

УДК 622.271

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-40>

## АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ КОМПЛЕКСНОЇ МЕХАНІЗАЦІЇ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ ЗА ЗМІНИ БОРТОВОГО ВМІСТУ КОРИСНОГО КОМПОНЕНТА

**Григор'єв Юліан Ігорович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри відкритих гірничих робіт  
Криворізького національного університету  
ORCID ID: 0000-0002-1780-5759

**Пилипчук Давид Ігорович,**

аспірант  
Криворізького національного університету  
ORCID ID: 0009-0000-9719-286X

**Лебеденко Володимир Володимирович,**

аспірант  
Криворізького національного університету  
ORCID ID: 0009-0006-4185-4098

**Луценко Сергій Олександрович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри відкритих гірничих робіт  
Криворізького національного університету  
ORCID ID: 0000-0002-5992-3622

**Перебудов Юрій Володимирович,**

кандидат технічних наук  
ORCID ID: 0009-0005-9857-8998

Управління бортовим вмістом є важливим інструментом адаптації відкритих гірничих робіт, що визначає економічну ефективність виробничого циклу. Традиційні підходи до визначення оптимального бортового вмісту базуються на припущенні сталих економічних умов та незмінних параметрів. Однак сучасні ринкові умови характеризуються високою мінливістю цін, невизначеністю витрат на розроблення родовищ і нестабільністю інших економічних факторів. У роботі наведено аналіз наукових джерел щодо методів управління бортовим вмістом від класичних детерміністичних підходів до сучасних стохастичних моделей. На основі виконаного аналізу виявлено потребу в технологічній адаптації якісних амплітудно-частотних характеристик вантажопотоку. Для зниження операційних витрат пропонується використання мобільних дробарно-перевантажувальних комплексів у складі циклічно-поточної технології. Запропоновано підхід до розв'язання динамічної задачі вибору точки розташування перевантажувального пункту для мінімізації відстані транспортування автомобільним транспортом і стабілізації якісних показників вантажопотоку. Власне оптимізацію пропонується виконувати симплекс-методом у два етапи: на першому – визначення добових обсягів руди з кожного забою; на другому – визначення центру мас вантажопотоку з урахуванням вимог до якості шихти. Побудовано математичну модель установа координат перевантажувального пункту для типових умов глибоких залізрудних кар'єрів. Розраховано оптимальне положення перевантажувального пункту.

Результати досліджень можуть бути корисними для проєктних організацій і технічних відділів гірничодобувних підприємств для визначення кроку перенесення перевантажувальних пунктів і вдосконалення систем управління транспортом.

**Ключові слова:** бортовий вміст, мобільний дробарно-перевантажувальний комплекс, математичне моделювання, стохастична оптимізація, динамічне середовище господарювання, якість вантажопотоку.

**Hryhoriev Yulian, Pylypchuk Davyd, Lebedenko Volodymyr, Lutsenko Serhii, Peregudov Yurii.**  
**Adaptive management of comprehensive mechanization parameters for open pit mining operations under changing cut-off grade of mineral resource**

*Cut-off grade management is an important tool for adapting open pit mining operations that determines the economic efficiency of the production cycle. Traditional approaches to determining optimal cut-off grade are based on assumptions of stable economic conditions and constant parameters. However, modern market conditions are characterized by high price volatility, uncertainty in deposit development costs, and instability of other economic factors. The work presents an analysis of scientific sources regarding cut-off grade management methods from classical deterministic approaches to modern stochastic models. Based on the conducted analysis, the need for technological adaptation of qualitative amplitude-frequency characteristics of material flow has been revealed. To reduce operating costs, it is proposed to implement mobile crushing and rehandling complexes within cyclical-streaming technology. An approach is proposed for solving the dynamic problem of selecting the location point of the reloading station to minimize truck transportation distance and stabilize qualitative indicators of material flow. The optimization itself is proposed to be performed using the simplex method in two stages: first – determining daily ore volumes from each working face; second – determining the center of mass of material flow considering charge quality requirements. A mathematical model has been developed for establishing the coordinates of the reloading station for typical conditions of deep iron ore pits. The optimal position of the reloading station has been calculated.*

*The research results can be useful for design organizations and technical departments of mining enterprises for determining the step of relocating reloading stations and improving transportation management systems.*

**Keywords:** cut-off grade, mobile crushing-reloading complex, mathematical modeling, stochastic optimization, dynamic business environment, material flow quality.

