

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.271.012.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/37>**Азарян В.А.**

Криворізький національний університет

КОМПУНОВАЛЬНИЙ ПРИНЦИП ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНИХ ДРОБИЛЬНО-СОРТУВАЛЬНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті розглянуто актуальну проблему стабілізації якісних показників у інтегрованому залізорудному вантажопотоці гірничо-збагачувальних комбінатів. Під час формування загального рудопотоку найбільшу нестабільність якості викликають видобувні забої приконтактної групи родовища, що мають великі показники засмічення; локальні рудні вантажопотоки із цих забоїв мають значні коливання вмісту корисного компоненту. Нестабільність якості загального рудопотоку ГЗК, що є вхідною сировиною збагачувального комплексу, негативно впливає на якість концентрату та підвищує собівартість продукції. Зниження якості концентрату та високі витрати на його виробництво негативно впливають на конкурентоздатність гірничовидобувних та переробних підприємств України. Збільшити вміст корисного компоненту у рудопотоках із забоїв приконтактної зони «руда – порода» та стабілізувати амплітудні коливання якості можливо у разі застосування мобільного дробильно-сортувального радіометричного комплексу, що відсікає некондиційну гірничу масу за встановленим «пороговим» значенням за наявності ознаки бінарності середовища. У запропонованому варіанті мобільного дробильно-сортувального радіометричного комплексу радіометричний модуль є окремим рухомих агрегатом, він просувається за дробильно-сортувальним комплексом. Головною ідеєю застосування цієї технологічної схеми є можливість відпрацювання тільки тієї частини забою, що має найбільший показник засмічення, з метою відсікання некондиційної гірничої маси і, таким чином, стабілізувати амплітудні коливання якості як локального, так і загального інтегрованого рудного вантажопотоку.

Запропонована технологічна схема з окремим розташуванням радіометричного модуля дає змогу отримати технологічний, економічний, екологічний та енергозберігаючий ефект та підвищити коефіцієнт використання екскаватора. Мобільні дробильно-сортувальні радіометричні комплекси можуть бути у подальшому застосовані під час відпрацювання техногенних залізорудних родовищ.

Ключові слова: гірничо-збагачувальний комбінат, радіометричне сортування, рудний вантажопотік, вміст корисного компоненту.

Постановка проблеми. Однією з найбільш актуальних проблем у галузі залізвидобувної та переробної промисловості України є необхідність підвищення якості кінцевого продукту – концентрату, що може бути вирішено як із застосуванням новітніх технологій збагачення, так і шляхом стабілізації якісних показників у вхідному інтегрованому рудному вантажопотоці гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК). Вирішення цієї проблеми разом зі зниженням собівартості виробництва є головною передумовою підвищення конкурентоздатності ГЗК України на світових ринках залізорудної сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що загальний інтегрований рудний вантажопотік формується шляхом змішування у від-

повідних пропорціях обсягів видобутої із різних забоїв руди [1, с. 45]. Вміст корисного компоненту у забоях кар'єрів відрізняється внаслідок природних чинників, що зумовлені генезисом родовища, а також технологічних факторів, що викликані процесами видобутку залізорудної сировини. Під час формування загального рудопотоку кар'єру найбільш негативний вплив на його якісні характеристики чинять не стільки забої з мінімальним вмістом корисного компоненту, скільки ті, що мають великі показники засмічення. Локальні рудні вантажопотоки з таких забоїв мають значні коливання вмісту корисного компоненту у часі; це значно знижує стабільність якості загального рудного вантажопотоку. Коливання якості загального інтегрованого рудопотоку ГЗК, що є вхідною

сировиною збагачувального комплексу, негативно відображується на кінцевих показниках роботи всього комбінату, знижуючи якість концентрату та підвищуючи собівартість продукції.

