

Engineering. – Issue 2 (51), 2018. – pp. 145-150.

10. **Тімченко Р.О.** Дослідження впливу геометричних параметрів складчас-того фундаменту-оболонки на величину несучої здатності основи / **Р.О.Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко** // Гірничий Вісник – Вип.104 – Кривий Ріг: КНУ, 2019 – с.65-69.

11. **Timchenko R.A.** Construction solution of folded-plate shell foundation for power transmission towers / **R.A. Timchenko, D.A., Krishko, I.V. Khoruzhenko** // Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2 (49), 2017. – pp. 207-214.

12. Пат. 130294 Україна, МПК (2018.01) E02D 27/00. Фундамент під опори ліній електропередач / **Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко**; заявник і патентовласник – Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет». – u201802105, заявл. 28.02.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

13. **Тімченко Р.О.** Дослідження напружено-деформованого стану основи під структурними фундаментами за допомогою математичного моделювання / **Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко** // Вісник Криворізького національного університету – Вип.49 – Кривий Ріг: КНУ, 2019. – С.74-79.

14. **Гензерский Ю.В.** ЛИРА – САПР 2011. Учебное пособие / **Ю.В., Гензерский, Д.В. Медведенко, О.И. Пащенко, В.П. Титок** – Киев: Электронное издание, 2011, – 396 с.

15. ДСТУ-Н Б В.1.1-40:2016 Настанова щодо проектування будівель і споруд на слабких ґрунтах. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 70с.

Рукопис подано до редакції 17.03.2020

УДК [622.271:338.32-048.34]:622.012

**І.В. БАРАНОВ**, **Є.М. ШВЕЦЬ**, кандидати техн. наук, ст. викладачі,  
**Є.В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО**, **Д.В. ПОЛЬЩІН**, магістранти  
Криворізький національний університет

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧОЇ ПОТУЖНОСТІ ГРУПИ КАР'ЄРІВ У СКЛАДІ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ**

**Мета статті.** Метою роботи є обґрунтування методів визначення оптимальних показників відкритої розробки, з урахуванням оптимізації роботи групи кар'єрів, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ відкритим способом.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач у статті було використано методи: узагальненого аналізу досягнень науки та практичного досвіду роботи гірничо-видобувних підприємств, щодо розробки родовищ корисних копалин відкритим способом групою кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату; аналітичного та графоаналітичного аналізу; економіко-математичного моделювання спільної роботи кар'єрів, як єдиної системи, або єдиного комплексу; факторного аналізу; техніко-економічного аналізу показників роботи окремих кар'єрів та гірничо-збагачувального комбінату в цілому.

**Наукова новизна результатів.** В роботі запропоновано кар'єри, які розробляють залізрудні родовища та входять до складу гірничо-збагачувального комбінату, розглядати як єдиний комплекс, або єдину систему. При цьому їх технологічні показники необхідно визначати по взаємозв'язаному впливу на технічні та економічні показники роботи гірничо-збагачувального комбінату до складу якого вони входять.

**Практична значимість результатів.** Запропоновано розрахунковий метод визначення продуктивності кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату, на основі якого можна визначити найкращий варіант сумісної роботи цих кар'єрів з забезпеченням таких техніко-економічних показників гірничо-збагачувального комбінату, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ. Результати досліджень можуть бути використані гірничими підприємствами та проектними організаціями при плануванні гірничих робіт та проектування кар'єрів.

**Результати досліджень.** Виконано оптимізацію роботи групи кар'єрів за критеріями мінімального коефіцієнту розкриття та мінімальної повної собівартості видобутку руди кожного кар'єру на основі якої визначено пріоритетність роботи кожного кар'єру. Встановлено, що затрати на видобуток однієї тони руди в цілому по гірничо-збагачувальному комбінату можуть бути знижені на 6 %, якщо оптимізацію роботи групи кар'єрів виконувати за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди.

