ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.2:622.271.32-027.235 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.085

© С.О. Луценко[1], Ю.І. Григор'єв[1], С.О. Жуков[1], С.В. Кальчук[2]
[1]Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна
[2]Державний університет "Житомирська політехніка", Житомир, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРІВ

S. Lutsenko[1], https://orcid.org/0000-0002-5992-3622
Yu. Hryhoriev[1] https://orcid.org/0000-0002-1780-5759
S. Zhukov[1] https://orcid.org/0000-0001-7933-6575
S. Kalchuk[2] https://orcid.org/0000-0003-3179-2787
[1]Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
[2]Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MINING REGIME AND THE PRODUCTIVITY OF IRON ORE OPEN PITS

Мета. Дослідження варіантів режиму гірничих робіт, які забезпечують досягнення максимально можливої та планової продуктивності кар'єру за рудою, а також оцінка їхнього впливу на область можливих рішень щодо визначення й усереднення експлуатаційних коефіцієнтів розкриву під час відпрацювання глибоких залізорудних родовищ.

Методика. У процесі досліджень використано комплексний аналіз просторових параметрів робочої зони кар'єру та їхнього впливу на інтенсивність видобутку. Для визначення меж регулювання режиму гірничих робіт застосовано графоаналітичний метод із побудовою кумулятивних графіків залежності об'ємів розкривних порід від видобутого об'єму руди $V=f(P)$.

Результати. Доведено, що на кумулятивному графіку $V=f(P)$ область допустимих рішень для визначення та усереднення експлуатаційних коефіцієнтів розкриву має чіткі межі. Вони формуються кривими, що відповідають роботі кар'єру з шириною робочого майданчика, розрахованою за двома критеріями: досягненням максимальної інтенсивності розвитку гірничих робіт та обов'язковим забезпеченням нормативу готових до виймання запасів. Виявлено ключову закономірність: зі зростанням цільової продуктивності кар'єру за рудою на 10 %, область регулювання режиму гірничих робіт звужується на 10–14 %.

Наукова новизна. Вперше встановлено аналітичний і графічний взаємозв'язок між режимом гірничих робіт та продуктивністю кар'єру за рудою з урахуванням обов'язкового дотримання нормативного обсягу готових до виймання запасів. Доведено, що цей нормативний обсяг безпосередньо диктується просторовим співвідношенням ширини робочого майданчика та довжини активного фронту, що комплексно визначає динаміку формування робочої зони кар'єру.

Практична значимість. Отримані закономірності створюють наукове підґрунтя для гнучкого управління просторовим розвитком гірничих робіт у глибоких кар'єрах. Запропонований підхід до усереднення коефіцієнтів розкриву дозволяє гірничо-збагачувальним комбінатам уникнути пікових навантажень щодо об'ємів пустих порід, оптимізувати операційні витрати та гарантувати стабільне завантаження видобувного обладнання.

Ключові слова: *залізорудний кар'єр, режим гірничих робіт, коефіцієнт розкриву, продуктивність за рудою, ширина робочого майданчика, готові до виймання запаси.*

Вступ. Розвиток гірничодобувної промисловості та забезпечення стабільної роботи металургійного комплексу безпосередньо залежать від ефективності експлуатації глибоких залізорудних кар'єрів. Зі збільшенням глибини розробки гірничо-геологічні та техніко-економічні умови суттєво ускладнюються, що вимагає вдосконалення методів стратегічного планування просторових параметрів робочої зони. Головною проблемою на цьому етапі є обґрунтування такого напряму розвитку гірничих робіт, який гарантував би раціональне використання надр за умов нестабільності ринку та сприяв підвищенню рентабельності гірничо-збагачувальних комбінатів.

Економічна рентабельність відкритої розробки родовища безпосередньо залежить від продуктивності кар'єру за рудою. Прагнучи мінімізувати витрати, на етапі проєктування перевагу часто віддають напрямку просторового розвитку гірничих робіт із найменшими поточними коефіцієнтами розкриву. Знизити ці об’єми найпростіше шляхом звуження робочих майданчиків до мінімально допустимих параметрів. Теоретично це дозволяє досягти максимальних показників видобутку руди, однак кар'єр при цьому фактично залишається без резерву готових до виймання запасів гірничої маси. Оскільки раціональний режим гірничих робіт має гарантувати безперебійне виконання плану, для стабільного та безпечного видобутку робоча зона кар'єру повинна бути сформована з майданчиків, які містять чітко регламентовані нормативні запаси [1].