Найбільший показник утрат і разубожування руд припадає на видобувні блоки приконтатних зон «руда – порода». Відомо, що головною метою буровибухових робіт є руйнування масиву гірських порід, що є передумовою наступного етапу – видобувних робіт. У процесі руйнування масиву відбувається перемішування шарів гірських порід, що його становлять. Під час підривання блоків приконтатних зон на контурі «руда – порода» внаслідок перемішування корисної копалини з порожньою породою відбувається різке зниження вмісту корисного компоненту. Так, за даними Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», показник засмічення у блоках приконтатної зони кар'єру № 3 сягає 28% (рис. 1).

Вирішити проблему підвищення якості під час видобутку залізних руд дає змогу застосування радіометричного сортування. Принцип радіометричного сортування побудовано на існуючій залежності величини потоку відбитого гамма-випромінювання від вмісту корисного компоненту в руді. Підвищення вмісту корисного компоненту відбувається за рахунок відсікання некондиційної гірничої маси.

Упроваджені за кордоном в умовах окремих кар'єрів дробильно-сортувальні комплекси радіометричного сортування мають стаціонарне розміщення.

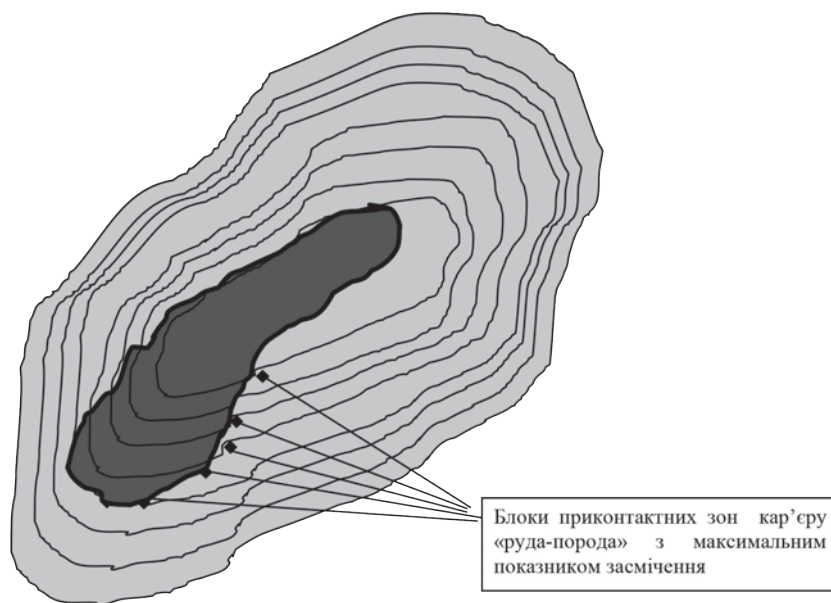


Рис. 1. Розташування блоків залізрудного кар'єру з максимальним показником засмічення

Після виймання рудної маси із забою її необхідно доправити до приймального бункера дробильно-сортувального комплексу. Промпродукт та хвосты сепарації також потрібно переміщувати додатковою транспортною ланкою [2, с. 75]. Технологічний та економічний ефект від підвищення якості залізрудної сировини знижується внаслідок значних додаткових витрат.

Теоретичною базою для впровадження радіометричного сортування в умовах відкритого видобутку залізної руди є проведені дослідження, результати яких відображено у наукових трудах А.А. Азаряна, А.Ю. Большакова, Г.М. Малахова, В.А. Мокроусова, А.М. Марюти, Є.П. Лемана, В.І. Ревнівцева та багатьох інших учених, що працювали у цьому напрямі.

Для оцінки поглинаючих і розсіюючих властивостей гетерогенних середовищ раніше було запропоновано використання технологічного терміна «ефективний атомний номер» (Z_{ef}), суть якого полягає у тому, що він є атомним номером фіктивного хімічного елемента, якому притаманний такий самий ефект фотопоглинання на одиницю електронної щільності, як і речовині складного хімічного складу. При цьому Z_{ef} не залежить від відмінностей хімічних зв'язків або ж фізичного стану середовища [3, с. 253]

Було встановлено межі бінарного та квазібінарного середовища для подальшого використання в радіометричному сортуванні під час розпізнавання образів «руда» або «порода», для чого за корисний сигнал було прийнято про-

порційне значення Z_{ef} проби, а за сумарне значення «зайвих факторів» – Z_{ef} наповнювача. Співвідношенням цих даних було доведено, що якщо Z_{ef} проби відрізняється від Z_{ef} наповнювача на 10% та більше, застосування гамма-гамма методу є обґрунтованим, що дає змогу розпізнавати та виділяти образ «руда» у загальному обсязі гірничої маси.