**Ключові слова:** кар'єр, руда, розкриттві породи, коефіцієнт розкриття, продуктивність, собівартість, техніко-економічні показники.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-42-48

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** При розробці родовищ групою кар'єрів, які входять в систему гірничо-збагачувального комбінату, існує ряд відмінних особливостей, притаманних періодам досягнення оптимальних потужностей і експлуатації групи кар'єрів при їх спільній роботі. Таким чином, задачі експлуатації і введення групи

кар'єрів, які входять в склад комбінату, в експлуатацію повинні вирішуватися з урахуванням особливостей, властивих кожному окремо взятому кар'єру. Проектування відкритої розробки складної структури родовищ зв'язано з вирішенням комплексу задач, потребуючих системного підходу до створення методик визначення оптимальних параметрів і показників розробки, враховуючих специфіку цих родовищ.

В сучасних умовах, які характеризуються структурними змінами ринків мінеральної сировини, проявилась необхідність в зміні основних теоретичних і методологічних підходів до методів оптимізації продуктивності групи кар'єрів, що входять до складу гірничозбагачувального комбінату. Особливо гостро це питання виникає при подальшому підвищенні ефективності розробки залізорудних родовищ відкритим способом.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У складі гірничого підприємства знаходяться в роботі один і більше кар'єрів. Спочатку можливу продуктивність кар'єру по корисній копалині визначали по можливій швидкості посування уступів у горизонтальному напрямку. На основі аналізу перспектив розробки залізорудних родовищ відкритим способом, попиту на мінеральну сировину та досліджень по визначенню продуктивності кар'єрів були розроблені система економіко-статистичного прогнозування показників гірничовидобувних підприємств, економіко-математичні моделі гірничодобувних підприємств з встановленням гірничо-геологічних факторів, які впливають на рентабельність цих підприємств [1-5]. У нормах технологічного проектування [6, 7] та наукових працях [8-11] рекомендовано встановлювати продуктивність кар'єру за корисною копалиною виходячи зі швидкості зниження гірничих робіт. Однак в них, для сучасних умов роботи кар'єрів, що розробляють крутоспадні поклади, не враховується зміна площі рудного покладу із глибиною, включення порід, що вміщують, і розташування в кар'єрному просторі перевантажувальних пунктів. У роботі [12] запропоновано метод мінімального виймання обсягів розкривних порід при встановлених параметрах системи розробки та напрямку розвитку гірничих робіт, що забезпечує безпечну роботу кар'єру із заданою продуктивністю по руді. Результати досліджень [13] показали, що багатофакторний вплив на продуктивність кар'єрів не можна врахувати в одному критерії оцінки. У такому випадку необхідна розробка декількох критеріїв. Цей набір критеріїв повинен ґрунтуватися на заміні розв'язання однієї великої системи розв'язанням взаємозалежних між собою окремих підсистем.

**Постановка задачі.** Виходячи з аналізу наукових досягнень та практичного досвіду у галузі розробки залізорудних родовищ корисних копалин метою статті є обґрунтування методів визначення оптимальних показників відкритої розробки, з урахуванням оптимізації продуктивності групи кар'єрів, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізорудних родовищ відкритим способом.

**Викладення матеріалу та результатів.** При вирішенні питання щодо продуктивності групи кар'єрів у складі ГЗК насамперед виконується аналіз умови залягання родовища щоб визначити можливість забезпечення ефективної роботи комбінату цими кар'єрами. Таким чином, один або декілька кар'єрів, які розробляють родовище, складають сировинну базу комбінату [14].

