69.8%), which is confirmed by the ore component content (89% and 91%). Furthermore, based on the analysis of the particle size distribution, the feasibility of using a screen panel with a mesh size of -0.053 mm for fine screening was demonstrated due to the high content of the -0.05 mm fraction in the feed. After selecting the screen panel, an experiment was conducted using a Derrick Stack Sizer 2SG48-60W-1STK, which confirms the feasibility of applying fine screening to finely ground magnetite beneficiation products to improve the quality of commercial products. The article also notes that the fine screening process is multifactorial and requires more detailed study through a series of experiments. The practical significance of this study lies in substantiating the feasibility of applying fine screening operations to finely ground magnetite beneficiation products.

Key words: particle size distribution, particle size, fine screening, screening surfaces, throughput, screening efficiency, magnetite, beneficiation.

Вступ. В останні десятиліття у технології переробки мінеральної сировини спостерігається стійка тенденція до збільшення частки тонкоподрібнених матеріалів. Це пов'язано з погіршенням якості рудної бази та необхідністю кращого розкриття корисних мінералів [1].

Дослідження показують, що застосування тонкого грохочення у стадіях подрібнення та фінальних стадіях доведення дозволяє суттєво підвищити якість концентрату. Тонке грохочення все частіше розглядається як альтернатива гідроциклонам та іншим апаратам для класифікації). Це зумовлено тим, що: грохот забезпечує геометричний поділ за розміром, а не за гідравлічними характеристиками [2].

Застосування тонкого грохочення в лабораторних та промислових умовах висвітлено в багатьох наукових публікаціях, дисертаційних роботах тощо.

Автори [3] відзначають, що включення в технологічну схему операції тонкого грохочення дозволяє підвищити питому продуктивність млина, знизити навантаження на вузол подрібнення, а також зменшити проблему переподрібнення матеріалу відповідної крупності. Також відмічається, що ефективність роботи грохоту значно вище у порівнянні навіть з найбільш продуктивними гідроциклонами.

На Полтавському ГЗК було запропоновано технологічну схему переробки тонкокраплених магнетитових кварцитів, яка включає операцію тонкого грохочення [4]. Реалізація даної схеми забезпечила збільшення вмісту заліза в товарному продукті на 1,5%. У процесі експериментальних досліджень також встановлено, що надрешітний продукт, який утворюється в ході тонкого грохочення, вимагає додаткової переробки в окремому технологічному контурі – додаткове подрібнення матеріалу з подальшим збагаченням на високоселективних сепараторах.

На багатьох збагачувальних фабриках, що переробляють мідні, поліметалеві, фосфатні та залізні руди проведені промислові випробування високочастотних вібраційних грохотів у замкнутих циклів подрібнення [5]. Аналіз результатів впровадження цієї технології на підприємствах Colquijirca (Перу), Cerro Lindo та Condestable (Перу) показав суттєве підвищення ефективності класифікації продуктів подрібнення – на рівні 20–25%. Середня продуктивність млинів зросла на 31,6%, а величина циркуляційного навантаження знизилася на 51,4%. Отримані дані підтверджують високу результативність використання високочастотних вібраційних грохотів у замкнутих схемах подрібнення.

Аналіз публікацій доводить доцільність виконання дослідження використання операції тонкого грохочення в схемах доведення магнетитових концентратів. Метою даних досліджень є оцінка можливості застосування у схемах переробки тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення тонкого грохочення на підставі вивчення особливостей гранулометричного складу та співвідношення типів зростання і вмісту рудного компоненту.

Методи та методики дослідження. В рамках оцінки можливості застосування тонкого грохочення для доведення тонкоподрібнених магнетитових концентратів ПРАТ «ІНГЗК» відібрані проби флотаційних концентратів різної якості [6-8].

Кожна проба була підготовлена для проведення хімічних [9-11], гранулометричних [12] та мінералогічних аналізів [13].

Гранулометричний аналіз проб виконувався з використанням сухого та мокрого розсіву, седиментаційний аналіз використовувався для визначення класів крупності менше 0,044 мм.

Операція тонкого грохочення виконувалась з використанням напівромислового грохоту 2SG48-60W-1STK з подальшою оцінкою живлення грохоту, підрешітного та надрешітного продуктів.