Раніше дослідженнями було встановлено, що якщо співвідношення $Z_{ef,проби}/Z_{ef,наповнювача}$ дорівнює 1,1, то це характеризує середовище, що досліджується, як квазібінарне. За співвідношення $Z_{ef,проби}/Z_{ef,наповнювача} \geq 1,2$ середовище відноситься до бінарного, при цьому ймовір-

ність розпізнавання образу «руда» у загальному обсязі гірничої маси становить 95%. На підставі цього було зроблено висновок, що основні різновиди залізних руд Кривбасу порівняно з пустими породами відносяться до бінарного середовища, вони можуть бути піддані радіометричному сортуванню з вірогідністю до 95% [3, с. 264].

Сучасні технології попереднього збагачення в умовах відкритого розроблення залізрудних родовищ передбачають застосування комплексів магнітної сепарації, що розміщуються безпосередньо у кар'єрах. Але треба підкреслити, що не всі різновиди залізних руд мають магнітний складник, тому застосування до них магнітних сепараторів не буде ефективним.

Постановка завдання. Відомо, що чим ближче до зони видобутку відбудеться вилучення некондиційної гірничої маси з подальшого процесу транспортування і переробки, тим суттєвішим буде ефект від сортування [4, с. 24]. Тому завданням дослідження є побудова компонуванняльної схеми радіометричного комплексу так, щоб відсікання некондиційної відбувалося у зоні, яка найбільш наближена до забою. Саме тому цей технологічний комплекс повинен мати мобільність, щоб переміщуватися за просуванням забою. Разом із цим радіометричної сепарації не може бути піддана гірнична маса без її підготовки внаслідок різнофракційного складу. Теоретичні та практичні умови цього виду сортування мають вимоги щодо розподілу на фракції, тобто необхідне проведення попереднього подрібнення гірських порід [5, с. 11]. Із цією метою у технологічному комплексі передбачено використання дробильно-сортувального агрегату, що також має функцію мобільності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Поєднання мобільного дробильно-сортувального агрегату та радіометричного модуля запропоновано як головний компонуванняльний принцип мобільного радіометричного комплексу. Техно-

логічною передумовою застосування цих комплексів у залізрудних кар'єрах є можливість відсікання некондиційної гірничої маси безпосередньо у видобувних забах приконтатної зони родовища. Прототипами мобільного радіометричного комплексу є стаціонарні радіометричні сепаратори типу РАС-2 і РС-2Ж, що були розроблені в лабораторії контролю якості Криворізького національного університету і раніше пройшли випробування на рудах Криворізького залізрудного басейну. Принцип радіометричного сортування цих сепараторів побудований на так званому «порозі сортування»: рудна маса, яка пройшла через сепаратор, матиме вищий показник умісту загального заліза, ніж встановлене «граничне» значення. Результатом випробувань із сортування кускової руди було отримання промпродукту з підвищенням умісту заліза загального на 11,5–16,8% відносно первинних значень [3, с. 272].

Мобільний дробильно-сортувальний радіометричний комплекс (МДСРК) використовує синергетичний ефект від поєднання мобільного дробильного комплексу і радіометричного сепаратора, який полягає у можливості здійснення відсікання некондиційної гірничої маси.