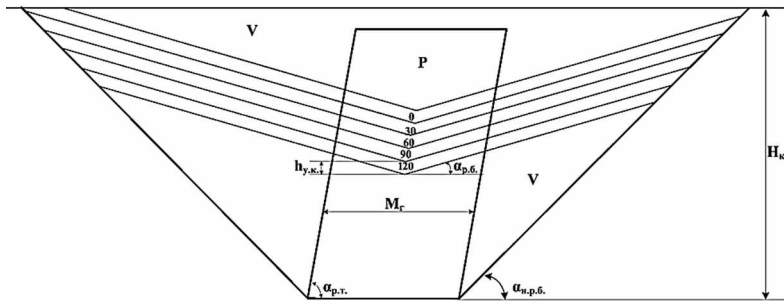
Особливості періоду експлуатації кар'єрів в системі комбінату полягають в наступному. В залежності від будови родовища, потужності корисної копалини та розкривних порід, які покривають та вміщуються у корисній копалині, а також від прийнятого порядку відпрацювання кар'єрного поля кожним кар'єром у визначені періоди експлуатації будуть вийматися неоднакові обсяги корисних копалин і порід розкриву. Відповідно, собівартість видобутку однієї тони корисної копалини на різних кар'єрах буде різною. Корисна копалина, що видобувається в кожному кар'єрі по рокам експлуатації може бути різноманітного сорту та якості. Тому для отримання однієї тони товарної продукції заданої якості необхідно видобути із кожного кар'єру та переробити на збагачувальній фабриці неоднакову кількість корисної копалини, що визначає різні затрати на переробку сировини.

Оптимізація продуктивності групи кар'єрів за рудою полягає у складанні календарного плану їх роботи на визначений експлуатаційний період у якому визначаються показники розвитку гірничих робіт (поточні коефіцієнти розкриву, якість корисних копалин і можлива виробнича потужність кар'єрів). При цьому враховується наявність гірничого обладнання у кар'єрах, планова якість товарної продукції, можлива виробнича потужність комбінату за випуском цієї продукції [14]. Календарний план розвитку гірничих робіт в кар'єрі складається у вигляді гра-

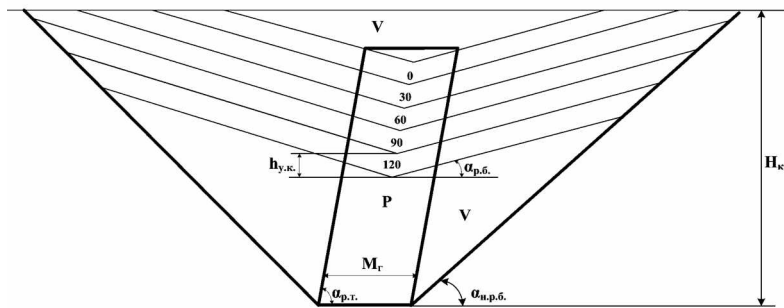
фіків, таблиць і креслень. Крім цього, для більш скорішого та приблизного визначення варіантів роботи групи кар'єрів у складі ГЗК, дослідження виконують на поперечних перерізах.

На прикладі трьох умовних кар'єрів, які входять до складу гірничо-збагачувального комбінату, розглянемо оптимізацію їх роботи.

Умовний кар'єр № 1 відпрацьовує рудний поклад, у якого: кут падіння становить  $80^\circ$ ; горизонтальна потужність – 350 м; протяжність – 2700 м. Параметри цього кар'єру наступні: кут робочого борта –  $16^\circ$ ; кут неробочого борта –  $45^\circ$ ; проектна глибина відпрацювання – 630 м. У даного кар'єру границі гірничих робіт по поверхні вже підійшли до проектного їх положення і подальше відпрацювання кар'єру відбувається з розвитком гірничих робіт тільки в глибину. Умови відпрацювання кар'єру представлені на рис. 1.

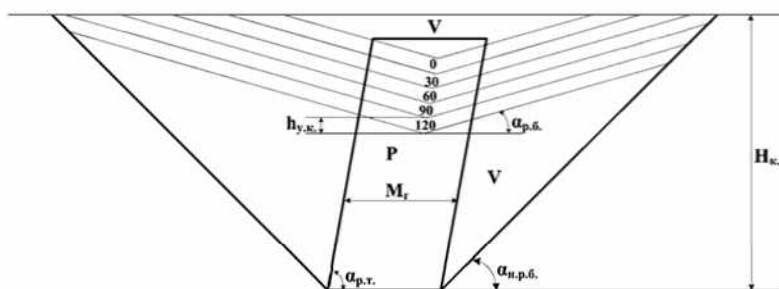


**Рис. 1.** Поперечний переріз родовища, яке відпрацьовується умовним кар'єром № 1:  $V$  – розкривні породи;  $P$  – руда;  $h_{y.k.}$  – глибина пониження гірничих робіт;  $\alpha_{p.б.}$  – кут робочого борта кар'єру;  $\alpha_{n.p.б.}$  – кут неробочого борта кар'єру;  $\alpha_{p.t.}$  – кут падіння рудного покладу;  $M_r$  – горизонтальна потужність покладу;  $H_k$  – кінцева глибина кар'єру



