

ГІРНИЦТВО

УДК 622.765:553.546

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-37>

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕЧИСНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОСНОВНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ПІД ЧАС ПОДРІБНЕННЯ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ

Безсмертний Євген Олексійович,

аспірант

Криворізького національного університету

Головний збагачувач

ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

ORCID ID: 0009-0008-2209-7567

Олійник Тетяна Анатоліївна,

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри збагачення корисних копалин і хімії

Криворізького національного університету

ORCID ID: 0000-0002-0315-7308

У сучасній мінерально-сировинній промисловості процес збагачення корисних копалин є ключовим етапом, що визначає економічну доцільність і ефективність подальшого перероблення сировини. Особливої актуальності набувають методи гідравлічної класифікації, які забезпечують розділення мінеральної пульпи за крупністю й густиною частинок. Серед таких методів провідне місце займають гідроциклони – апарати, що дозволяють досягати високої продуктивності за відносно низької енергоємності.

Гідроциклони широко застосовуються на збагачувальних фабриках для попередньої класифікації та розділення тонкодисперсного матеріалу, підготовки пульпи до магнітного або флотаційного збагачення, вилучення відходів у процесах мокрого циклу, а також для ущільнення продукту перед подачею в згущувачі чи фільтри.

Основні переваги гідроциклонів – це простота конструкції, відсутність рухомих частин, висока надійність і можливість безперервної роботи в автоматизованому режимі. Проте поряд із цими перевагами гідроциклони мають і низку суттєвих недоліків: недостатню ефективність класифікації в разі наявності вузькорозмірних фракцій, значну чутливість до змін тиску та концентрації пульпи, обмежену здатність до розділення частинок близьких за густиною чи розміром, а також утворення турбулентного ядра, що знижує селективність процесу.

Ці обмеження зумовлюють неефективну класифікацію, підвищення циркуляційних навантажень, зменшення загальної продуктивності технологічного циклу, надмірне подрібнення матеріалу і зростання витрат електроенергії.

Особливо гостро ці проблеми проявляються у складних мінералогічних умовах або за потреби в тонкому розділенні фракцій. Тому актуальним напрямом удосконалення процесу є впровадження перечисної класифікації – багатаетапного або циркуляційного оброблення матеріалу з повторною класифікацією недосортованих фракцій.

Ключові слова: класифікація, гідроциклони, гідравлічна класифікація, гранулометричний склад, тиск, вихід класу.

Bezsmertnyi Yevhen, Oliinyk Tetiana. Determination of the effect of sequential classification on the efficiency of primary classification in the grinding of magnetite quartzites

In modern mineral processing, the beneficiation of mineral raw materials is a key stage that determines the economic feasibility and efficiency of further processing. Hydraulic classification methods, which enable the separation of mineral pulp by particle size and density, are of particular importance. Among these methods, hydrocyclones play a leading role, offering high throughput at relatively low energy consumption.

Hydrocyclones are widely used at processing plants for preliminary classification and separation of fine materials, pulp preparation for magnetic or flotation beneficiation, removal of waste in wet processing circuits, and sometimes for product thickening prior to feeding thickeners or filters.

The main advantages of hydrocyclones include simple design, absence of moving parts, high reliability, and the ability for continuous operation in automated systems. However, alongside these advantages, hydrocyclones also exhibit several significant drawbacks: low classification efficiency in the presence of narrow size fractions, high sensitivity to variations in feed pressure and pulp density, limited ability to separate particles of similar density or size, and the formation of a turbulent core that reduces separation selectivity.

These limitations lead to inefficient classification, increased circulating loads, decreased overall process productivity, excessive overgrinding, and elevated energy consumption. These challenges are particularly evident when processing complex mineralogical compositions or when fine fraction separation is required.

An important approach to improving classification efficiency is the implementation of sequential (multi-stage or circulating) classification, involving multiple stages of material treatment with re-classification of misclassified fractions.

Keywords: *classification, hydrocyclones, hydraulic classification, particle size distribution, feed pressure, fine fraction recovery.*

Вступ. Класифікація – це процес розділення мінеральної сировини за крупністю та/або густиною частинок, що є ключовим у технологічних схемах збагачення корисних копалин. Від результатів класифікації залежить ефективність подальших операцій, як-от флотація, гравітаційне збагачення або магнітна сепарація. У практиці збагачення корисних копалин для забезпечення процесу класифікації найбільше поширення одержали класифікатори: механічні спіральні з незануреною спіраллю, елеваторні, скребкові та гідроциклони [1].

Механічні класифікатори працюють за принципом розділення вихідного продукту в горизонтальному потоці на крупну фракцію – піски і дрібну – злив. Розвантаження пісків здійснюється механічним способом – примусово.

