

© Б.Ю. Собко¹, О.В. Ложников¹, М.В. Вороний¹¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ НАСИПНОЇ ГУСТИНИ ГІРНИЧОЇ МАСИ ЗАЛІЗОРУДНОГО КАР'ЄРУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КОЛІСНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

© B. Sobko¹, O. Lozhnikov¹, M. Voronyi¹¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DETERMINATION THE INFLUENCE OF THE ROCK MASS DENSITY ON THE PRODUCTIVITY OF WHEEL LOADERS AT THE IRON ORE PIT MINING

Мета. Встановити залежність продуктивності фронтального навантажувача від насипної густини гірничої маси при розробці залізорудного родовища.

Методика дослідження. При розробці методики використовувався аналітичний та розрахунковий методи досліджень для визначенню часу відпрацювання гірничої маси різної насипної густини фронтальним навантажувачем. Відповідні методи розрахунків актуальні для визначення необхідної кількості технічного обладнання та прийнятні для сучасного гірничого виробництва.

Результати дослідження. Розроблено методику встановлення тривалості робочого циклу та продуктивності фронтального навантажувача під час відпрацювання різних типів гірничої маси на залізорудному підприємстві. Встановлено ефективні параметри видобутку гірничої маси в залежності від зміни насипної густини порід. В процесі дослідження встановлено взаємозв'язок насипної густини гірничої маси і коефіцієнта наповнення та коефіцієнта розпушення гірничої породи. Показники цих коефіцієнтів залежать від фізико-механічних властивостей м'яких та скельних порід і можуть змінювати продуктивність фронтальних навантажувачів до 5 разів.

Наукова новизна. Встановлено, що в основі тривалості робочого циклу лежить час черпання (в залежності від питомої ваги гірничої маси) час маневрування та час розвантаження, які обумовленні технічними характеристиками гірничих машин. Визначено вплив насипної густини гірничої маси на тривалість робочого циклу та продуктивність фронтального навантажувача. Розраховано необхідну кількість фронтальних навантажувачів різної потужності в якості виймально-навантажувального обладнання в умовах розробки залізорудного родовища.

Практичне значення. Розроблена методика розрахунку продуктивності фронтального навантажувача в залежності від густини гірничої маси дозволяє визначити ефективну кількість навантажувачів в умовах відпрацювання залізорудних кар'єрів, що підтверджено на прикладі Єристівського ГЗК.

Ключові слова: продуктивність виймально-навантажувального обладнання, фронтальний навантажувач, насипна густина гірничої маси, залізорудне родовище.

1. Актуальність. Сучасний стан залізорудних кар'єрів характеризується значною глибиною (більше 300 м), яка і надалі буде збільшуватися до проектних позначок. Це призводить до збільшення загального фронту гірничих робіт у

кар'єрі, який вже зараз сягає 20-25 км. Щоб забезпечити за гірничими можливостями продуктивність кар'єру на рівні проектної, а це, як правило, більше 30 млн т/рік, достатнім буде активний фронт 3,5-5 км. Тому цілком зрозумілою є тенденція на сучасних кар'єрах концентрувати гірничі роботи на їх окремих дільницях. У теорії проектування така практика відома як відпрацювання кар'єрів етапами та чергами. Існуючі в цій теорії критерії та методи планування параметрів робочої зони кар'єру з урахуванням змінних якісних характеристик рудної сировини, взаємозв'язку режиму гірничих робіт з проектною потужністю, потребують удосконалення [1].

Традиційно, в якості виймально-навантажувального комплексу обирають екскаватори та збільшують їх ефективність за рахунок підвищення потужності робочого обладнання та технічних показників. Тому в даній роботі розглядається підвищення ефективності використання виймально-навантажувального обладнання за допомогою фронтальних навантажувачів, які в свою чергу мають ряд переваг перед екскаваторами: мобільність, універсальність, сумісність з транспортним устаткуванням та можливість роботи як виймально-транспортного обладнання.

За рахунок оптимізації ефективності роботи виймально-навантажувальної техніки досягається зменшення кількості парку необхідного обладнання, що в свою чергу зменшує амортизаційні витрати та витрати на фонд заробітної плати, при цьому зберігається або збільшується продуктивність видобутку кар'єру в цілому. В результаті такої оптимізації покращуються техніко-економічні показники та зменшуються витрати на видобуток корисних копалин.