**Вступ.** Концепція бортового вмісту відіграє фундаментальну роль у теорії та практиці гірничозбагачувального виробництва, особливо в контексті відкритої розробки родовищ корисних копалин. Цей критичний параметр виконує функцію класифікатора сировини на кондиційні, умовно-кондиційні та некондиційні копалини.

Визначення оптимального бортового вмісту є динамічною багатофакторною задачею, яка безпосередньо впливає як на технічні, так і на економічні показники гірничого підприємства. Водночас цей параметр суттєво впливає на параметри вантажопотоків, ефективність використання мінеральних ресурсів і режим гірничих робіт шляхом формування обсягів розкритих порід.

В умовах мінливості світових ринків на залізну руду та геологічної невизначеності родовищ процес обґрунтування вибору економічно доцільної величини бортового вмісту і відповідних параметрів комплексів механізації, що перебувають у технологічному зв'язку з ними, потребує особливого підходу. Розв'язання цієї задачі потребує застосування стохастичних методів оптимізації з урахуванням оцінювання ризиків під час гірничо-технічного планування [1].

**Метою статті** є огляд та критичний аналіз сучасних підходів до визначення бортового вмісту в умовах економічної невизначеності та встановлення для нього оптимальних параметрів комплексів механізації.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Формування науково-теоретичної бази визначення величини бортового вмісту розпочалося у 1970-х роках як результат поєднання економічної теорії з гірничим плануванням. Цей період характеризувався зростанням складності

гірничо-геологічних умов експлуатації родовищ та необхідністю застосування більш досконалих методів економічного обґрунтування гірничо-технічних рішень.

Основоположна робота Г. Тейлора [9] надала теоретичну основу економіко-математичного підходу до визначення якості рудної маси. Автор описав оптимізацію бортового вмісту як задачу розподілу сировини на дві категорії з урахуванням аналізу граничних економічних показників.

Теоретична модель Тейлора базується на принципі традиційної економічної теорії – рівності граничного доходу та граничних витрат. У контексті гірничого виробництва цей принцип передбачає встановлення такого рівня бортового вмісту  $g^*$ , за якого граничний дохід від перероблення останньої тонни руди дорівнює сукупним граничним витратам на її видобуток, транспортування та збагачення:

$$MC(g^*) = MC_{\{mining\}}(g^*) + MC_{\{processing\}}(g^*) \quad (1)$$

де  $MR(g^*)$  – граничний дохід від перероблення руди з вмістом корисного компонента  $g^*$ ;

$MC_{\{mining\}}(g^*)$  – граничні витрати на видобуток руди із вмістом  $g^*$ ;

$MC_{\{processing\}}(g^*)$  – граничні витрати на перероблення руди із вмістом  $g^*$ .

Головна новизна підходу Тейлора ґрунтувалася на створенні поняття економічної межі якості сировини як змінного показника, який залежить від цін на продукцію та витрат підприємства.

Революційний внесок у розвиток теорії оптимального бортового вмісту здійснив К. Лейн (1988) у монографії [5]. Модель Лейна значно покращила простий підхід Тейлора, додавши складну багатофакторну оптимізацію, що

враховує технологічні обмеження гірничозбагачувального комплексу. Алгоритм Лейна базується на математичному підході, що враховує основні обмеження виробничого процесу в гірничо-металургійній галузі. Цей метод одночасно аналізує три ключові вузькі місця технологічного ланцюга. Перше обмеження охоплює металургійне виробництво та визначає максимальну спроможність перероблення концентратів у готову товарну продукцію. Друге обмеження пов'язане зі збагаченням руди і визначає її кількість, яку може переробити фабрика. Останнє обмеження стосується максимальної продуктивності видобувного комплексу і є фундаментальним для забезпечення безперервності та рентабельності гірничих робіт, особливо в глибоких залізрудних кар'єрах. Традиційні екскаваторно-автомобільні комплекси зі збільшенням глибини кар'єрів зіштовхуються зі значним зростанням відстаней транспортування, що призводить до підвищення експлуатаційних витрат та зниження загальної ефективності.