**Рис. 2** Поперечний переріз родовища, яке відпрацьовується умовним кар'єром № 2

ня кар'єру, становить 560 м. На відміну від перших двох кар'єрів цей кар'єр, на даний час введений в експлуатацію. Умови відпрацювання кар'єру представлені на рис. 3.



**Рис. 3** Поперечний переріз родовища, яке відпрацьовується умовним кар'єром № 3

руди та розкривних порід з визначенням поточних коефіцієнтів розкриття. За результатами таких замірів та розрахунків складаються відповідні таблиці. Враховуючи те, що середньорічне пониження гірничих робіт на залізородних кар'єрах складає 10 м, то тривалість кожного періоду

Умовний кар'єр № 2 відпрацьовує рудний поклад, у якого: кут падіння становить  $80^\circ$ ; горизонтальна потужність – 120 м; протяжність – 4500 м. Параметри цього кар'єру наступні: кут робочого борта –  $16^\circ$ ; кут неробочого борта –  $45^\circ$ ; проектна глибина відпрацювання – 345 м (рис. 2). На рис. 2 наведені позначення аналогічні позначенням, які наведено на рис. 1. На відміну від стану гірничих робіт першого умовного кар'єру відпрацювання кар'єру № 2 відбувається з розвитком гірничих робіт, як в горизонтальному напрямку, так і в глибину. Тобто ці два умовні кар'єри вже мають тривалий термін експлуатації.

Умовний кар'єр № 3 відпрацьовує рудний поклад, у якого: кут падіння становить  $80^\circ$ ; горизонтальна потужність – 230 м; протяжність – 3200 м; кінцева глибина відпрацювання

На представлених рисунках цифрами 0, 30, 60, 90, 120 позначені етапи пониження гірничих робіт. Положення робочого борту кар'єру на етапі «0» характеризує поточний стан гірничих робіт в кар'єрі і слугує вихідним положенням для подальших досліджень. На кожному етапі розвитку гірничих робіт виконуються заміри обсягів

ду роботи кар'єрів буде складати три роки. Якщо у кожного кар'єру різні умови розробки родовища, то відповідно будуть розрізнятися і техніко-економічні показники їх роботи, які наведено в табл. 1 та прийнято для подальших розрахунків.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники роботи умовних кар'єрів

Показники	Кар'єр № 1	Кар'єр № 2	Кар'єр № 3
Обсяг видобутку руди, млн. т/рік	31,3	18,3	24,4
Вихід концентрату, частка од.	0,42	0,37	0,39
Обсяг виробництва концентрату, млн. т/рік	13,15	6,78	9,5
Загальний обсяг виробництва концентрату, млн. т/рік	29,43		
Собівартість видобутку руди (без затрат на розкрив), грн./т	25	13	15
Собівартість виймання розкривних порід, грн./м <sup>3</sup>	50	35	40

За результатами замірів та виконаних на їх основі розрахунків поточних коефіцієнтів розкриву будемо графік зміни цих коефіцієнтів за етапами пониження гірничих робіт умовних кар'єрів. Ця зміна представлена на рис. 4.

На основі значень поточних коефіцієнтів розкриву та прийнятих вихідних даних, які наведено в табл. 1, було виконано розрахунки повної собівартості видобутку однієї тонни руди за періодами роботи умовних кар'єрів (табл. 2). За розрахунковими даними побудовано графік зміни повної собівартості видобутку однієї тонни руди при пониженні гірничих робіт у кар'єрах. Ця залежність представлена на рис. 5.