2. Аналіз досліджень. Огляд літературних джерел дозволив проаналізувати, що основні дослідження зі встановлення впливу на продуктивність фронтальних навантажувачів присвячені вдосконаленню технологічних схем відпрацювання робочого вибою, а також встановленню впливу якості подрібнення гірничої маси від організації схеми буро-вибухових робіт.

У роботі [2] встановлено залежність тривалості робочого циклу від отриманих під час масового вибуху негабаритних шматків породи. Виявлено, що за рахунок наявності негабаритів, час циклу навантаження значно збільшується, що призводить до погіршення показників продуктивності.

Дослідження, виконані у роботі [3] присвячені визначенню залежності розмірів середнього діаметра кускуватої гірничої маси на коефіцієнт наповнення робочого органу навантажувального обладнання. Також в даній роботі встановлено залежність коефіцієнта навантаження від типорозміру виймально-навантажувального устаткування.

Матеріали, наведені в роботах [4-5], дозволяють визначити необхідні параметри елементів системи розробки в залежності від насипної густини гірничої маси та технічні показники робочого устаткування. Ці дослідження дають можливість розрахувати тривалість циклу, продуктивність та необхідну кількість виймально-навантажувального обладнання в якості фронтального навантажувача.

3. Встановлення невирішених проблем. Аналіз існуючих науково-дослідних робіт дозволив встановити, що на продуктивність виймально-навантажувального обладнання в кар'єрі впливає досить велика кількість факторів. Але головним чином ці фактори залежать від основної фізико-механічної властивості гірничої маси – насипної густини. В свою чергу цей показник має вплив на вибір технології буро-вибухових робіт і на вихід розміру частин породи та негабаритів, наявність яких призводить до погіршення продуктивності виймально-навантажувального обладнання та гірничого підприємства в цілому.

4. Постановка задач. Аналіз результатів існуючих науково-дослідних робіт дозволив встановити, що визначення впливу показника насипної густини на продуктивність колісних навантажувачів є актуальним питанням, що недостатньо вивчене. Його вирішення дозволить підвищити ефективність вибору типу навантажувачів і матиме позитивний вплив при встановленні кількості виймально-навантажувального устаткування в кар'єрі [6], що сприятиме зменшенню капітальних витрат і зниженню собівартості розкривних і видобувних робіт. Для досягнення поставленої мети необхідно: визначити залежність часу черпання навантажувача від насипної густини гірничої маси; встановити вплив насипної густини гірничої маси на продуктивність навантажувачів; визначити кількість робочих змін колісних навантажувачів при розробці ділянки кар'єру з урахуванням впливу насипної густини [7].

5. Основний матеріал. Методика визначення продуктивності фронтального навантажувача представлена нижче.

1. Тривалість робочого циклу навантажувача в режимі виймально-навантажувального обладнання:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{ч}} + t_{\text{м}} + t_{\text{р}}, \text{ с}$$

$$t_{\text{м}} = \frac{2L}{v_{\text{ср}}}, \text{ с}$$

де $t_{\text{ч}}$ – час черпання гірничої маси, с; $t_{\text{м}}$ – час маневрування, с; $t_{\text{р}}$ – час розвантаження ковша, с; L – відстань переміщення породи, м; $v_{\text{ср}}$ – середня швидкість переміщення фронтального навантажувача, м/с.

2. Технічна продуктивність фронтального навантажувача за годину:

$$Q_{\text{т}}^{\text{н}} = \frac{3600q_{\text{н}}K_{\text{н.к}}}{t_{\text{ц}}\gamma K_{\text{р.к}}}, \text{ м}^3/\text{год},$$

де $q_{\text{н}}$ – вантажопідйомність фронтального навантажувача, т; $K_{\text{н.к}}$ – коефіцієнт наповнення ковша; γ – густина гірничої маси, т/м³; $K_{\text{р.к}}$ – коефіцієнт розпушення породи в ковші.

3. Експлуатаційна (змінна) продуктивність фронтального навантажувача:

$$Q_{\text{зм}}^{\text{н}} = Q_{\text{т}}^{\text{н}}T_{\text{зм}}K_{\text{с}}, \text{ м}^3/\text{змін},$$

де $T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, год; $K_{\text{с}}$ – коефіцієнт використання навантажувача на протязі зміни.

4. Річна продуктивність фронтального навантажувача:

$$Q_{річ}^H = Q_{зм}^H N_{зм} N_{р.дн}, \text{ м}^3/\text{рік},$$

де $N_{зм}$ – кількість змін в робочому дні, од.; $N_{р.дн}$ – кількість робочих днів у році, од.