У сучасній практиці застосовують такі механічні класифікатори:

- спіральні класифікатори, які використовують принцип осадження частинок під дією сили ваги;
- елеваторні класифікатори, де розділення відбувається шляхом просіювання через сита з різними розмірами отворів. Зазвичай такий вид класифікації застосовується в практиці вуглезбагачення;
- скребкові класифікатори, принцип дії яких ґрунтується на осадженні грубозернистого матеріалу під дією сили тяжіння.

Ці методи є ефективними для грубозернистих матеріалів, однак у випадку тонкодисперсних систем ($<0,01$ мм) їх точність різко знижується через турбулентність і флокуляцію (злипання) дрібних частинок.

Гідравлічні методи. Для класифікації дрібних і дуже тонких матеріалів та підвищення продуктивності розділення за крупністю у виробництво концентратів впроваджено гідравлічні методи, серед яких особливе місце займають гідроциклони. Вони базуються на використанні відцентрових сил, що виникають під час закручення пульпи в спеціально сформованій конічній камері. Під впливом цих сил частинки більших розмірів або з вищою густиною зміщуються до стінок і виводяться через нижній отвір (піски), тоді як легші та дрібніші – через центральну трубку (злив).

На показники роботи гідроциклону впливають конструктивні й технологічні фактори. До конструктивних факторів належать: форма і геометричні розміри гідроциклону, піскової насадки, живильного і зливного патрубків, спосіб установки гідроциклону; до технологічних факторів: тиск на вході та властивості оброблюваної пульпи (вміст твердого, його ґранулометричний і речовинний склад) [2].

Гідроциклони в порівнянні з механічними класифікаторами більше витрачають електроенергії, не можуть класифікувати більш крупний матеріал, мають менш тривалі міжремонтні періоди. Основні їхні переваги – низька вартість, більші питома продуктивність і ефективність, малі габаритні розміри [2]. Саме гідроциклони залишаються найпоширенішим варіантом для мокрого розділення в середньому та дрібному класі крупності (0,020–0,200 мм) завдяки поєднанню простоти, швидкості та можливості автоматичного регулювання процесом.

В останні роки зростає інтерес до комбінованих схем класифікації, зокрема перемісної або каскадної класифікації, що дозволяє покращити селективність шляхом повторного проходження частинок через кілька ступенів гідроциклонування, знизити циркуляційне навантаження на млин, переподрібнення залізної руди і витрату електроенергії.

У роботі [3] дослідники виконали порівняльний аналіз роботи спіральних класифікаторів і циклонів у контурі подрібнення. У дослідженні використовувався кульовий млин. Показники щільності пульпи були однакові для обох тестів. Умовою проведення тесту було отримання у зливні D95 кл. – 0,106 мм. Під час проведення тестів установили, що в разі застосування спірального класифікатора продуктивність контуру становила 3,5 т/год, за циркуляційного навантаження – 3,03 т/год, при цьому вміст кл. – 0,106 мм був 94,32 %, тоді як під час роботи контуру із застосуванням гідроциклону продуктивність становила 3,05 т/год, а циркуляційне навантаження 6,68 т/год із вмістом кл. – 0,106 мм – 93,43 %. Розрахована потужність в умовах випробувань становила 22,06 кВт, при цьому питома витрата електроенергії в тесті зі спіральним класифікатором становила 6,3 кВт/т/год,

а в тесті з гідроциклоном – 7,2 кВт/т/год. За допомогою програмного моделювання дослідники додали ще одну стадію класифікації в гідроциклоні – класифікацію пісків основного гідроциклона для зниження циркуляційного навантаження, що дозволило знизити питому витрату електроенергії до 4 кВт/т/год. Також додавання додаткової класифікації дозволило покращити ефективність подрібнення.

Вплив тиску, діаметр піскових і зливних насадок та зміну глибини занурення зливного патрубку на ефективність класифікації вивчали дослідники в роботі [4]. У процесі роботи встановлено, що зміна діаметру зливної насадки має значний вплив на криву ефективності класифікації. Зі збільшенням діаметру спостерігалось знаходження як у зливів, так і в пісках більш грубіших зерен, що знижує ефективність класифікації і при цьому збільшує кількість зливного продукту. Вміст класу –0,025 мм за збільшення діаметру піскової насадки в зливів знизився з 47,09 % до 31,94 %. Дослідження якості класифікації за зміни глибини занурення зливного патрубка показало, що в разі занурення патрубка в циклон із 60 мм до 140 мм зменшується кількість дрібних фракцій класу –0,025 мм, які потрапляють у злив, з 40,73 % до 34,51 %, що знижує ефективність класифікації. За збільшення діаметру піскової насадки вміст класу –0,025 мм у зливів збільшився з 34,65 % до 57,02 %, ефективність класифікації збільшилась з 16,65 % до 47,26 %, але на 26,78 % зменшується кількісна ефективність. У разі збільшення тиску в гідроциклоні встановлено, що чим більше тиск, тим більше фракції –0,025 мм потрапляє у злив, ефективність класифікації збільшується з 10,49 % до 26,92 %, але знижується кількісна ефективність з 98,02 % до 91,77 %. Після проведених випробувань дослідники дійшли висновку, що основними факторами, які впливають на ефективність класифікації, є діаметр піскової насадки та вихідний тиск.