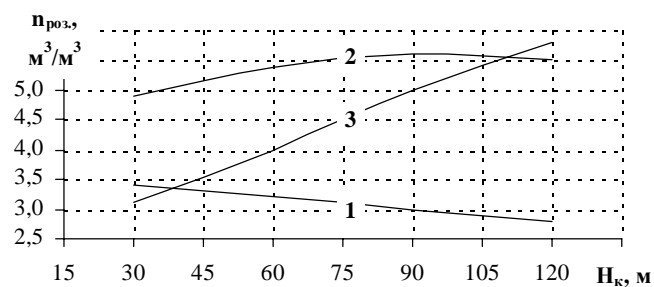


Рис. 4 Залежність поточних коефіцієнтів розкриву від збільшення глибини відпрацювання умовних кар'єрів: 1 – кар'єр № 1; 2 – кар'єр № 2; 3 – кар'єр № 3

Таблиця 2

Повна собівартість видобутку руди за періодами експлуатації кар'єрів, грн./т

Кар'єр	Періоди			
	I	II	III	IV
Кар'єр № 1	76,0	73,0	69,5	67,0
Кар'єр № 2	64,1	69,7	71,8	70,8
Кар'єр № 3	51,8	63,0	74,6	84,6

У вище наведеному було розглянуто роботу та отримано техніко-економічні показники кожного кар'єру окремо.

Оптимізація роботи групи кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату виконується в умовах потреби ринку збуту в залізородній товарній продукції. В даному випадку прийнято те, що на ринок збуту постачається такий вид товарної продукції, як концентрат. Попит в концентраті на ринку збуту становить 25,0 млн. т. З табл. 1 видно, що при роботі трьох кар'єрів обсяг виробництва концентрату становить близько 30,0 млн. т. Необхідно відмітити, що для задоволення попиту на ринку збуту повинна виконуватися наступна умова, млн. т/рік

$$A_k^{P3} = \sum_{i=1}^n A_{k,i}$$

де –  $A_k^{P3}$  – обсяг попиту концентрату на ринку збуту, млн. т/рік;  $A_{k,i}$  – обсяг виробництва концентрату  $i$ -тим кар'єром, млн. т/рік.

Досвід роботи гірничих підприємств з відкритим способом розробки родовищ показує, що завжди прагнуть видобувати корисну копалину з міні-

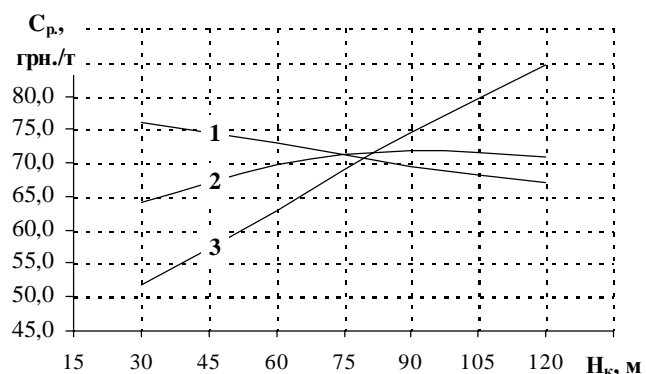


Рис. 5 Залежність повної собівартості видобутку однієї тонни руди від глибини відпрацювання умовних кар'єрів: 1 – кар'єр № 1; 2 – кар'єр № 2; 3 – кар'єр № 3

мальним коефіцієнтом розкриву. Тому, в першу чергу виконаємо оптимізацію групи кар'єрів за критерієм мінімального поточного коефіцієнту розкриву. Базуючись на отриманій залежності (рис. 4) визначимо пріоритетність роботи (виробництво концентру) кожного кар'єру у розглянутих етапах їх роботи. Вочевидь, що перший за пріоритетністю кар'єр буде працювати з повною виробничою потужністю за виробництвом концентрату. Для другого за пріоритетністю кар'єру обсяг виробництва концентрату буде становити, млн. т/рік

$$A_k^{2\Pi} = A_k^{P3} - A_k^{1\Pi}, \quad (1)$$

де  $A_k^{2\Pi}$  – обсяг виробництва концентрату другого за пріоритетом кар'єру, млн. т/рік;  $A_k^{1\Pi}$  – обсяг виробництва концентрату першого за пріоритетом кар'єру, млн. т/рік.