Нарощування обсягів видобутку та створення необхідного обсягу готових до виймання запасів вимагає збільшення ширини робочих площадок. Проте це неминуче призводить до виположування робочого борту кар'єру (зменшення кута його укосу) та різкого зростання коефіцієнтів розкриву. Якщо при збільшенні продуктивності за рудою ігнорувати своєчасне вивезення пустих порід, це призведе до порушення планомірного розвитку гірничих робіт. Таким чином, видобуток корисної копалини нерозривно пов'язаний із необхідністю виймання колосальних масивів розкриву, що є особливо типовою проблемою під час розробки крутоспадних покладів залізорудних родовищ.

Аналіз попередніх досліджень. Практика проєктування та дослідження [2–4] доводять, що економічно найвигідніше працювати з постійною продуктивністю за рудою та гірничою масою протягом тривалого часу. Щоб забезпечити такий стабільний режим, потрібно усереднювати об’єми розкривних робіт по різних періодах експлуатації родовища. На практиці це завдання вирішують за рахунок цілеспрямованої зміни кута укосу робочого борту кар’єра [5]. Однак сьогодні більшість авторів, які вивчають оптимізацію гірничих робіт, розглядають зміну кута робочого борту виключно з точки зору того, як це впливає на поточні об’єми розкриву.

Водночас аналіз опублікованих праць свідчить про наявність суттєвих прогалин у розв'язанні комплексної проблеми планування розвитку робочої зони. Приділяючи головну увагу мінімізації об’ємів пустих порід, дослідники практично не враховують вплив кута укосу робочого борту кар’єра на максимально можливу продуктивність підприємства за рудою. Крім того, поза увагою залишається вплив нестабільності абсолютних вартісних показників на достовірність

довгострокового оцінювання напрямів розвитку гірничих робіт. Невирішеність проблеми узгодження просторової динаміки робочої зони зі стабільними показниками продуктивності та відносними економічними критеріями зумовлює необхідність проведення даного дослідження.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Головною метою є дослідження варіантів режиму гірничих робіт, які забезпечують досягнення максимально можливої та планової продуктивності кар'єру за рудою, а також оцінка їхнього впливу на область можливих рішень щодо визначення й усереднення коефіцієнтів розкриву [6]. Для реалізації цієї мети в роботі поставлено завдання встановити закономірності взаємозв'язку між просторовими параметрами робочої зони кар'єру, зокрема кутом укосу робочого борту, та максимально можливою продуктивністю підприємства за корисною копалиною. Окремої уваги потребує аналіз динаміки зміни об'ємів пустих порід при застосуванні різних варіантів просування гірничих фронтів. Зрештою, комплексне розв'язання цих питань дозволить обґрунтувати раціональні підходи до усереднення поточних коефіцієнтів розкриву, які гарантуватимуть безперебійну підтримку планового видобутку руди без порушення порядку ведення гірничих робіт.

Виклад основного матеріалу дослідження. Визначення гірничотехнічних можливостей кар'єру щодо видобутку руди нерозривно пов'язане з обґрунтуванням параметрів його робочої зони. Одним із ключових факторів, що визначає конструкцію робочої зони та режим гірничих робіт, є взаємозв'язок між шириною робочого майданчика та довжиною активного фронту. Саме ця пропорція формує необхідний обсяг готових до виймання запасів, що, у свою чергу, визначає максимально можливу інтенсивність відпрацювання родовища в умовах динамічної зміни попиту на залізорудну сировину.

Дослідження [7] показують, що просторові параметри системи розробки мають нелінійний вплив на обсяг готових до виймання запасів руди. Наприклад, за мінімальної ширини робочого майданчика довжина фронту гірничих робіт сягає свого максимуму, однак обсяг готових до виймання запасів при цьому є мінімальним. Зі збільшенням ширини робочого майданчика довжина активного фронту скорочується, проте запас руди, готовий до виїмки, навпаки, зростає. Свого максимального значення обсяг готових до виймання запасів досягає лише за оптимального співвідношення обох параметрів.