5. Кількість інвентарного парку фронтальних навантажувачів:

$$N_n = \frac{K_{рез} V_k}{Q_{річ}^H}, \text{ од.},$$

де $K_{рез}$ – коефіцієнт резерву; V_k – річна продуктивність кар'єру по гірничій масі, $\text{м}^3/\text{рік}$.

При виконанні досліджень розглядалось використання фронтального навантажувача в різних умовах: за насипною густиною гірничої маси та типорозміром обладнання. Приймалися наступні вихідні дані: відстань переміщення породи – 15 м; тривалість зміни – 12 год.; коефіцієнт використання навантажувача – 0,65; кількість змін в робочому дні – 2 од.; кількість робочих днів у році – 275 од.; коефіцієнт резерву – 1,2.

Відповідно до методики визначення продуктивності фронтального навантажувача, вплив насипної густини гірничої породи на продуктивність обладнання залежить від тривалості часу черпання колісного навантажувача. При виконанні досліджень було розглянуто параметри роботи трьох різних за вантажопідйомністю фронтальних навантажувачів фірми Caterpillar: CAT 994К, CAT 992К та CAT 990К [6], коротка технічна характеристика яких наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Технічна характеристика фронтальних навантажувачів фірми Caterpillar

Найменування	Показники		
	CAT 994К	CAT 992К	CAT 990К
Номінальне корисне навантаження, т	38,1	21,7	15,8
Діапазон місткості ковшів, м^3	19,1 – 24,5	10,7 – 12,3	8,6 – 10,0
Корисна потужність, кВт	1297	671	521
Час розвантаження, с	3,3	1,8	2,9
Експлуатаційна маса, т	240	101	81

Оскільки на Єристівському ГЗК використовується фронтальний навантажувач CAT 994К, саме для нього експериментальним шляхом були визначені показники часу черпання на ділянках кар'єру з м'якими і скельними гірничими породами, а також корисною копалиною. На рис. 1 подано отриману залежність тривалості часу черпання фронтального навантажувача CAT 994К від насипної густини гірничої маси, що виймається.