У роботі [5] було досліджено вплив перелісної класифікації промпродукту зливу магнітного дешламатора другого прийому в гідроциклонах 350 мм. У ході дослідження встановлено, що застосування перелісної класифікації дозволило збільшити вміст класу –0,045 мм у концентраті на 1 %, селективність процесу збагачення за параметром Хенкока-Луйкена збільшилась на 0,4–0,6 %, збільшилось вилучення заліза на 0,4–0,5 % і масова частка заліза в концентраті на 0,1–0,15 %, а також знизилась масова частка заліза, пов'язана з магнетитом, на 0,03 %.

Матеріали та методи дослідження.

У роботі визначався вплив роботи перелісної

класифікації зливу гідроциклонної установки 2-ої стадії класифікації промпродукту зливу магнітного дешламатора першого прийому на роботу 2-ої і 3-ої стадії класифікації на ефективність класифікації і вилучення класу –0,045 мм у злив і піски під час подрібнення магнетитових кварцитів.

На рисунку 1 наведено технологічну схему, яка була випробувана під час досліджень. Батарея гідроциклонів другої стадії класифікації складається з дистриб'ютора і шести гідроциклонів діаметром 350 мм. Живленням гідроциклонної установки є промпродукт першої і другої стадії мокрої магнітної сепарації. Злив гідроциклонів самопливом направляється в магнітний дешламатор першого прийому, а піски – у млин другої стадії подрібнення.

Продуктом перелісної класифікації, яка складається з дистриб'ютора і трьох гідроциклонів діаметром 350 мм, є промпродукт розвантаження магнітного дешламатора першого прийому. Піски перелісної класифікації самопливом потрапляють у млин другої стадії подрібнення, разом із пісками другої стадії класифікації, а злив самопливом направляється на третю стадію мокрої магнітної сепарації.

Для розрахунку ефективності класифікації в роботі використовувалась формула технологічної ефективності класифікації (Панюков-Механобр):

$$E = \frac{10\,000 \cdot (\beta - \alpha) \cdot (\theta - \alpha)}{\alpha \cdot (100 - \alpha) \cdot (\beta - \theta)},$$

де: α – вміст класу у вихідному продукті, %;

β – вміст цього ж класу в зливів, %;

θ – вміст цього ж класу в пісках, %;

E – ефективність класифікації, %.

На рисунку 2 наведено залежність умісту класу –0,045 мм у зливів, в пісках і ефективності класифікації за класом –0,045 мм від тиску в дистриб'юторі другої стадії класифікації в роботі перелісної класифікації.

Зміна тиску в батареї гідроциклонів другої стадії подрібнення в циклі з перелісною класифікацією майже не вплинула на ефективність класифікації. Максимальне значення ефективності класифікації було отримано за тиску 120 кПа і вмісту твердого нижче 37 %.

Залежність умісту класу –0,045 мм у зливів, в пісках та ефективності класифікації за класом –0,045 мм від тиску в дистриб'юторі другої стадії класифікації без перелісної класифікації наведено на рисунку 3.

При роботі без перелісної класифікації ефективність класифікації збільшилась і максимальний показник з ефективності класифікації