Зміна цих параметрів безпосередньо впливає на виробничу потужність підприємства. Зокрема, збільшення кута укосу робочого борту за рахунок зменшення ширини робочих майданчиків призводить до зниження продуктивності кар'єру за рудою, а також до падіння швидкостей горизонтального посування фронту та поглиблення гірничих робіт. Це доводить, що продуктивність підприємства не може розраховуватися виключно з позиції максимальної інтенсивності розвитку робіт (наприклад, шляхом максимального насичення фронту видобувними екскаваторами). Вона має визначатися з обов'язковим урахуванням взаємозв'язку між шириною площадки та довжиною фронту, який забезпечує в кар'єрі норматив готових запасів.

Ігнорування цього взаємозв'язку під час складання перспективних календарних планів має критичні наслідки. Якщо продуктивність кар'єру за рудою визначати за відокремленими показниками (без ув'язки довжини активного фронту із шириною майданчиків), виникає невідповідність між проєктною та фактичною геометрією вибоїв. Це призводить до порушення оптимальної пропорційності швидкостей переміщення рудних і розкривних уступів і, як наслідок, до систематичного накопичення відставання розкривних робіт у кар'єрі.

Для коректного визначення максимально можливої продуктивності кар'єру необхідно використовувати метод [8], який враховує гірничотехнічні умови комплексно. За такого підходу максимальна можлива продуктивність за рудою пов'язується з нормативним обсягом готових до виймання запасів, який, у свою чергу, формується на основі балансу між фактичною довжиною активного фронту гірничих робіт і раціональною шириною робочого майданчика.

Відповідно до методики піковий рівень можливої продуктивності за рудою графічно позначається точкою перетину (т. А на рис. 1) двох кривих (1 і 2). Ці криві демонструють динаміку продуктивності при збільшенні ширини робочого майданчика з двох різних підходів: з огляду на максимальну інтенсивність переміщення фронту гірничих робіт та з боку забезпечення нормативного обсягу готових до виймання запасів.

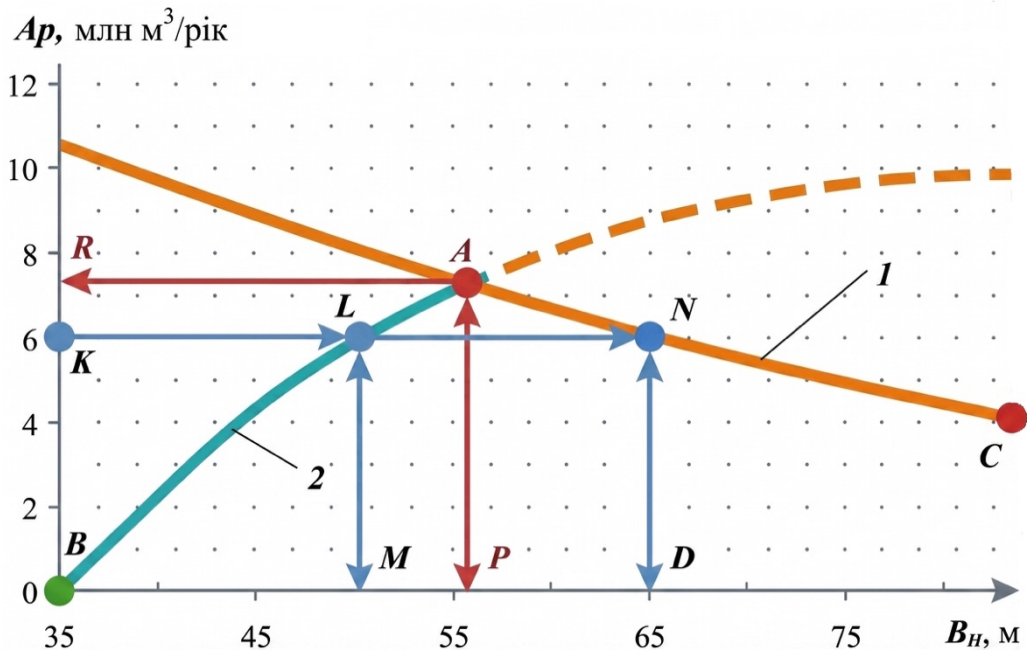


Рис. 1. Залежність можливої продуктивності кар'єру за рудою від ширини робочого майданчика при різних підходах до її розрахунку: 1 – виходячи з максимальної інтенсивності розвитку гірничих робіт; 2 – на основі забезпечення нормативного обсягу готових до виймання запасів

При цьому ширина майданчика, яка гарантує максимум продуктивності, суттєво перевищує мінімальну (наприклад, 56 м проти B_{min} = 35 м, що відповідає лінії *AP* на рис. 1). Будь-яке відхилення від цієї позначки як у більшу, так і в меншу сторону неминуче призводить до падіння. Так, на ділянці праворуч від