Обладнання та матеріали для проведення експерименту:

- грохот 2SG48-60W-1STK;
- ситова поверхня з отвором сит 0,053 мм;
- живильник вібраційний;
- приймальні ємності для надрешітного та підрешітного продуктів;
- лабораторні ваги;
- секундомір;
- пробовідбірники;
- флотаційні концентрати різної якості.

Живлення рівномірно подається на робочу поверхню грохоту за допомогою живильника. Матеріал, який залишається на поверхні – надрешітний продукт, матеріал який проходить крізь сито – підрешітний продукт.

Відбір проб здійснюється з живлення, надрешітного та підрешітного продуктів та проводиться через рівні інтервали часу.

Навантаження на ситову панель підтримується на рівні 7,0 т/год, вміст твердого на рівні 40 %. Частота коливань деки грохоту не змінюється та складає 50 Гц. Амплітуда коливань грохоту дорівнює 0,7 мм та не підлягає регулюванню.

В рамках експерименту відстежуються наступні параметри: навантаження на деку грохоту, вміст заліза загального у живленні пульпи,

надрешітному та підрешітному продуктах, щільність пульпи, % твердого у живленні.

Результати. В процесі виконання дослідження визначені гранулометричні склади флотаційних концентратів за класами крупності. Мінералогічна оцінка виконана за типом зростання та вмістом рудного компоненту.

Результати хімічних, гранулометричних та мінералогічної оцінки наведені в таблицях 1-5.

На основі даних гранулометричних аналізів наведених в таблицях 2,4 доведено можливість застосування тонкого грохочення для дозбагачення флотаційних концентратів. Враховуючи значний вміст класу -0,05 мм на рівні 96,69-96,73 % доцільним було проведення грохочення на ситовій панелі з отвором сит 0,053 мм на напівпромисливому грохоті Derrick Stack

Sizer 2SG48-60W-1STK.

Для кожного з концентратів були виконано по три дослідження. Дані експерименту зафіксовані в таблиці 6.

Отримані результати дозволяють зробити висновок доцільності операції тонкого грохочення для доведення кінцевих концентратів. Застосування операції тонкого грохочення дозволить отримати концентрати Fe_{зар.} 68-69 %.

Слід зазначити, що дослідження проводилось в стаціонарному режимі без оцінки впливу факторів на процес розділення.

Продуктивність та ефективність грохочення залежать від багатьох факторів, які можна поділити на дві групи:

– фактори, що залежать від фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу

Таблиця 1

Хімічний склад флотаційних концентратів

Вміст, %																
Фезар.	Ферозч.	FeO	Фемагн.	Fe2+	Fe3+	Fe2O3	SiO2	CaO	MgO	Al2O3	P	P2O5	MnO	S	CO2	п.п.п.
67,36	66,91	29,1	64,68	1,4	1,08	58,20	5,66	0,26	0,64	0,24	0,015	0,034	0,056	0,072	0,56	0,54
68,58	68,18	29,37	65,94	1,73	0,9	65,09	4,4	0,21	0,53	0,23	0,013	0,03	0,05	0,049	0,45	0,42

Таблиця 2

Гранулометричний склад концентрату (Fe_{зар.} 67,36%)

Класи крупності, мм	Вихід класу, %	Fe _{зар.} , %	SiO ₂ , %	Дані з накопичуванням		
				Вихід класу, %	Fe _{зар.} , %	SiO ₂ , %
+0,05	3,31	48,42	41,03	100	67,41	5,66
-0,05+0,04	3,70	59,62	16,47	96,69	68,06	4,45
-0,04+0,02	6,30	66,18	8,65	92,99	68,40	3,97
-0,02+0	86,69	68,56	3,63	86,69	68,56	3,63
Всього:	100,00	67,41	5,66	-	-	-

Таблиця 3

Типи зростання з урахуванням класів крупності у концентраті (Fe_{зар.} 67,36%)

Клас, мм	Співвідношення типів зростання / вміст рудного компоненту				
	Рудні	Багаті	Середні	Бідні	Нерудні
	95-100 р.ф.	75-95 р.ф.	25-75 р.ф.	5-25 р.ф.	0-5 р.ф.
+0,05	64	3	-	3	30
-0,05+0,04	69	13	3	5	10
-0,04+0,02	81	8	4	3	4
-0,02+0	89	3	3	2	3

Таблиця 4

Гранулометричний склад концентрату (Fe_{зар.} 68,58%)