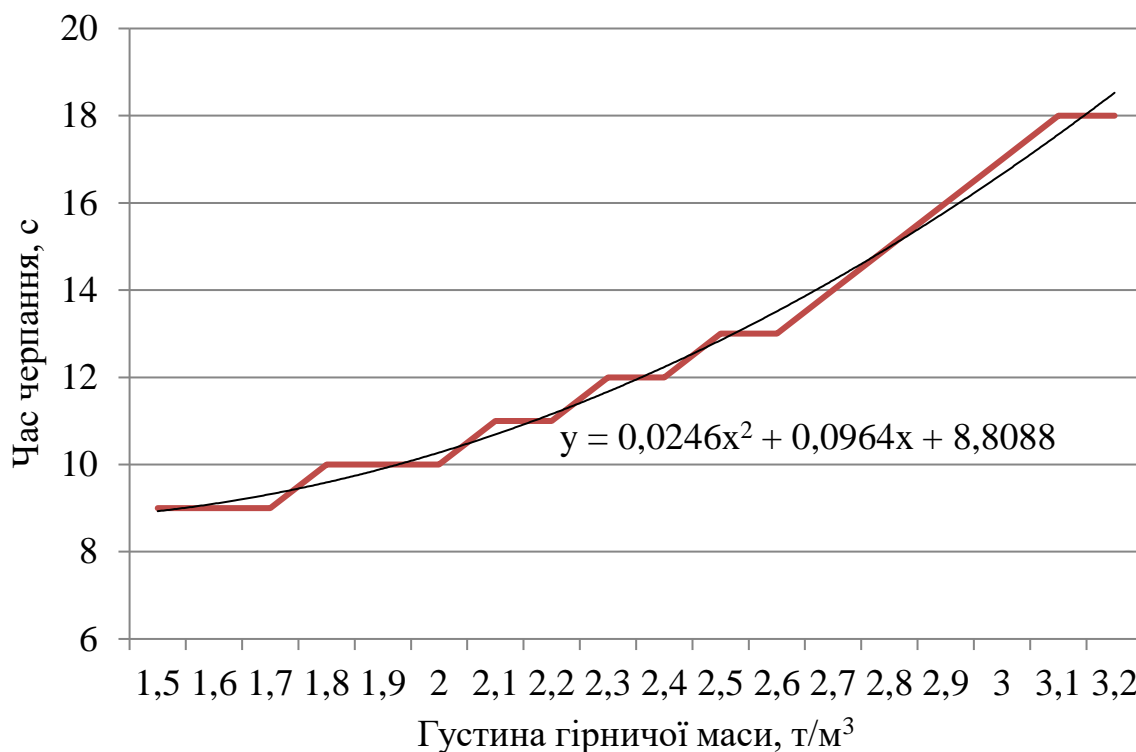


Рис. 1. Залежність часу черпання від густини гірничої маси при роботі фронтального навантажувача САТ 994К в умовах Єристівського ГЗК

Виходячи з отриманої функції залежності часу черпання, $t_{ц} = 0,0246\gamma^2 + 0,0964\gamma + 8,8088$, з'являється можливість визначити тривалість робочого циклу для різних типів фронтальних навантажувачів. Відповідно до отриманої функції залежності та технічних характеристик навантажувачів (див. табл. 1), визначена тривалість їх робочого циклу в залежності від насипної густини гірничої маси наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Тривалість робочого циклу навантажувачів при змінній насипній густині гірничої маси

Густина гірничої маси γ , т/м ³	Тривалість робочого циклу $t_{ц}$, с		
	САТ 994К	САТ 992К	САТ 990К
1,5	29,3	24,8	22,4
2,0	30,3	25,8	23,4
2,5	33,3	28,8	26,4
3,0	37,3	32,8	30,4
3,2	38,3	33,8	31,4

Отримані результати розрахунків (див. табл. 2) дозволяють зробити висновок, що в основі тривалості робочого циклу лежить час черпання (в залежності

від питомої ваги гірничої маси) час маневрування та час розвантаження, які обумовлені технічними характеристиками. Встановлені залежності дозволяють стверджувати, що зі збільшенням густини зростає тривалість робочого циклу навантажувача. Це пояснюється тим, що час черпання ковша збільшується через складність наповнення ковша щільними породами. При цьому змінюються коефіцієнти наповнення та розпушення, за рахунок яких знижується ефективність номінального об'єму ковша. Також з розрахунків можна зробити висновок: чим більша вантажопідйомність навантажувача, тим більший робочий цикл за рахунок інертності його робочого обладнання.

Відповідно до наведеної раніше методики встановлені залежності технічної продуктивності фронтальних навантажувачів від насипної густини гірничої маси (рис. 2).