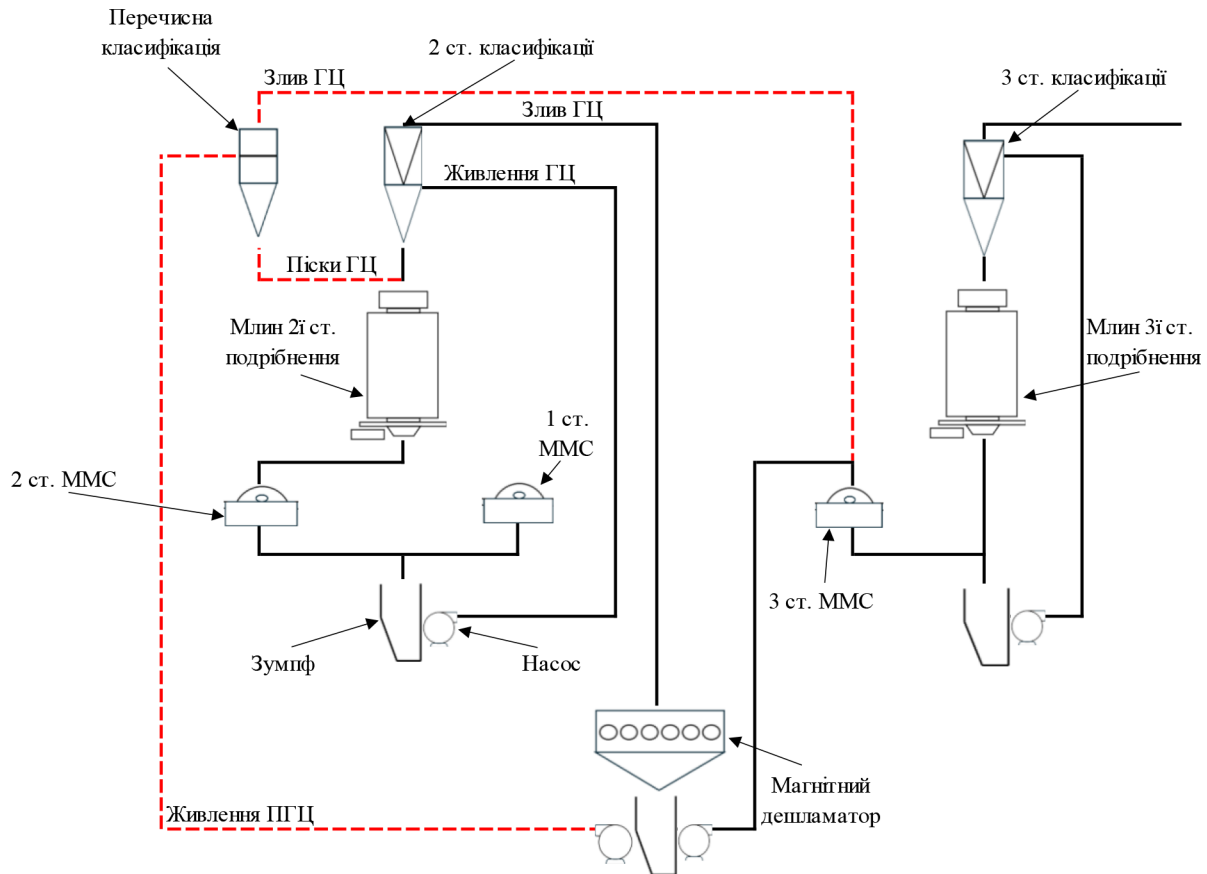


Рис. 1. Технологічна схема з перечисною класифікацією

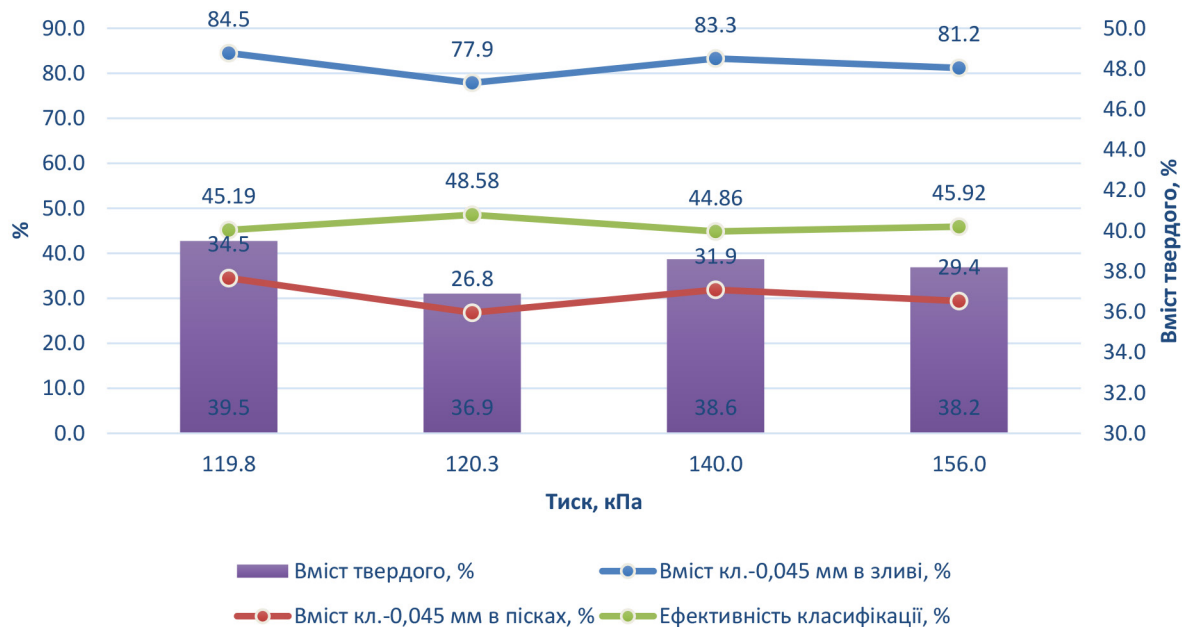


Рис. 2. Залежність вмісту класу $-0,045$ мм у зливі, в пісках і ефективності класифікації від тиску в дистриб'юторі другої стадії класифікації під час роботи перечисної класифікації