ширини робочого майданчика, що забезпечує максимально можливу продуктивність (лінія АС на рис. 1), рівень продуктивності кар'єру визначається умовами розміщення максимальної кількості видобувних екскаваторів. Відповідно, на ділянці ліворуч від цього оптимуму (лінія *ВА* на рис. 1) продуктивність лімітується необхідністю забезпечення нормативного обсягу готових до виймання запасів руди. Якщо ж підприємству необхідно досягти планової продуктивності, яка є нижчою за максимально можливу, існують два крайні альтернативні варіанти її виконання.

Розглянемо це на прикладі планового видобутку на рівні 6 млн м³/рік. Для забезпечення такого рівня продуктивності в один етап технічно можливо за двома граничними варіантами формування робочої зони:

І варіант — гірничі роботи ведуться з шириною робочого майданчика $B_{г.з}^{пл}$ =50 м (лінія *KLM* на рис. 1), яка визначається з умови забезпечення нормативного обсягу готових до виймання запасів руди.

ІІ варіант — відпрацювання здійснюється з шириною майданчика $B_{інт}^{пл}$ =65 м лінія *KND* на рис. 1), що розрахована виходячи з максимальної інтенсивності розвитку гірничих робіт.

Аналіз графічних залежностей (див. рис. 1) свідчить, що забезпечення заданої продуктивності за рудою можливе у певному діапазоні кутів укосу робочого борту. При цьому максимальний кут укосу, за якого забезпечується виконання планового обсягу з видобутку, утворюється при ширині майданчика 50 м (лінія 2 на рис. 2). У свою чергу, мінімальний кут формується при ширині робочого майданчика 65 м (лінія 4 на рис. 2). Незважаючи на те, що обидва просторові рішення дозволяють забезпечити плановий видобуток, перший варіант формує значно раціональніший режим гірничих робіт. Оскільки крива І варіанта (лінія 2) проходить нижче за криву ІІ варіанта (лінія 4), експлуатаційні коефіцієнти розкриву першого варіанту є суттєво меншими. Тому для забезпечення стабільної продуктивності в 6 млн м^3/рік гірничі роботи слід вести з шириною майданчика 50 м.

Проте, постійна робота з фіксованим кутом укосу робочого борту [6] призводить до безперервних коливань поточного коефіцієнта розкриву, що дестабілізує економіку та ускладнює організацію праці. Щоб уникнути цього, на етапі проєктування необхідно розраховувати роботу кар'єру зі сталими (усередненими) коефіцієнтами розкриву. Для коректного визначення цих коефіцієнтів та розбиття терміну експлуатації на етапи проєктувальнику доцільно використовувати кумулятивний графік залежності $V = f(P)$, який чітко окреслює діапазон можливих рішень щодо об'ємів руди та розкриву.

Очевидно, що варіанти роботи кар'єру з постійними коефіцієнтами розкриву та плановим обсягом видобутку руди на графіку матимуть вигляд прямих ліній. Усі вони розташовуються всередині області, що обмежена кривими $V = f(P)$ при максимальному (варіант І) та мінімальному (варіант ІІ) куті нахилу робочого борту для даної продуктивності по руді. Відповідно, ведення гірничих робіт з постійним експлуатаційним коефіцієнтом розкриву відображається прямою LS, яка проходить як дотична до кривої що характеризує роботу кар'єру з максимальним кутом нахилу робочого борту (варіант І).