Класи крупності, мм	Вихід класу, %	Fe _{зар.} , %	SiO ₂ , %	Дані з накопичуванням		
				Вихід класу, %	Fe _{зар.} , %	SiO ₂ , %
+0,05	3,27	49,3	32,24	100	68,58	4,37
-0,05+0,04	3,78	60,7	12,94	96,73	69,23	3,43
-0,04+0,02	6,21	66,5	5,69	92,95	69,58	3,04
-0,02+0	86,74	69,8	2,85	86,74	69,80	2,85
Всього:	100,00	68,58	4,4	-	-	-

Таблиця 5

Типи зростання з урахуванням класів крупності у концентраті (Fe_{заг.} 68,58%)

Клас, мм	Співвідношення типів зростання / вміст рудного компоненту				
	Рудні	Багаті	Середні	Бідні	Нерудні
	95-100 р.ф.	75-95 р.ф.	25-75 р.ф.	5-25 р.ф.	0-5 р.ф.
+0,05	66,0	4,0	0	5,0	25,0
-0,05+0,04	70,0	14,0	1,0	4,0	11,0
-0,04+0,02	82,0	9,0	2,0	3,0	4,0
-0,02+0	91,0	4,0	1,0	1,0	3,0

Таблиця 6

Результати досліджень

Навантаження, т/год	% тв.	Частота, Гц	Живлення		Fe _{заг.} , %	Надрешітний продукт		Підрешітний продукт			
			Вихід класу, %			Вихід класу від операції, %		Вихід класу від операції, %		Fe _{заг.} , %	
			+0,05	-0,05		+0,05	-0,05	+0,05	-0,05		
7,0	40,0	50	3,31	96,69	67,41	3,0	24,12	65,91	0,31	72,57	67,97
						3,0	22,26	65,74	0,31	74,43	67,98
						3,0	21,26	65,65	0,31	75,43	67,98
			3,27	96,73	68,58	2,98	14,44	65,87	0,29	82,29	69,15
						2,98	12,59	65,45	0,29	84,14	69,16
						2,98	11,59	65,2	0,29	85,14	69,16

(гранулометричний склад матеріалу, його густина і вологість, вміст і склад глинистих домішок);

– конструктивно-механічні фактори грохота (спосіб грохочення, рівномірність живлення, форма і розмір отворів просіюючої поверхні, кут нахилу короба, амплітуда і частота коливань) [14].

Доцільно в подальшому оцінити вплив кожного з цих факторів, а також можливість їх керування за допомогою чисельного, комп'ютерного моделювання та подальшої автоматизації процесу грохочення.

Чисельне моделювання визначає основу дослідження, включаючи методи оптимізації та обробки даних, тоді як комп'ютерне моделювання виступає інструментом реалізації цих методів, що забезпечує адаптацію моделей до реальних виробничих даних і можливість їх застосування в системах управління.

Так авторами [15] на основі підходу застосування управління класифікацією запропоновано узагальнений алгоритм оптимізації процесів збагачення. Представлено результати комп'ютерного моделювання процесу оптимізації класифікації на прикладі реальних показників збагачення магнетитових кварцитів. Підтверджено, що розроблені алгоритми та принципи управління можуть застосовуватися для визначення необхідних параметрів у сучасних інтелектуальних системах управління.

Відносно тонкого грохочення чисельне моделювання дозволить визначити функціональні залежності ефективності грохочення від технологічних параметрів без трудомістких промислових експериментів.

Комп'ютерне моделювання забезпечить реалізацію чисельних моделей у вигляді програмних алгоритмів, проведення обчислень за даними експериментів та аналіз отриманих результатів.

У підсумку чисельного та комп'ютерного моделювання можлива побудова алгоритмів автоматичного управління процесом грохочення.

Висновки. В результаті гранулометричного аналізу та мінералогічної оцінки встановлено, що у фракції -0,02 мм сконцентровано найбільший вміст Fe_{заг.} 68,56 % та 69,8 %, що підтверджується вмістом рудного компонента на рівні 89 % та 91 %.

Визначено, що застосування операції тонкого грохочення доцільно для доведення кінцевих концентратів. За рахунок впровадження тонкого грохочення очікується підвищення якості концентрату до 68-69%.

Доведено, що за рахунок високого виходу класу -0,05 мм на рівні 96,69-96,73 % тонке грохочення доцільно проводити з використанням ситової панелі з отвором сит -0,053 мм.