Обсяг виробництва концентрату третього за пріоритетністю кар'єру ( $A_k^{3\Pi}$ ) буде становити, млн. т/рік

$$A_k^{3\Pi} = A_k^{P3} - A_k^{1\Pi} - A_k^{2\Pi}. \quad (2)$$

Відповідно до визначеної пріоритетності роботи кар'єрів встановлюється виробнича потужність кожного кар'єру за видобутком руди ( $A_{p,i}$ ), яка визначається як, млн. т/рік

$$A_{p,i} = \frac{A_{k,i}}{g_{k,i}}. \quad (3)$$

Розподіл продуктивності кар'єрів за видобутком руди, яка визначена за критерієм мінімального поточного коефіцієнту розкриву наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Продуктивність кар'єрів за розподілом пріоритетності, млн. т/рік

Період	Кар'єр № 1	Кар'єр № 2	Кар'єр № 3
I	31,3	6,4	24,4
II	31,3	6,4	24,4
III	31,3	6,4	24,4
IV	31,3	18,3	13,0

Також однією із умов ефективної роботи гірничорудних підприємств є досягнення мінімальних затрат на видобуток руди. Визначення пріоритетності роботи кар'єрів в цьому випадку виконується за аналогією з мінімальним поточним коефіцієнтом розкриву, але за залежністю, яку наведено на рис. 5. Тобто першим кар'єром, який буде працювати з максимальною продуктивністю по руді буде той, у якого найменші затрати на видобуток однієї тонни руди. Останнім буде видобувати руду кар'єр той, у якого найбільша повна собівартість видобутку однієї тонни руди і лише в тому випадку, якщо виникає нестача в обсягах попиту товарної продукції. Обсяги виробництва товарної продукції та продуктивність за рудою визначаються за формулами (1-3). Розподіл продуктивності кар'єрів за видобутком руди, яку визначено за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Продуктивність кар'єрів за розподілом пріоритетності, млн. т/рік

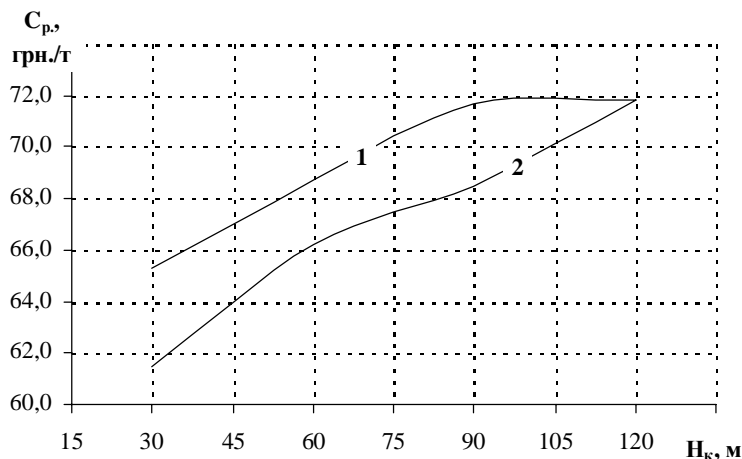
Період	Кар'єр № 1	Кар'єр № 2	Кар'єр № 3
I	20,8	18,3	24,4
II	20,8	18,3	24,4
III	31,3	18,3	13,0
IV	31,3	18,3	13,0

За даними табл. 3 та 4 видно, що пріоритетність роботи кар'єрів є різною. Як в першому так і в другому випадку оптимізації роботи групи кар'єрів собівартість видобутку однієї тони руди в цілому по комбінату ( $C_p^{ГЗК}$ ) буде визначатися наступним чином, грн./т

$$C_p^{ГЗК} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{p,i} \times c_{p,i}}{\sum_{i=1}^n A_{p,i}},$$

де  $c_{p,i}$  – собівартість видобутку однієї тони руди  $i$ -го кар'єру з урахуванням затрат на виконання розкривних робіт, грн./т.

Зміна собівартість видобутку однієї тони руди в цілому по комбінату за обома розглянутими критеріями наведено на рис. 6.