і вмісту класу $-0,045$ мм у зливі було отримано за тиску $154,5$ кПа. Спостерігається більш стабільна робота гідроциклонної установки, що виражено в зниженні вмісту класу $-0,045$ мм у пісках і стабілізації цього ж показника в зливі,

в порівнянні з роботою вузла з перечисною класифікацією.

У процесі роботи було відібрано продукти третьої стадії класифікації з роботою перечисної класифікації і без неї. На рисунку 4

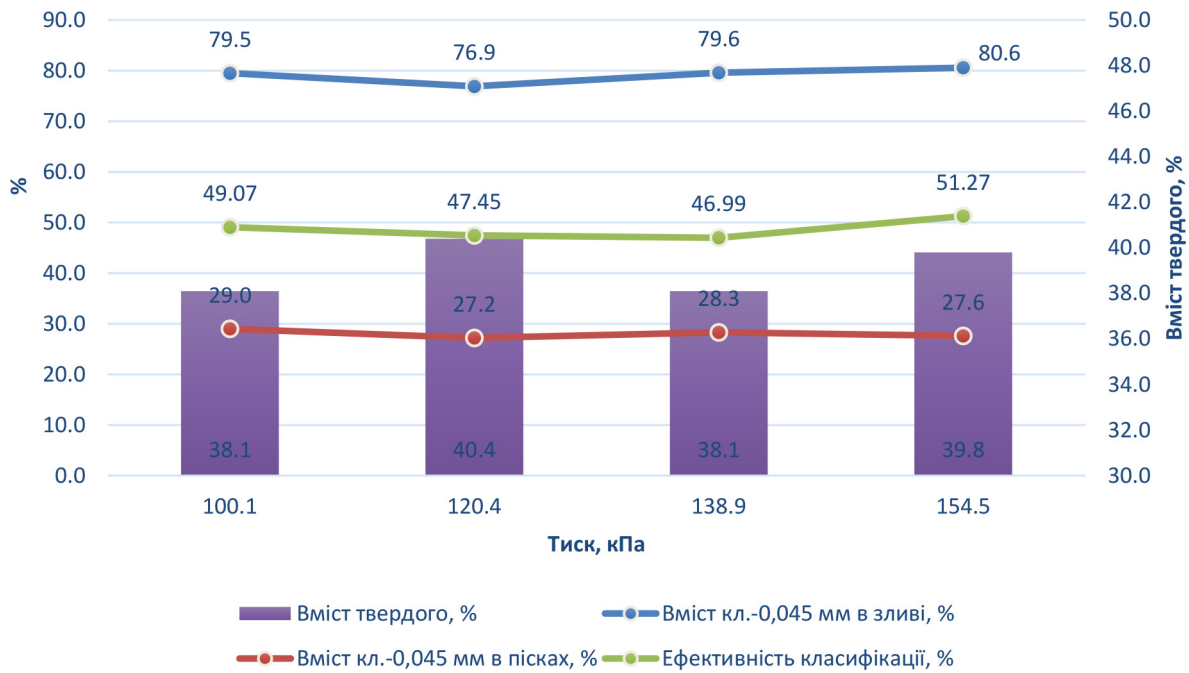


Рис. 3. Залежність умісту класу –0,045 мм у зливів, в пісках і ефективності класифікації від тиску в дистриб'юторі другої стадії класифікації без перемісної класифікації