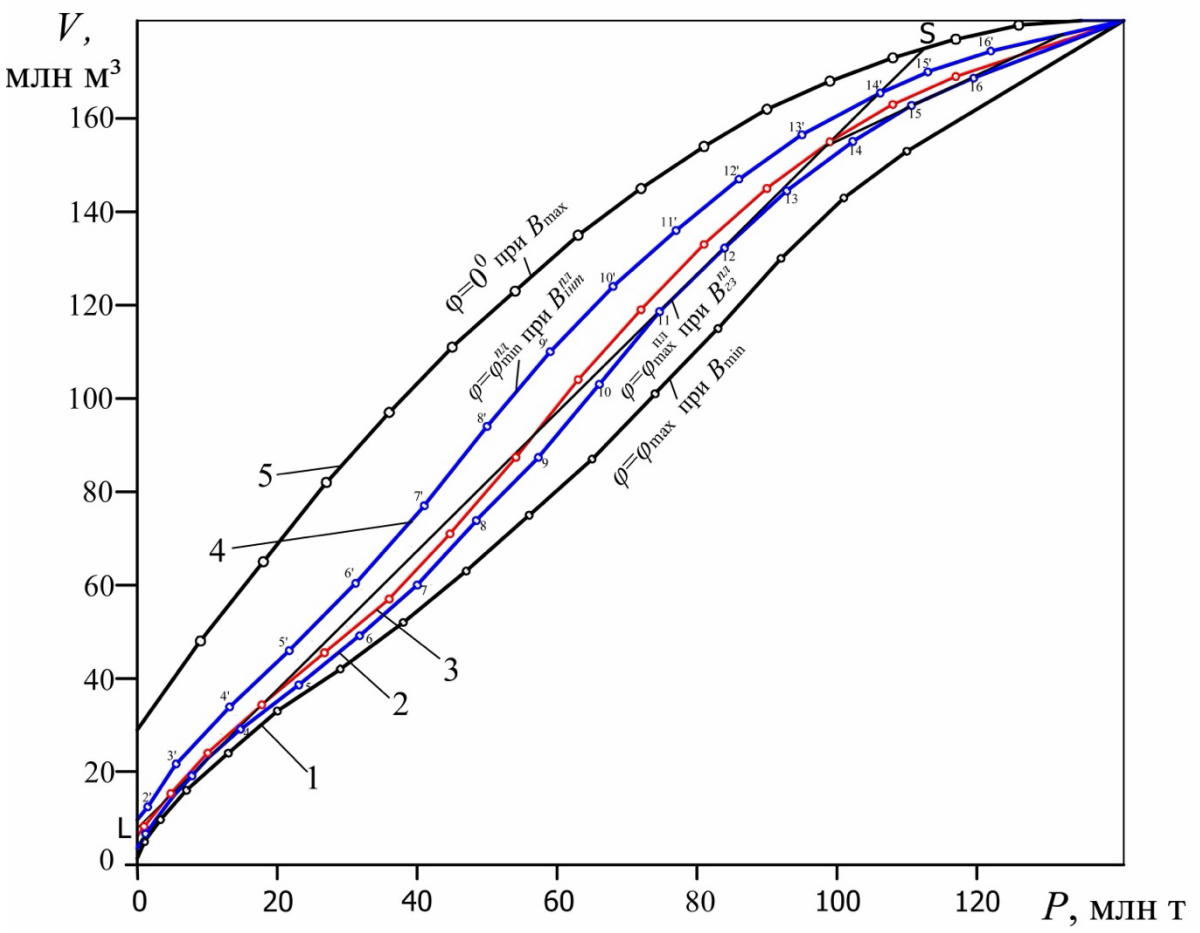


Рис. 2. Зміна зростаючих об’ємів розкривних порід залежно від видобутого об’єму руди при різній ширині робочого майданчика: 1 – 35; 2 –50; 3 – 57; 4 – 70; 5 – B_{max}.

За умови підтримання сталого коефіцієнта розкриву, кут укосу робочого борту в процесі експлуатації змінюватиметься, проте він не має перевищувати свого граничного значення $\varphi_{max}^{пл}$. Водночас ширина робочих майданчиків повинна підтримуватися на рівні, не меншому за мінімально допустимий $B_{г.з}^{пл}$. Завдяки цьому в кар'єрі зберігатимуться нормативні запаси готові до виймання, що стовідсотково гарантує виконання плану з видобутку руди.

Як свідчать дані графіка (див. рис. 2), у момент виходу гірничих робіт (лінія *LS*) на рівень 14-го уступу, кут укосу робочого борту набуде значення $\varphi_{min}^{пл}$, оскільки саме тут пряма *LS* перетинається з кривою для $\varphi = \varphi_{min}^{пл}$. Продовження експлуатації з таким самим співвідношенням обсягів розкриву та видобутку призведе до того, що кут укосу робочого борту зростатиме внаслідок збільшення ширини робочого майданчика. При цьому фактична продуктивність кар'єру впаде нижче запланованих показників.

Зважаючи на це, технічно недоцільно допускати, щоб прямі, що характеризують роботу з усередненим коефіцієнтом розкриву, знаходилися вище кривої $\varphi_{min}^{пл}$ і нижче кривої $\varphi_{max}^{пл}$.