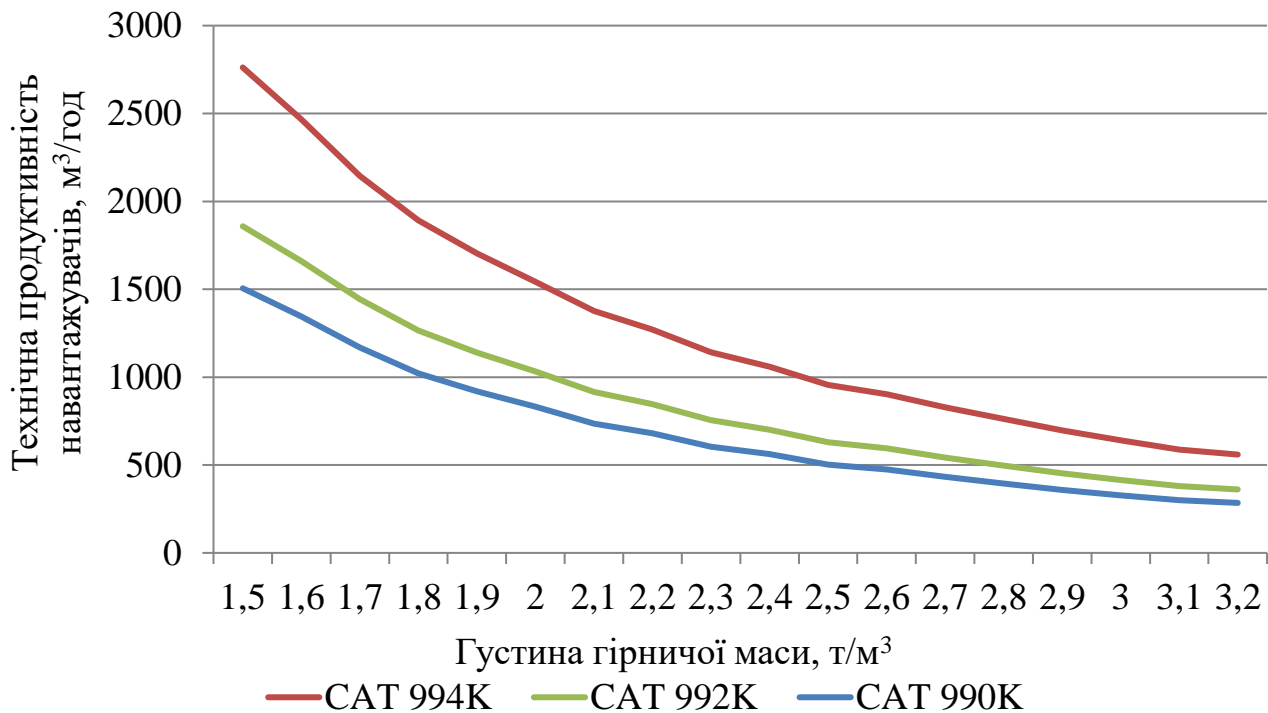


Рис. 2. Залежність продуктивності фронтальних навантажувачів від густини гірничої маси

З отриманих результатів (див. рис.2) встановлено, що продуктивність фронтальних навантажувачів має досить велику залежність від типу гірничої маси, що виймається. Під час екскавації м'яких порід фронтальний навантажувач працює в найпродуктивнішому режимі. Але чим більша густина породи, тим пропорційно нижчий показник ефективності використання фронтального навантажувача. Різниця в продуктивності виймання гірничої маси за об'ємом становить майже в 5 разів в порівнянні з м'якими та скельними породами.

Отримані результати розрахунків (рис. 2), дозволяють встановити необхідну кількість робочих змін для відпрацювання ділянок з різними типами порід на залізорудному кар'єрі в умовах Єривівського ГЗК. При відпрацюванні цього родовища є три основні групи порід по густині: м'які ($\gamma = 2,0 \text{ т/м}^3$) та скельні породи розкриву ($\gamma = 3,0 \text{ т/м}^3$), корисні копалини ($\gamma = 3,2 \text{ т/м}^3$). При проведенні досліджень прийнято однаковий об'єм відпрацювання по ділянках з різними за густиною породами, що дорівнює $2,0 \text{ млн м}^3$. Результати розрахунків наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Необхідна кількість робочих змін для відпрацювання ділянок кар'єру «Єривівського» ГЗК фронтальними навантажувачами

Типи порід	Насипна густина, т/м^3	Річна продуктивність ділянки кар'єру, млн м^3	Кількість робочих змін для відпрацювання ділянки фронтальним навантажувачем, од.		
			САТ 994К	САТ 992К	САТ 990К
М'які породи розкриву	2,0	2,0	200	298	370
Скельні породи розкриву	3,0		481	742	940
Корисні копалини	3,2		550	852	1082

Згідно з отриманих результатів (див. табл. 3) встановлено, що кількість робочих змін для відпрацювання ділянок з різною гірничою масою по-перше залежить від насипної густини порід що виймаються, а по-друге від технічних характеристик навантажувачів.

Отримані результати свідчать, що збільшення насипної густини у 1,6 рази, призводить до зростання часу відпрацювання ділянки кар'єру об'ємом $2,0 \text{ млн м}^3$ від 2,25 до 2,92 разів, в залежності від типорозмірів навантажувача. Це пов'язано з тим, що більш щільна гірнична маса потребує пропорційного збільшення часу черпання та усього робочого циклу в цілому. Також більш щільна порода не дає використовувати робоче обладнання ефективно через порожнечу між кускуватими шматками гірничої маси. Залежність часу відпрацювання ділянки кар'єру від насипної густини гірничої маси графічно відображена на рис. 3.