Технологічну схему з використанням МДСРК наведено на рис. 2. Вона складається з екскаватора (1), мобільного дробильно-сортувального агрегату (2), радіометричного модуля (3), рухомого бункера (4), самоскиду (5) та відрізняється від раніше запропонованої схеми тим, що РМ виконано окремим технологічним модулем без інтегрування у серійний мобільно-сортувальний комплекс. Це зумовлено тим, що переобладнання та монтаж радіометричного сепаратора на шасі комплексу буде неминуче пов'язано з нестачею простору або можливими порушенням діючої технологічної схеми.

Радіометричний модуль (РМ) є рухомих, він просувається за мобільним дробильно-сортувальним комплексом, а той, своєю чергою, –

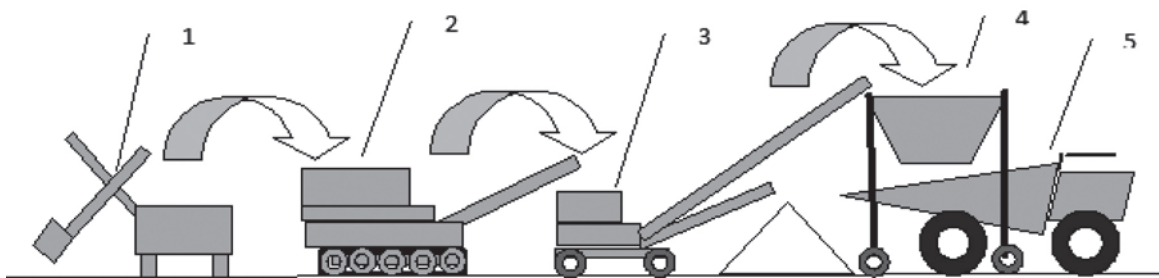


Рис. 2. Технологічна схема із застосуванням МДСРК

за просуванням забою. Технологічно мобільна дробарка поєднана з РМ через консольний розвантажувач та приймальний бункер модуля. РМ здійснює відсікання некондиційної гірничої маси за встановленим порогом сортування з використанням описаного вище принципу бінарності середовища.

Головною ідеєю застосування даної технологічної схеми є можливість відпрацювання саме тієї частини забою, що має найбільший показник засмічення внаслідок перемішування підірваної гірничої маси у видобувному блоці. Тобто весь обсяг руди у забої умовно ділиться на частину, що може бути відвантажено без переробки у самоскиди, і частину, що повинна пройти через МДСРК.

Необхідність застосування дробарки зумовлена вимогами до підготовки рудної маси для сортування шляхом забезпечення сталої крупності 50–100 і 100–300 мм залежно від умов сортування.

Для запропонованого комплексу найбільш доцільні мобільні дробарки серійного виробництва Terex Finlay J-1160 або Lokotrack LT110, що мають паспортну продуктивність до 200 т/год. [6]. Це викликано тим, що продуктивність РМ не перевищує цей показник унаслідок технічних можливостей сепаратора.

Для МДСРК визначено такий порядок роботи: рудна маса екскаватором 1 завантажується в приймальний бункер мобільного дробильно-сортувального комплексу 2, де подрібнюється.

Подрібнена рудна маса подається через розвантажувальну консоль у приймальний бункер радіометричного модуля 3, звідки вібраційним живильником подається у зону вимірювання, де піддається впливу гамма-випромінювання. Залежно від інтенсивності потоку відбитого випромінювання шибєрний пристрій відхиляється на певний кут та, таким чином, розділяє рудну масу, відсікаючи породу з умістом корисного компонента, нижчим за показник встановленого «порогу». Отриманий промпродукт завантажується через накопичувальний бункер 4 у самоскиди 5, а відбита пуста порода або складається у вигляді внутрішнього відвалу в зоні нижньої бровки уступу, якщо габарити робочої площадки це дозволяють, або через окремий накопичувальний бункер теж завантажується у транспортні засоби з подальшим транспортуванням. За можливості складування пустих порід у певному стаціонарному обсязі у відпрацьованому просторі на граничному контурі кар'єру застосування технологічної схеми МДСРК може забезпечити додатковий екологічний ефект.