На основі цього можна зробити висновок, що межі вибору та усереднення експлуатаційних коефіцієнтів розкриву безпосередньо диктуються кутами нахилу робочого борту, за яких досягається проєктна продуктивність кар'єру за рудою [9]. Відповідно, для розглянутого прикладу із продуктивністю 6 млн м³/рік зона регулювання режиму гірничих робіт на графіку $V = f(P)$ звужується та обмежується простором між кривими 2 і 4 (див. рис. 2). Як наслідок, простежується чітка закономірність: зі зростанням планових обсягів видобутку руди діапазон можливого регулювання режиму гірничих робіт пропорційно зменшується.

У випадках, коли планові об’єми видобутку руди сягають максимально можливих значень (лінія 3 на рис. 2), можливості регулювання режиму гірничих робіт за рахунок варіювання ширини робочих майданчиків виявляються вкрай обмеженими ($\varphi_{min}^{пл}=\varphi_{max}^{пл}$). При цьому слід враховувати, що відхилення усереднювальної лінії від рекомендованої кривої $V = f(P)$, що забезпечує максимально можливу продуктивність у напрямку лінії $\varphi = 0$ при B_{max} неминуче супроводжуватиметься падінням досяжної продуктивності кар’єру. Тому на фінальному етапі, після усереднення та розрахунку експлуатаційних коефіцієнтів розкриву, планова продуктивність кар'єру потребує додаткового коригування.

Практичне застосування встановлених закономірностей створює наукове підґрунтя для гнучкого управління розвитком робочої зони глибоких залізорудних кар’єрів. Використання обґрунтованого режиму гірничих робіт дозволяє гірничо-збагачувальним комбінатам уникнути раптових пікових навантажень щодо об'ємів розкриву в окремі експлуатаційні періоди. Завдяки усередненню поточних експлуатаційних коефіцієнтів розкриву в межах визначеної області $V = f(P)$, підприємство отримує змогу гарантувати стабільне та ритмічне завантаження важких транспортних комплексів і видобувного обладнання, одночасно мінімізуючи ризики простоїв через дефіцит готових до виймання запасів.

Зі стратегічної точки зору, реалізація оптимізованого режиму гірничих робіт є визначальним фактором підвищення рентабельності видобутку корисної копалини на великих глибинах. Оскільки транспортування та відвалоутворення пустих порід формують левову частку собівартості залізорудної сировини, утримання гірничих робіт у межах раціональної області рішень дозволяє суттєво оптимізувати операційні витрати. Такий підхід гарантує, що навіть за умови максимізації продуктивності за рудою, економіка гірничих робіт залишатиметься стабільною і прогнозованою протягом усього періоду відпрацювання родовища.

Напрямом подальших досліджень є адаптація встановлених параметрів режиму гірничих робіт до умов послідовного відпрацювання глибоких кар’єрів. Особливо перспективною вбачається впровадження отриманих аналітичних та графічних залежностей у сучасні системи цифрового моделювання гірничих робіт. Це дозволить автоматизувати процес пошуку раціональної геометрії робочої зони, оперативно коригувати напрямок посування фронту гірничих робіт і розробляти багатоваріантні проєкти експлуатації родовищ з урахуванням динамічних змін кон'юнктури ринку.

Висновки. У роботі досліджено режим гірничих робіт, який забезпечує виведення кар’єру на максимально можливу продуктивність за рудою.

Обґрунтовано, що на графіку $V = f(P)$ простір допустимих рішень для визначення та усереднення експлуатаційних коефіцієнтів розкриву має чіткі межі. Вони формуються кривими, які відображають роботу кар'єру з такою шириною робочого майданчика, яка забезпечує виконання планової продуктивності за рудою. Визначення цієї ширини базується на двох обов'язкових умовах: досягненні максимальної інтенсивності розвитку гірничих робіт та забезпеченні нормативу готових до виймання запасів.

При цьому встановлено ключову закономірність: чим вищою є продуктивність за рудою, тим меншим стає доступний діапазон для регулювання режиму гірничих робіт. Кількісний аналіз підтверджує, що зростання продуктивності на 10% призводить до звуження області регулювання режиму на 10–14%.