Сформовано напрямки подальших досліджень:

– проведення низки лабораторних експериментів з оцінкою факторів, що залежать від фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу та конструктивно-механічних факторів грохоту;
– проведення чисельного моделювання з метою визначення функціональних залежностей ефективності грохочення від технологічних параметрів;

– комп'ютерне моделювання для забезпечення реалізації чисельних моделей у вигляді програмних алгоритмів;
– узагальнення результатів чисельного та комп'ютерного моделювання та подальша побудова алгоритмів автоматичного управління процесом грохочення з метою його оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хміль І.В., Булах О.В., Костючик О.Л. Впровадження у технологію збагачення операції тонкого грохочення. *Гірничий вісник КНУ*. 2014. № 97. С. 226-231.
2. Хміль І.В., Булах О.В., Булах О.О. Тонке грохочення як перспективний метод підвищення ефективності збагачення магнетитових кварцитів. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 67(108). С. 49-56.
3. Губін Г.В., Скляр Л.В., Ярош Т.П., Губін Г.Г. Аналітичний огляд напрямів покращення якості магнетитових концентратів. *Збагачення корисних копалин*. 2016. Вип. 64(105). С. 42-59.
4. Бровко А.І., Евсіович С.Г., Токталова І.Н. та ін. Промислові випробування тонкого грохочення концентрату на Дніпровському ГЗК. *Збагачення руд*. 1974. №4.
5. Albuquerque L.G., Wheeler J.E., Valine S.B. High frequency vibrating screens in closed grinding circuits. Proceedings of the International Mineral Processing Congress «XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa» (October 20-24, 2013). Goiânia, Brazil, 2013. P. 417–424.
6. Руди залізні та марганцеві. Методи відбирання проб : ДСТУ 3195:2015. [Чинний від 2016-04-01]. К.: Держстандарт України, 2016. 16 с. (Національні стандарти України).
7. Руди залізні. Методи відбирання та готування проб : ДСТУ ISO 3082:2018. [Чинний від 2019-12-01]. К.: Держстандарт України, 2019. 106 с. (Національні стандарти України).
8. Руди залізні та марганцеві. Методи готування проб : ДСТУ 3196:2015 [Чинний від 2016-04-01]. К.: Держстандарт України, 2016. 16 с. (Національні стандарти України).
9. Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Загальні вимоги до методів хімічного аналізування : ДСТУ 8811.0:2019. [Чинний від 2020-07-01]. К.: Держстандарт України, 2020. 14 с. (Національні стандарти України).
10. Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Метод визначення загального заліза : ДСТУ 8811.1:2018. [Чинний від 2019-01-01]. К.: Держстандарт України, 2019. 16 с. (Національні стандарти України).
11. Руди залізні. Визначення кремнію. Частина 1. Гравіметричні методи (ISO 2598-1:1992, IDT) : зі змінами (ІПС № 7-2006, № 1-3-2016) : ДСТУ ISO 2598-1:2003. [Чинний від 2008-07-01]. К.: Держстандарт України, 2008. 18 с. (Національні стандарти України).
12. Руди залізні та залізо прямого відновлювання. Визначення гранулометричного складу методом розсіювання : ДСТУ ISO 4701:2019. [Чинний від 2020-07-01]. К.: Держстандарт України, 2020. 20 с.
13. Бекеша С., Сливко Є., Білик Н. Методи мінералогічних досліджень. Львів.: Міністерство освіти і науки України, ЛНУ імені Івана Франка, 2013. 192 с.
14. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин: підручник. Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. 612 с.
15. Kupin A., Zubov D., Osadchuk Y., Saiapin V. Algorithm and Model of Intelligent Classification for Optimizing the Parameters of Beneficiation Technology. Proceedings of the 5th Workshop for Young Scientists in Computer Science and Software Engineering (CSSE@SW 2022), Kryvyi Rih, Ukraine, 2023. – P. 5–12.