У цьому контексті мобільні дробарно-перевантажувальні комплекси (МДПК), зокрема і напівмобільні, набувають особливої актуальності. Впровадження напівмобільних дробарно-конвеєрних комплексів дозволяє встановлювати дробарний бункер ближче до робочої зони кар'єру, тим самим скорочуючи відстань транспортування автосамоскидів [3]. Це забезпечує передачу вже подрібненої руди на конвеєрний транспорт, який порівняно з автотранспортом є значно економнішим за рахунок зменшення відстані транспортування та експлуатаційних витрат.

Проте, незважаючи на очевидні переваги, впровадження МДПК характеризується низкою обмежень, що пов'язані з високими капітальними витратами, складністю проєктування, недостатньою гнучкістю, залежністю від безперервної роботи та детального короткострокового планування, що безпосередньо впливають на реалізацію максимальної продуктивності кар'єру [8]. Основними чинниками високих капітальних витрат є вартість дробильного обладнання, конвеєрних ліній та супутньої інфраструктури, що забезпечує їх транспортування та експлуатацію. Зазвичай обсяги гірничодобувних робіт повинні бути досить високими, щоб виправдати вартість комплексів, тому впровадження МДПК вимагає ретельного техніко-економічного обґрунтування [7]. Оптимізація виробничого планування з напівмобільними дробарно-перевантажувальними комплексами потребує інтеграції рішень щодо послідовності виїмки, переміщення дробарки, положення

конвеєрного тракту та інвестицій у вантажний парк. Критично важливим для ефективної роботи МДПК є безперервний потік руди необхідної якості від бункера до збагачувальної фабрики, оскільки перебої можуть призвести до простоїв, що своєю чергою негативно відобразиться на загальній продуктивності гірничодобувного та переробного комплексу [4]. Тому система повинна бути досить гнучкою в контексті простоїв, пов'язаних з ремонтними, обслуговуваними роботами та для адаптації до мінливих гірничо-геологічних умов. На останні показники впливають міцність гірських порід, фрагментація, ширина конвеєра та абразивність матеріалу [6]. Як наслідок, упровадження МДПК на глибоких кар'єрах потребують ретельного планування гірничих робіт, включаючи управління вантажопотоками та відповідне розташування мобільних дробарок [2].

Таким чином, для досягнення максимальної продуктивності та мінімізації експлуатаційних витрат на транспортування необхідне визначення оптимальної точки розташування перевантажувального пункту і відповідного кроку його перенесення.

Крім того, правильне місце розташування бункера з урахуванням якісних характеристик руди дозволяє не лише оптимізувати рудні потоки, а й забезпечити максимально рівномірну подачу руди сталої якості, що мінімізує її амплітудно-частотні коливання. Це критично важливо для ефективної роботи збагачувального комплексу, який потребує рівномірного та передбачуваного навантаження.

**Результати.** Розглянемо задачу визначення оптимального місця розташування бункера МДПК між двома робочими забоями, враховуючи продуктивність гірничого обладнання, якість руди і необхідність досягнення заданого бортового вмісту залізної руди. Розглянемо типові умови експлуатації екскаваторно-автомобільного комплексу глибокого залізрудного кар'єру:

- Забій А: – якість руди  $Fe_A = 30,5 \%$ ;
- максимальна добова продуктивність  $Q_A = 40\ 000$  т/доб.;
- координата  $X = 0$  м
- Забій В: – якість руди  $Fe_B = 26 \%$ ;
- максимальна добова продуктивність  $Q_B = 25\ 000$  т/доб.;
- координата  $X = 4800$  м.

Загальна відстань між забоями А та В – 4800 м.

Цільова середня якість рудної маси на бункері  $Fe_{сер} = 28 \%$ .

Розв'язання задачі пропонується з використанням функціоналу «Solver» у Microsoft Excel.

Власне для оптимізації слід використовувати симплекс-метод, достатній для лінійних обмежень нашої задачі.

Передусім постає задача визначення оптимальних добових обсягів руди з кожного забою, які дозволять досягти цільової якості залізної руди та, відповідно, визначити положення бункера [8].