Слід підкреслити, що основною технологічною перевагою МДСРК порівняно зі стаціонарними

аналогами є його мобільність, яка дає змогу переміщуватися за просуванням видобувного забою, здійснюючи відокремлення некондиційної рудної маси у точці, що найбільш наближена до забою. При цьому не потрібна додаткова транспортна ланка, знижуються витрати за рахунок виключення необхідності підготовки та будівництва площадки та капітальних споруд, в яких зазвичай розміщуються стаціонарні радіометричні комплекси.

Застосування даної технологічної схеми також дає змогу підвищити коефіцієнт використання екскаватора так: під час обміну автосамоскидів у забої екскаватор не простоює, а виконує додатковий цикл, завантажуючи приймальний бункер мобільної дробарки, тим самим забезпечуючи її та радіометричний модуль сировиною для переробки. Після обміну автосамоскидів екскаватор продовжує працювати у звичайному режимі. Наявність у технологічному ланцюгу накопичувальних бункерів, що виконують роль компенсаторів, робить схему більш гнучкою та надійною, а бункер із промпродуктом дає змогу зробити відвантаження автосамоскиду одномоментним, зменшуючи його простої до можливого мінімуму.

Технологічний ефект від застосування радіометричного комплексу полягає у можливості підвищення якості локального рудного вантажопотоку із забоїв приконтатних зон кар'єру до 5%, ураховуючи те, що приблизно третина обсягу рудної маси буде піддана сепарації, й її вміст підвищиться в середньому до 15%. Стабілізація коливань якості у локальних рудопотоках із забоїв приконтатних зон кар'єру призведе до зниження амплітудних значень умісту корисного компонента загального інтегрованого рудного вантажопотоку ГЗК, який є вхідною рудою збагачувального комплексу, що дасть змогу підвищити значення виходу концентрату (вирази 1, 2). Виходячи з комплексного критерію оцінки ефективності управління рудопотоком [3, с. 312]:

$$F_1 = (\alpha_{\text{факт.}} - \alpha_{\text{план.}}) \frac{\varepsilon}{\beta} \times Q_p \times C_4 \quad (1)$$

або

$$(\varepsilon \frac{\alpha_{\text{факт.}}}{\beta} - \varepsilon \frac{\alpha_{\text{план.}}}{\beta}) \times Q_p \times C_4 \rightarrow \min \quad (2)$$

У забоях приконтатної зони родовища відбудеться зниження загального обсягу рудної маси, що спрямовується на переробку, за підвищення вмісту корисного компонента, що призведе до зниження витрат збагачувального комплексу та дасть змогу отримати додатковий обсяг концентрату. За умови константності цін реалізації приріст випуску концентрату призведе до підвищення прибутку ГЗК.

Економічний ефект від упровадження технологічної схеми з МДСРК полягає в отриманні більш якісного концентрату. Залізородний концентрат за вмісту заліза загального 65% має ціну реалізації \$150/т, а кожен додатковий відсоток якості в продукті, вищий за 65%, має додаткову прибавку від \$3 до \$9 за т. Якщо брати в розрахунок у середньостроковому періоді ціну реалізації концентрату на рівні \$100/т та консервативну цінову прибавку у \$3/т за кожний додатковий 1% вмісту заліза загального, то збільшення виходу концентрату на 1% за умов його виробництва на рівні 50 млн т у межах Криворізького залізородного басейну призведе до додаткового надходження 500 тис т концентрату та отримання підприємствами під час його продажу додаткових \$50 млн на рік. Підвищення якості концентрату підприємств Кривбасу лише на 0,5 % дасть змогу під час реалізації продукції отримати \$82,5 млн на рік. Сумарний очікуваний ефект від застосування технологічної схеми з МДСРК становить \$132,5 млн на рік.