**Рис. 6** Графік залежності собівартості видобутку однієї тони руди в цілому по гірничо-збагачувальному комбінату від приросту глибини відпрацювання умовних кар'єрів: 1 – по критерію мінімального коефіцієнту розкриття; 2 – по критерію мінімальної повної собівартості видобутку руди

В подальшому необхідно виконати дослідження оптимізації виробничої потужності кар'єрів з урахуванням екологічних аспектів їх роботи.

#### Список літератури

1. **Бизов В.Ф.** Обґрунтування технологічних параметрів і показників для оптимізації розвитку гірничих робіт на кар'єрах / В.Ф.Бизов, В.М.Коробко // Проблемы комплексного освоения недр.: Сборник научных трудов. – Днепропетровск: НГАУ. – 2002. – т. 2. – № 14. – С.104-109.
2. **Блізнюков В.Г.** Гірничо-геологічні фактори рентабельності гірничовидобувних підприємств / В.Г.Блізнюков, В.О.Півень, О.В.Плотніков // Проблемы научного обеспечения горнопромышленного комплекса Украины на пороге XXI века.: Сборник научных трудов Государственного научно-исследовательского горнорудного института. – Кривой Рог. – 2001. – С.116-119.
3. **Завсєгдашний В.О.** Система економіко-статистичного аналізу прогнозування показників гірничодобувних підприємств / В.О.Завсєгдашний // Відомості Академії гірничих наук України. – Кривий Ріг.: Мінерал. – 1997. – вип. 2. – С.6-7.
4. **Завсєгдашний В.А.** Экономико-математическая модель горнодобывающего предприятия / В.А.Завсєгдашний, Н.И.Часнык // Разработка рудных месторождений : Респ. межведом. научн.-техн. сборник. – Киев.: Техника. – 1994. – Вып. 55. – С.26–34.
5. **Арсєтьєв А.И.** Производительность карьеров – Москва.: Издательство Санкт-Петербургский горный институт. 2002. – 85 с.
6. **Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий черной металлургии с открытым способом разработки.** – Ленинград: –Гипроруда, 1986. – 264 с.
7. **Нормы технологического проектирования горнорудных предприятий с открытым способом разработки месторождений полезных ископаемых. Горные работы. Ликвидация горнодобывающих предприятий. Техноэкономическая оценка и показатели.** СОУ-Н МПП 73.020-078-1:2007. Киев. Министерство промышленной политики Украины. – 224 с.
8. **Ржевский В.В.** Открытые горные работы Часть 2. Технология и комплексная механизация: Учебн. для вузов – 4-е изд. перераб. и дополн. – Москва.: Недра. 1985. – 549 с.
9. **Новожилов М.Г., Дриженко А.Ю., Маевский А.М.** Высокопроизводительные глубокие карьеры – Москва.: Недра. – 1984. – 188 с.
10. **Реєтович Э.И.** Установление производственной мощности карьеров / Э.И.Реєтович // Теория и практика открытых разработок. – М. – 1973. – № 7-8. – С.73-91.
11. **Шпанский О.В.** Совершенствование методов проектирования производственной мощности карьеров по полезному ископаемому и горной массе / О.В.Шпанский, Д.Н.Лигоцкий, И.А.Ишкулова [и др.] // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – № 4. – С.9-17.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** За результатами роботи отримано техніко-економічні показники роботи кожного кар'єру окремо. Виконано оптимізацію роботи групи кар'єрів, що входять до складу ГЗК за наступними критеріями: за мінімальними коефіцієнтами розкриття по кожному кар'єру; за мінімальною повною собівартістю видобутку руди кожного кар'єру.

Затрати на видобуток однієї тони руди можуть бути знижені на 6 %, якщо оптимізацію роботи групи кар'єрів у системі ГЗК виконувати за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди на кожному кар'єрі.

12. Холодняков Д.Г. Метод определения равномерного режима горных работ с помощью графика минимальных текущих объемов вскрыши / Д.Г.Холодняков // Горный информационно-аналитический бюллетень : Научно-технический журнал. – Москва. – 2011. – № 2. – С.212-217.