REFERENCES:

1. Khmil, I.V., Bulakh, O.V., Kostyuchuk, O.L. (2014). Vprovadzhennia u tekhnolohiiu zbahachennia operatsii tonkoho hrokhochennia [Integration of fine screening into the beneficiation process]. *Hirnychiy visnyk KNU – Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, 97, 226-231 [in Ukrainian].
2. Khmil, I.V., Bulakh, O.V., Bulakh, O.O. (2017). Tonke hrokhochennia yak perspektyvnyi metod pidvyshchennia efektyvnosti zbahachennia mahnetytovykh kvartsytiv [Fine screening as a promising method for improving the efficiency of magnetite-quartzite beneficiation]. *Zbahachennia korysnykh kopalyin – Mineral processing*, 67(108), 49-56. [in Ukrainian].

3. Hubin, H.V., Skliar, L.V., Yarosh, T.P., Hubin, H.H. (2016). Analitychnyi ohliad napriamiv pokrashchennia yakosti mahnetytovykh kontsentrativ [An Analytical Review of Approaches to Improving the Quality of Magnetite Concentrates]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral processing*, 64(105), 42-59. [in Ukrainian].
4. Brovko, A.I., Evsiovykh, S.H., Toktalova, I.N. et al. (1974). Promyslovi vyprobuvannia tonkoho hrokhochennia kontsentratu na Dniprovskomu HZK [Pilot testing of fine screening of concentrate at the Dnipro Mining and Processing Plant]. *Zbahachennia rud – Ore beneficiation*, 4. [in Ukrainian].
5. Albuquerque, L.G., Wheeler, J.E., Valine, S.B. (2013). High frequency vibrating screens in closed grinding circuits. *Proceedings of the International Mineral Processing Congress «XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa»*. (pp. 417–424). Goiânia, Brazil. Goiânia, Brazil [in English].
6. Rudy zalizni ta marhantsevi. Metody vidbyrannia prob [Iron and manganese ores. Sampling methods]. (2016). *DSTU 3195:2015 from 01th April 2016*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
7. Rudy zalizni. Metody vidbyrannia ta hotuvannia prob [Iron ores. Methods for sampling and sample preparation]. (2019). *DSTU ISO 3082:2018 from 01th December 2019*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
8. Rudy zalizni ta marhantsevi. Metody hotuvannia prob [Iron and manganese ores. Sample preparation methods]. (2016). *DSTU 3196:2015 from 01th April 2016*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
9. Rudy zalizni, kontsentraty, ahlomeraty, okatky ta brykety. Zahalni vymohy do metodiv khimichnoho analizuvannia prob [Iron ore, concentrates, sinter, pellets, and briquettes. General requirements for chemical analysis methods]. (2020). *DSTU 8811.0:2019 from 01th July 2020*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
10. Rudy zalizni, kontsentraty, ahlomeraty, okatky ta brykety. Metod vyznachennia zahalnoho zaliza [Iron ore, concentrates, sinter, pellets, and briquettes. Method for determining total iron]. (2019). *DSTU 8811.1:2018 from 01th January 2019*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
11. Rudy zalizni. Vyznachennia kremniuu. Chastyna 1. Hravimetrychni metody (ISO 2598-1:1992, IDT) : zi zminamy (IPS № 7-2006, № 1-3-2016) [Iron ores. Determination of silicon. Part 1: Gravimetric methods (ISO 2598-1:1992, IDT) : with amendments (IPS No. 7-2006, No. 1-3-2016)]. (2008). *DSTU ISO 2598-1:2003 from 01th July 2008*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
12. Rudy zalizni ta zalizo priamoho vidnovliuvannia. Vyznachennia hranulometrychnoho skladu metodom rozsuiuvannia [Iron ores and direct-reduction iron. Determination of particle size distribution by the scattering method]. (2020). *DSTU ISO 4701:2019 from 01th July 2020*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
13. Bekesha, S., Slyvko, Ye., Bilyk, N. (2013). *Metody mineralohichnykh doslidzhen [Methods of mineralogical research]*. Lviv.: Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, LNU imeni Ivana Franka [in Ukrainian].
14. Biletskyi, V.S., Smyrnov, V.O. (2009). *Tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn [Mineral processing technology]*. Donetsk: Skhidnyi vydavnychiy dim [in Ukrainian].
15. Kupin, A., Zubov, D., Osadchuk, Y., Saiapin, V. (2023). Algorithm and Model of Intelligent Classification for Optimizing the Parameters of Beneficiation Technology. *Proceedings of the 5th Workshop for Young Scientists in Computer Science and Software Engineering (CSSE@SW 2022)*. (pp. 5–12). Kryvyi Rih, Ukraine.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 06.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026