За результатами досліджень виявлено взаємозв’язок між режимом гірничих робіт та продуктивністю кар’єру, виходячи з умови дотримання нормативного обсягу готових до виймання запасів. Цей обсяг безпосередньо диктується просторовим співвідношенням ширини робочого майданчика та довжини активного фронту робіт, що в комплексі визначає загальну динаміку формування робочої зони кар’єру.

Перелік посилань

1. *СОУ-Н МПП 73.020-078-1:2007 Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Частина 1. Гірничі роботи. Ліквідація гірничодобувних підприємств. Техніко-економічна оцінка та показники*. (2007). Міністерство промислової політики України.
2. Gholamnejad, J., & Moosavi, E. (2012). A new mathematical programming model for long-term production scheduling considering geological uncertainty. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *112*(4), 77–81. https://www.saimm.co.za/Journal/v112n02p077.pdf
3. Das, R., Topal, E., & Mardaneh, E. (2023). A review of open pit mine and waste dump schedule planning. *Resources Policy*, *85*, Article 104064. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104064
4. Nancel-Penard, P., Kumral, M., & Morcel, P. (2019). Optimizing pushback design considering minimum mining width for open pit strategic planning. *European Journal of Operational Research*, *279*(2), 605–614. https://doi.org/10.1080/0305215X.2021.1941919
5. Korobiichuk, V., Temchenko, A., & Zuievska, N. (2024). Determination of the impact of methods and schemes for opening a deposit and individual quarry horizons on the efficiency of open-pit mining technology. In *Geomining: Systems and decision-oriented perspective*, 43–54. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_3
6. Halatchev, R., & Dimitrakopoulos, R. (2003). On the Dynamics of Mining Operations in Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 17*(4), 246–263. https://doi.org/10.1076/ijsm.17.4.246.17482
7. Lutsenko, S., Hryhoriev, Y., Kuttybayev, A., Imashev, A., & Kuttybayeva, A. (2023). Determination of mining system parameters at a concentration of mining operations. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan: Series of Geology and Technical Sciences*, *1*(457), 130–140. https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.264
8. Lutsenko, S.A. (2016). Razrabotka metoda opredeleniya maksimalnoy, po gornym vozmozhnostyam, proizvoditelnosti karyera po rude. *Geotekhnichna mekhanika*, (130), 168–174.
9. Zhukov, S. A., & Lutsenko, S. A. (2018). Opredelenie obemov vskryshnykh rabot pri uvelichenii proizvoditelnosti karyera po rude. *Zbirnyk naukovykh prats NGU*, (55), 29–39.

ABSTRACT

Purpose. To study the variants of the mining operations regime that ensure the achievement of the maximum possible and planned ore production capacity of an open-pit mine, as well as to evaluate their impact on the area of feasible solutions for determining and averaging operational stripping ratios during the exploitation of deep iron ore deposits.

The methods. A comprehensive analysis of the spatial parameters of the open-pit working zone and their impact on the extraction intensity was used during the research. To determine the limits of regulating the mining operations regime, a grapho-analytical method was applied, involving the construction of cumulative graphs showing the dependence of overburden volumes on the extracted ore volume, $V = f(P)$.

Findings. It is proven that on the cumulative graph $V = f(P)$, the area of feasible solutions for determining and averaging operational stripping ratios has clear boundaries. These boundaries are formed by curves corresponding to the open-pit operation with a working bench width calculated according to two criteria: achieving the maximum intensity of mining operations development and the mandatory provision of a standard for ready-to-extract reserves. A key regularity is revealed: with a 10% increase in the target ore production capacity of the open-pit mine, the area for regulating the mining operations regime narrows by 10–14%.

The originality. For the first time, an analytical and graphical relationship between the mining operations regime and the open-pit ore production capacity has been established, taking into account the mandatory compliance with the standard volume of ready-to-extract reserves. It is proven that this standard volume is directly dictated by the spatial ratio of the working bench width to the active front length, which comprehensively determines the dynamics of the open-pit working zone formation.

Practical implementation. The obtained regularities provide a scientific basis for the flexible management of the spatial development of mining operations in deep open-pit mines. The proposed approach to averaging stripping ratios allows mining and processing plants to avoid peak loads concerning overburden volumes, optimize operating costs, and guarantee the stable loading of extraction equipment.

Keywords: *iron ore open-pit mine, mining operations regime, stripping ratio, ore production capacity, working bench width, ready-to-extract reserves*.

дата першого надходження статті до видання	20.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	21.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. S. Lutsenko, Y. Hryhoriev, S. Zhukov, S. Kalchuk
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.