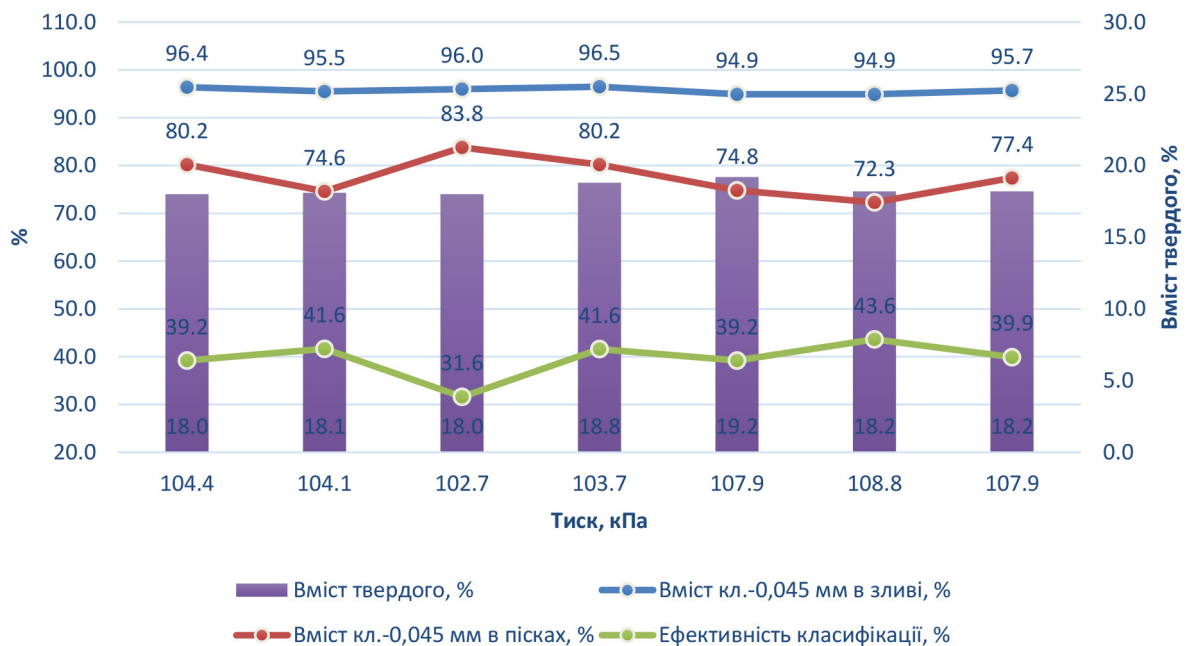


Рис. 4. Залежність умісту класу –0,045 мм у зливів, в пісках і ефективності класифікації третьої стадії під час роботи перемісної класифікації від тиску в дистриб'юторі

наведено залежність вмісту класу –0,045 мм у зливів, в пісках і ефективності класифікації по класу –0,045 мм під час роботи третьої стадії класифікації з перемісною класифікацією від тиску в дистриб'юторі.

Під час роботи третьої стадії класифікації і перемісної класифікації встановлено, що процес класифікації проходив не стабільно. Коливання ефективності класифікації від 31,6 % до 43,6 % і вмісту класу –0,045 мм у пісках коливалось від 72,3 % до 83,8 %.

Залежність умісту класу –0,045 мм у зливів, в пісках і ефективності класифікації за класом –0,045 мм під час роботи третьої стадії класифікації без перемісної класифікації від тиску в дистриб'юторі наведено на рисунку 5.

У результаті аналізу встановлено, що в роботі технологічної схеми без перемісної класифікації в циклі другої стадії подрібнення ефективність класифікації третьої стадії збільшується в середньому на 2 % за рахунок зниження вмісту класу –0,045 мм у пісках на понад 1,5 %.

Аналіз продуктів розділення перелісної класифікації наведено на рисунку 6 і 7.

У ході аналізу встановлено, що вміст класу $-0,045$ мм у зливі становить понад 91 %, що вище на 10 % від вмісту цього ж класу в зливі другої стадії основної класифікації. Але піски перелісної класифікації містять у собі понад 83 % класу $-0,045$ мм, що призводить до переподрібнення розкритих зерен магнетиту.

Висновки. У процесі роботи встановлено, що застосування перелісної класифікації з гідроциклонами діаметром 350 мм у циклі другої стадії подрібнення знижує ефективність класифікації в другій і третій стадії основної

класифікації і приводить до збільшення вмісту класу $-0,045$ мм у пісках, що призводить до збільшення циркуляційного навантаження і питомого навантаження на млин другої стадії подрібнення і другу стадію мокрої магнітної сепарації.

Піски перелісної класифікації містять понад 80 % класу $-0,045$ мм. Додаткове подрібнення класу $-0,045$ мм призводить до переподрібнення розкритих зерен магнетиту, що збільшує ризик флокуляції і виносу цінного компонента у відвальні хвости, або захоплення пустої породи в промпродукт і зниження якості концентрату.