Слід також зазначити як подальший напрям досліджень, що запропонований комплекс також може бути використаний під час відпрацювання техногенних залізородних родовищ. У Кривбасі,

за різними оцінками, у відвалах знаходиться 13 млрд т розкритих порід, а у хвостосховищах – до 6 млрд т відходів збагачення бідних залізних руд. В останні роки все активніше досліджується можливість використання накопиченої у відвалах та хвостосховищах Криворізького басейну мінеральної маси [7, с. 3]. Більшу частину цих відвалів становлять низькокондиційні залізні руди, які не мають магнітного складника. Ці руди є важко збагачуваними, але в майбутньому ці техногенні родовища неминуче будуть піддані переробці, і одним зі способів попереднього збагачення є застосування радіометричної сепарації за допомогою МДСРК.

Висновки. Запропонована технологічна схема мобільного дробильно-сортувального радіометричного комплексу з окремим розташуванням радіометричного модуля дає змогу отримати певний технологічний, економічний, екологічний та енергозберігаючий ефект.

Застосування даної схеми дає змогу підвищити коефіцієнт використання екскаватора.

МДСРК у подальшому також може бути використаний під час відпрацювання техногенних залізородних родовищ.

Список літератури:

1. Бызов В.Ф. Управление качеством продукции карьеров : учебник. Москва, 1991. 239 с.
2. Федоров М.Ю. Основные технические и конструктивные принципы рентгенорадиометрических сепараторов РАДОС. III междунар. науч.-технич. конф. «Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных отходов». Екатеринбург, 2007. С. 70–79.
3. Азарян В.А. Технологіко-теоретичні засади управління якістю залізвмісної сировини генералізованого комплексу рудопотоків гірничо-збагачувальних комбінатів : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.03 «Відкрита розробка родовищ корисних копалин». Кривий Ріг, 2019. 376 с.
4. Ревнивцев В.И., Леман Е.П., Кротков М.И. Рентгенорадиометрический метод в комплексной системе управления качеством руд. *Обогащение руд*. 1983. № 5. С. 24–25.
5. Мокроусов В.А., Остроумов Г.В., Кузнецов А.П. Применение радиометрических методов для обогащения полезных ископаемых. *Обогащение руд*. 1985. № 5. С. 10–12.
6. URL: <http://www.tehnoplaza.kiev.ua/drobilno-sortirovochnye-kompleksy/>.
7. Вилкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.А. Переработка и комплексное использование минерального сырья техногенных месторождений. *Гірничий вісник*. 2013. № 96. С. 3–10.

Azarian V.A. COMPOSING PRINCIPLE AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF APPLICATION OF MOBILE CRUSHING AND SORTING RADIOMETRIC COMPLEXES

The topical issue of stabilizing qualitative indicators in the integrated iron ore cargo flow at mining and processing plants is considered in the article. During the total ore flow formation, the highest quality instability is caused by the mining extraction face of the deposit contact group with high clogging rates; local ore cargo flows from such faces have significant fluctuations in the useful component content. The quality instability of the total ore flow from MPP, which is the input raw material of the ore mining and processing plant, negatively affects the concentrate quality and increases the cost of production. Decreased quality of concentrate and high costs of its production negatively affect the competitiveness of mining and processing plants in Ukraine. The useful component content in ore flows from the face of the contact zone "ore-rock" may be increased and the amplitude fluctuations of quality can be stabilized in applying mobile crushing and sorting radiometric complex cutting off the off-specification run-of-mine at the set "threshold" value in the presence of binary environment sign. The radiometric module is a separate mobile unit in the proposed option of the mobile

crushing and sorting radiometric complex. It moves along the crushing and sorting complex. The main idea of this process flow diagram is the ability to work only the part of the face with the highest clogging rate in order to cut off off-specification run-of-mine and, thus, to stabilize the amplitude fluctuations in quality for both local and total integrated ore cargo flow.

The proposed process flow diagram with a separate location for the radiometric module provides obtaining technological, economic, environmental and energy saving effect and increases the excavator utilization. Mobile crushing and sorting radiometric complexes may be further used in the development of technogenic iron ore deposits.

Key words: *ore mining and processing plant, radiometric sorting, ore cargo flow, useful component content.*