Усереднена якість рудопотоку, що надходить у бункер, буде розраховуватись за формулою  $Fe_{сер}$ :

$$Fe_{сер} = \frac{Q_A \cdot Fe_A + Q_B \cdot Fe_B}{Q_A + Q_B}. \quad (2)$$

Обмеження математичної моделі для обсягів видобутку:

Змінні  $Q_A$ ,  $Q_B$  обмежені максимальною добовою продуктивністю кожного екскаватора:

$$\begin{cases} Q_A \leq 40\,000 \text{ т/доб.} \\ Q_B \leq 25\,000 \text{ т/доб.} \\ Q_A \geq 0, \quad Q_B \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

На наступному кроці пропонується визначення центру мас вантажопотоку з урахуванням вимог до якості шихти, тобто оптимального місця розташування бункера з урахуванням якості.

Для розрахунку оптимальної координати бункера ( $X_{бункера}$ ), пропонується формула (4):

$$X_{бункера} = \frac{(Q_A \cdot X_A \cdot Fe_A + Q_B \cdot X_B \cdot Fe_B)}{Q_A \cdot Fe_A + Q_B \cdot Fe_B}. \quad (4)$$

Ця формула, на відміну від традиційного розрахунку центру мас лише за обсягом, інтегрує якість руди як ваговий коефіцієнт для

кожної тони, що надходить із певного забою. Це дозволяє врахувати вплив якісних характеристик на оптимальне розташування бункера, що є важливим для гірничодобувних комплексів, де якість сировини є критичною.

Розрахунок та результати оптимізації:

1. Визначення обсягів для досягнення цільової якості:

Підставимо цільове значення якості (28 %) у формулу  $Fe_{сер}$ :

$$Fe_{сер} = \frac{(Q_A \cdot Fe_A + Q_B \cdot Fe_B)}{Q_A + Q_B} = 28\%. \quad (5)$$

Розв'язавши це рівняння:

$$Q_A \cdot 28 + Q_B \cdot 28 = Q_A \cdot 30,5 + Q_B \cdot 26;$$

$$Q_A = 0,8Q_B.$$

Враховуючи максимальну добову продуктивність ( $Q_A = 40\,000$  т/добу та  $Q_B = 25\,000$  т/добу) для кожного гірничого обладнання, найбільш ефективним рішенням для максимізації загальної продуктивності та забезпечення цільової якості є  $Q_A = 20\,000$  т/добу,  $Q_B = 25\,000$  т/добу.

Наступним кроком пропонується виконати оптимізацію власне координат бункера. Підставивши знайдені значення  $Q_A = 20\,000$  т/добу,  $Q_B = 25\,000$  т/добу, а також  $Fe_A = 30,5\%$  та  $Fe_B = 26\%$  у формулу для координати бункера, отримаємо:

$$X_{бункера} = \frac{(20\,000 \cdot 0 \cdot 30,5) + (25\,000 \cdot 4800 \cdot 26)}{20\,000 \cdot 30,5 + 25\,000 \cdot 26}. \quad (6)$$

Спростивши вираз, отримаємо:

$$X_{бункера} \approx 2476,19 \text{ метрів.}$$

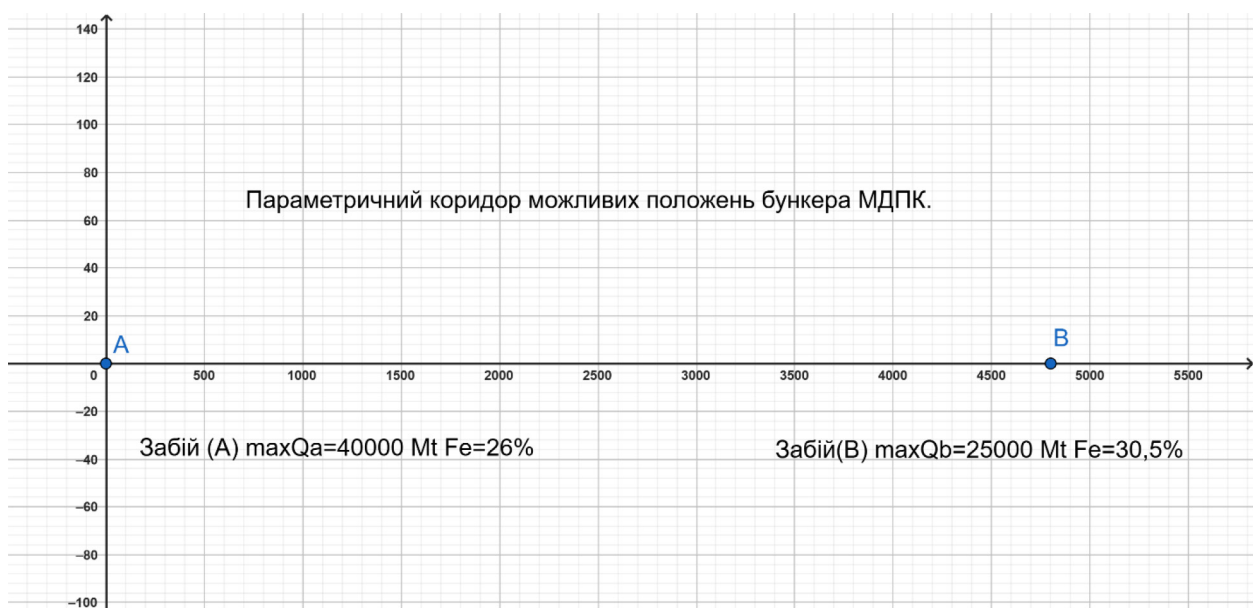


Рис. 1. Параметричний коридор можливих положень бункера



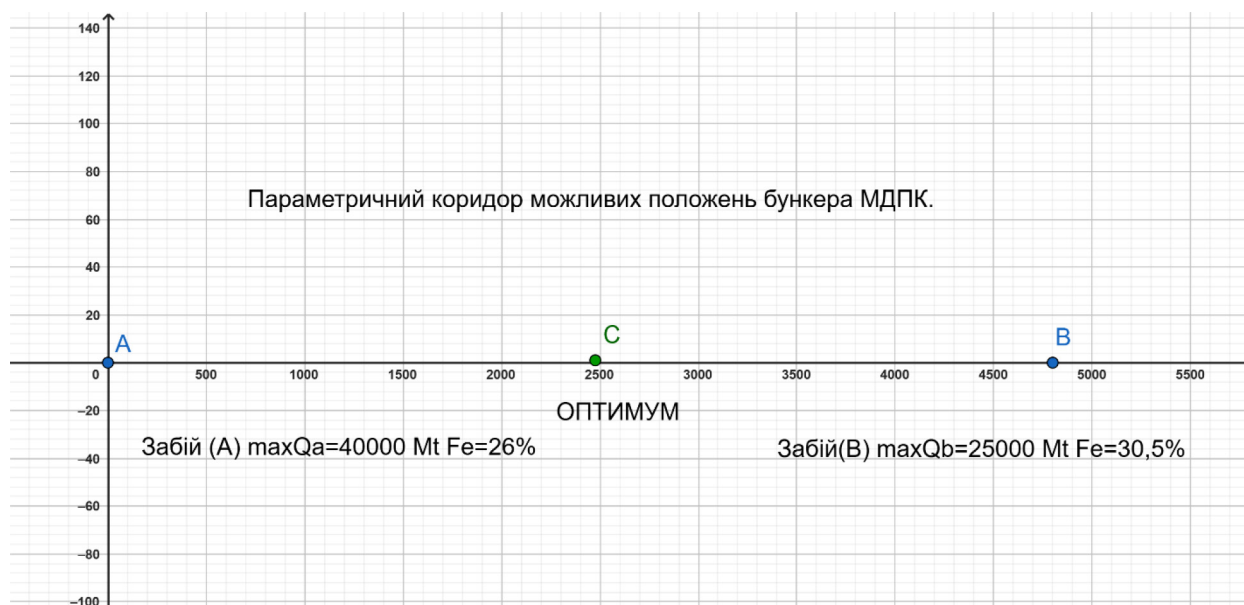


Рис. 2. Визначення оптимального положення бункера

**Висновки.** Таким чином, пропонується підхід двостадійної багатофакторної оптимізації для визначення місця розташування бункера МДПК, що забезпечуватиме мінімальні відстані транспортування автомобільним транспортом із досягненням цільової якості рудної шихти.