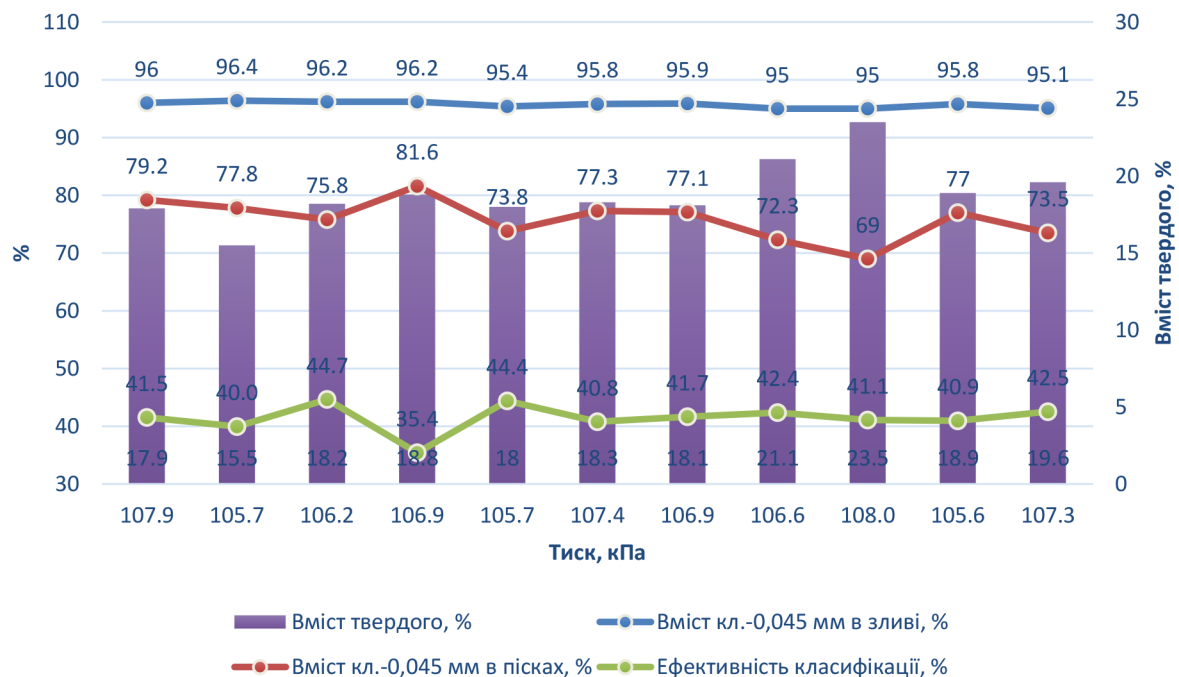


Рис. 5. Залежність умісту класу $-0,045$ мм у зливі, в пісках і ефективності класифікації третьої стадії класифікації без перелісної класифікації від тиску в дистриб'юторі