13. Ракишев Б.Р. Определение производительности группы карьеров при многих критериях / Б.Р.Ракишев, К.И.Есенберлин // Горный журнал. – М. 1989. – № 8. – С.18-20.

14. Полищук А.К., Полищук Г.К., Михайлов А.М. Разработка месторождений группой карьеров в системе комбината. – Москва.: Недра. – 1975. – 200 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.2020

УДК 532.3:622.765.061

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., А.В. ПІКІЛЬНЯК, канд. техн. наук  
Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ГАЗОВИХ БУЛЬБАШОК У ПРОЦЕСІ ФЛОТАЦІЇ РУДНОЇ ПУЛЬПИ

**Мета.** Метою роботи є встановлення залежності зміни форми та граничної швидкості впливання бульбашки в залежності від чисел Рейнольдса, Мортоні і Бонда, від його початкової форми, співвідношення коефіцієнтів густини та в'язкості, залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса.

**Методи дослідження.** У роботі використані: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду, систематизація існуючих підходів і методів оптимізації управління процесом флотації залізної руди.

**Наукова новизна.** Установлено залежності зміни розмірів газової бульбашки з урахуванням зміни його форми, швидкості потоку, сили поверхневого натягу, густини й в'язкості середовища і фізичних властивостей його оболонки, що дозволяє з більшою точністю управляти газовою фазою у процесі флотації.

**Практична значимість.** Результати роботи використані при проектуванні та освоєнні технічного та алгоритмічного забезпечення систем автоматичного управління технологічним процесом флотації на гірничих підприємствах.

**Результати.** В результаті досліджень встановлено залежність швидкості впливання бульбашки від її діаметра для розчинів з різною в'язкістю, залежність швидкості впливання від часу для різних діаметрів бульбашок, побудовано карту режимів зміни форми бульбашки, залежність зміни граничної швидкості бульбашки від співвідношення коефіцієнтів густини рідини й бульбашки та в'язкості рідини. Основний вплив на зміну форми газової бульбашки здійснюють числа Рейнольдса і Бонда. Високі числа Рейнольдса можуть посилити деформацію форми бульбашки в вертикально-му напрямку за рахунок утворення мікропотоків рідини під бульбашкою. З іншого боку, число Бонда управляє деформацією бульбашки і його відхиленням від сферичної форми. Співвідношення коефіцієнтів густини впливає на зміну форми тільки при низьких значеннях і більш істотно впливає на швидкість спливання. Форма бульбашки і кінцева швидкість спливання в більшій мірі залежить від співвідношення коефіцієнтів в'язкості між бульбашкою і рідиною в режимі з низькою в'язкістю.

**Ключові слова:** флотація, діаметр газової бульбашки, газова фаза пульпи, зміна форми, розподіл за розміром.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-48-54

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Одним з найбільш поширених процесів поділу в збагачувальній промисловості і найбільш повною та універсальною операцією переробки мінеральної сировини є флотація. Кількість подрібненої руди, яка переробляється за допомогою флотації, становить близько 9 млрд т на рік, тому важливість флотаційної технології в глобальній економіці дуже велика. Оптимальна ступінь поділу мінералів в процесі флотації при зміні характеристик мінеральної сировини досягається шляхом управління кількістю повітря, що подається у флотаційну камеру, товщиною пінного шару і рівнем пульпи, а також продуктивністю мішалки. Для розуміння фізичних процесів, що визначають флотацію необхідні точні дані про параметри газової фази, з яких найбільш важливими є розмір і розподіл газових бульбашок за розміром. Ефективність процесу прямо пов'язаний із числом зіткнень між частками й бульбашками, які залежать від співвідношення їх розмірів. Розмір бульбашки газу визначає площа поверхні на якій взаємодіють тверді частки й бульбашки, яка вносить істотний вклад у гідродинаміку системи й загальну продуктивність флотації. Розмір одиничної бульбашки газу й розподіл газових бульбашок за розміром у камері сильно залежить від різних експлуатаційних, технічних і хімічних факторів, вплив яких слід ураховувати при проектуванні або моделюванні процесу флотації.