Для розрахункового прикладу перевантажувальний пункт знаходиться на відстані приблизно 2314 м від забою А та 2486 м від забою В.

Особливістю запропонованого підходу є те, що задача може вирішуватися динамічно: по

мірі зміни бортового вмісту корисного компоненту, розвитку гірничих робіт і, як наслідок, зміни положень екскаваторних забоїв і вмісту корисного компонента в кожному з них; середньозважена точка перевантаження також може перераховуватись.

Запропонований підхід може бути корисним для проектних організацій і технічних відділів гірничодобувних підприємств для динамічної оптимізації параметрів схем комплексної механізації.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Динамічне проектування техніко-економічних показників відкритих гірничих робіт за допомогою нейромережевих технологій / Ю. І. Григор'єв та ін. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. 2024.
2. Al Habib N., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. Short-term Planning of Open Pit Mines with Semi-Mobile IPCC: A Shovel Allocation Model. Mining Optimization Laboratory (MOL) – Report Eleven. 2023.
3. Findlay L., Dimitrakopoulos R. Stochastic Optimization for Long-Term Planning of a Mining Complex with In-Pit Crushing and Conveying Systems. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024.
4. Joukov S., Lutsenko S., Hryhoriev Y., Shvets E., Onika S., Babiy E. Optimisation of the parameters of cyclical-streaming technology in the conditions of the development of Kryvbas iron ore deposits. *Sustainable extraction and processing of raw materials*. 2021.
5. Lane K. F. The Economic Definition of Ore: Cutoff Grades in Theory and Practice. *Mining Journal Books Ltd*, 1988.
6. Morriss P. Key production drivers in in-pit crushing and conveying (IPCC) studies. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2008.
7. Morrison D. The full picture of IPCC system implementation; The reason why so many fail. *Mining Engineering*. 2017.
8. Pylypchuk D., Hryhoriev Yu., Hlopenko B. V., Neisalo S. H. Mobile crushing and reloading complexes as a tool for enhancing the adaptability of open-pit mining technology. *MININGMETALTECH 2024 – the mining and metals sector: integration of business, technology and education*. 2024. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-9
9. Taylor H. K. General background theory of cutoff grades. *Mining Technology*. 1972.

#### REFERENCES:

1. Hryhoriev, Yu. I., Lutsenko, S. O., Hryhoriev, I. Ye., Shvets, Ye. M., & Kuropiatnyk, I. P. (2024). Dynamichne proiektuvannia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv vidkrytykh hirnychych robot za dopomohoiu neinromerezhevykh tekhnolohii [Dynamic design of technical and economic indicators of open-pit mining using neural network technologies]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Collection of Scientific Papers of the National Mining University*. [in Ukrainian].
2. Al Habib, N., Ben-Awuah, E., & Askari-Nasab, H. (2023). *Short-term planning of open pit mines with semi-mobile IPCC: A shovel allocation model*. Mining Optimization Laboratory (MOL) – Report Eleven.
3. Findlay, L., & Dimitrakopoulos, R. (2024). Stochastic optimization for long-term planning of a mining complex with in-pit crushing and conveying systems. *Mining, Metallurgy & Exploration*.
4. Joukov, S., Lutsenko, S., Hryhoriev, Y., Shvets, E., Onika, S., & Babiy, E. (2021). Optimisation of the parameters of cyclical-streaming technology in the conditions of the development of Kryvbas iron ore deposits. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*.
5. Lane, K. F. (1988). *The economic definition of ore: Cutoff grades in theory and practice*. Mining Journal Books Ltd.
6. Morriss, P. (2008). Key production drivers in in-pit crushing and conveying (IPCC) studies. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*.
7. Morrison, D. (2017). The full picture of IPCC system implementation; the reason why so many fail. *Mining Engineering*.
8. Pylypchuk, D., Hryhoriev, Yu., Hlopenko, B. V., & Neisalo, S. H. (2024). Mobile crushing and reloading complexes as a tool for enhancing the adaptability of open-pit mining technology. *MININGMETALTECH 2024 – The Mining and Metals Sector: Integration of Business, Technology and Education*. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-9>
9. Taylor, H. K. (1972). General background theory of cutoff grades. *Mining Technology*.