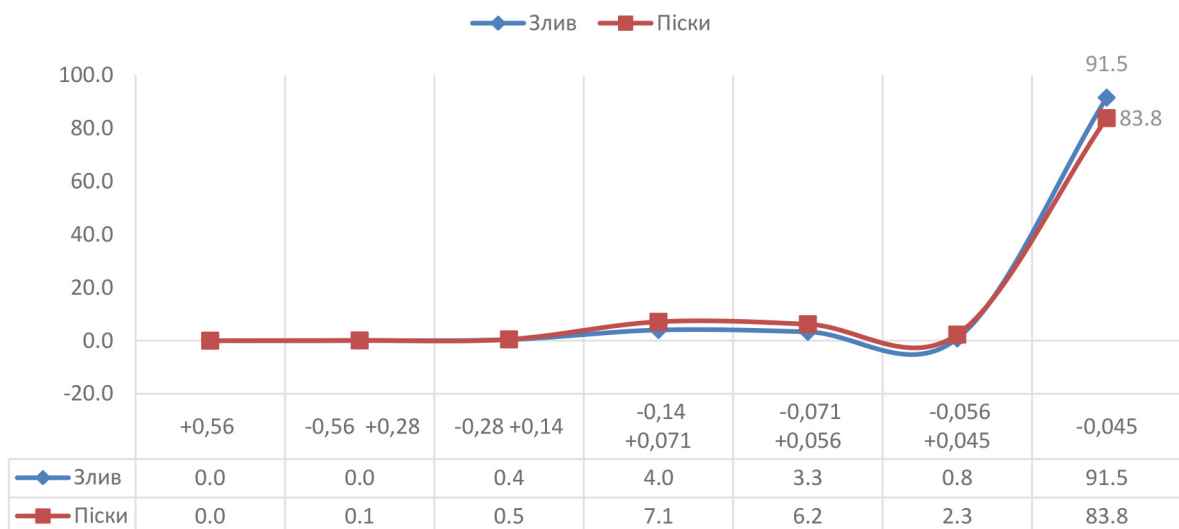


Рис. 6. Аналіз продуктів розділення перелісної класифікації

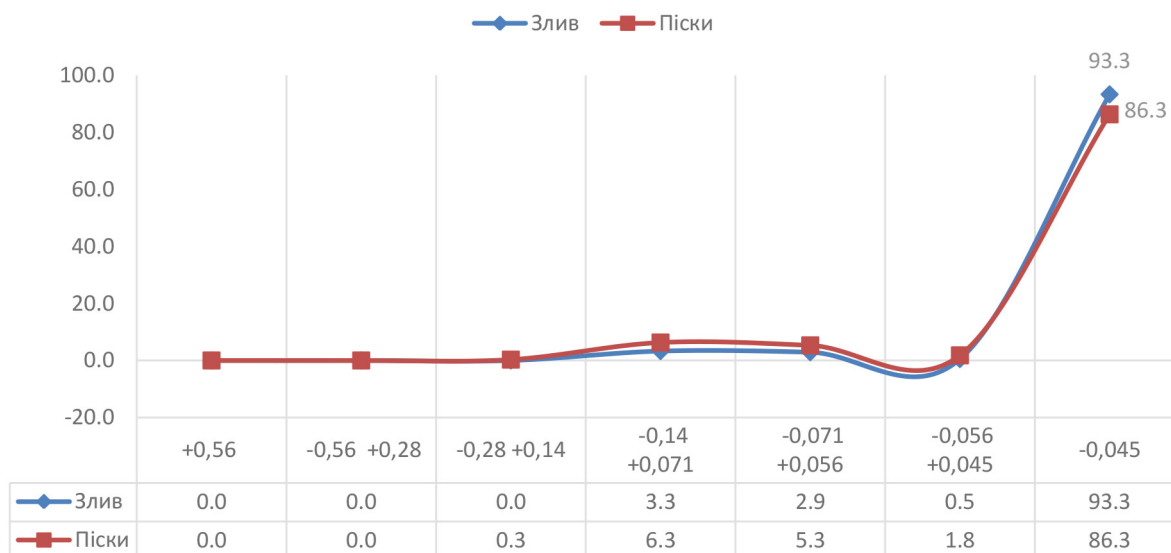


Рис. 7. Аналіз продуктів розділення перечисної класифікації

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кравець В. Г., Білецький В. С., Смирнов В. О. Техніка і технологія збагачення корисних копалин. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019. С. 77–87.
2. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин / В. С. Білецький та ін. Видавництво Ліра-К, 2020. С. 142–156.
3. Klaydison Silva, Ciro Massayuki, Deizimara Pena, Pedro Pinto. Comparative study between the use of cyclone and spiral classifier in the closing of grinding circuits. *38° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 9º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, 2008, vol. 3, num.3. DOI: 10.5151/2594-357x-0039
4. Lanyue Jiang, Peikun Liu, Yuekan Zhang, Xinghua Yang, Xiaoyu Li, Yulong Zhang and Hui Wang. The Performance Prediction Model of W-Shaped Hydrocyclone Based on Experimental Research. *Minerals*, 2021. <https://doi.org/10.3390/min11020118>
5. Олійник Т. А., Безсмертний Є. О., Удосконалення технологічного циклу класифікації в схемах збагачення магнетитових кварцитів. *Міжнародна науково-технічна конференція Розвиток промисловості і суспільства. Криворізький національний університет*. 2025. С. 20.

REFERENCES:

1. Kravets, V. H., Biletskyi, V. S., & Smyrnov, V. O. (2019). Tekhnika i tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn [Technique and technology of mineral processing]. KPI im. Ihoria Sikorskoho – KPI named after Ihor Sikorsky, 77–87. [in Ukrainian].
2. Biletskyi, V. S., Oliinyk, T. A., Smyrnov, V. O., & Skliar, L. V. (2020). Osnovy tekhniky ta tekhnolohii zbahachennia korysnykh kopalyn [Fundamentals of mineral processing techniques and technologies]. Vydavnytstvo Lira-K – Lira-K Publishing House, 142–156. [in Ukrainian].
3. Silva, K., Massayuki, C., Pena, D., & Pinto, P. (2008). Comparative study between the use of cyclone and spiral classifier in the closing of grinding circuits. *38° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 9º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, 3(3). <https://doi.org/10.5151/2594-357x-0039>
4. Jiang, L., Liu, P., Zhang, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, Y., & Wang, H. (2021). The performance prediction model of W-shaped hydrocyclone based on experimental research. *Minerals*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/min11020118>
5. Oliinyk, T. A., & Bezsmertnyi, Ye. O. (2025). Udoskonalennia tekhnolohichnoho tsykladu klasyfikatsii v skhemakh zbahachennia mahnetytovykh kvartsytiv [Improvement of the technological classification cycle in magnetite quartzite beneficiation schemes]. *Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia Rozvytok promyslovosti i suspilstva – International Scientific and Technical Conference “Development of Industry and Society”*, Kryvyi Rih National University, 20. [in Ukrainian].