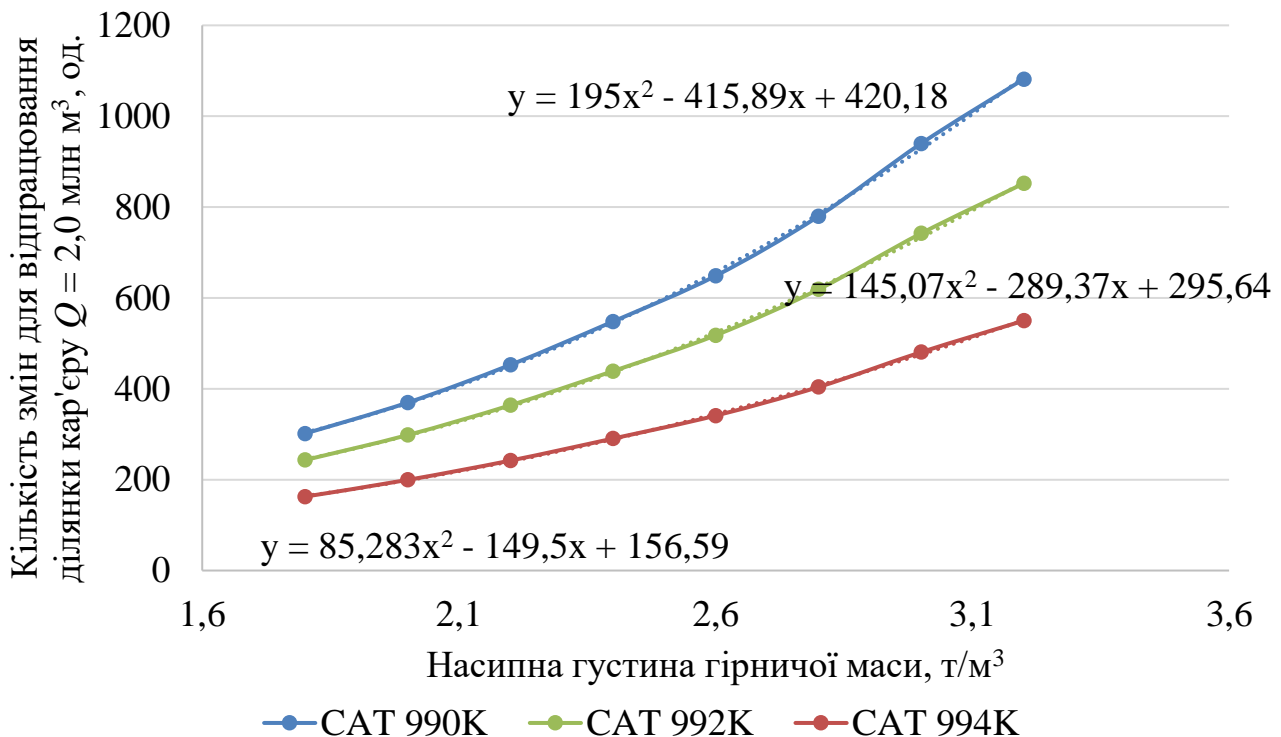


Рис. 3. Залежність терміну відпрацювання ділянки кар'єру об'ємом 2,0 млн м³ від насипної густини гірничої маси

Аналіз встановлених залежностей (див. рис. 3) дозволяє стверджувати, що час відпрацювання ділянки кар'єру з однаковим об'ємом має ступеневу залежність від насипної густини гірничої маси. Для навантажувача САТ 990К ця залежність описується функцією $t = 195\gamma^2 - 415,89\gamma + 420,18$; для САТ 992К – $t = 145,07\gamma^2 - 289,37\gamma + 295,64$; для САТ 994К – $t = 85,283\gamma^2 - 149,5\gamma + 156,59$. Встановлені функції дозволяють визначати необхідну кількість колісних навантажувачів при заданій продуктивності ділянки кар'єру, зменшити час простоїв, оптимізувати вибір типорозміру виймально-навантажувального устаткування.

Встановлені залежності дозволили визначити, що в умовах Єристівського ГЗК відпрацювання однакових за об'ємом ділянок кар'єру з м'якими і скельними породами триватиме різні терміни при застосуванні однакових моделей колісних навантажувачів САТ. При розробці ділянок об'ємом 2,0 млн м³ зміна насипної густини з 2,0 до 3,2 м³/т призведе до збільшення часу відпрацювання: при використанні навантажувача САТ 994К з 200 до 550 змін; САТ 992К – з 298 до 852 змін; САТ 990К – з 370 до 1082 змін.

Висновки. Розроблено методику розрахунку продуктивності фронтального навантажувача в залежності від густини гірничої маси, яка дозволяє визначити ефективне застосування навантажувачів в умовах відпрацювання залізрудних кар'єрів з використанням навантажувачів фірми Caterpillar.

Встановлено залежність робочого циклу навантажувачів від насипної густини гірничої маси, яка дозволяє стверджувати, що при зростанні густини у 1,6 рази, час відпрацювання ділянки кар'єру збільшується від 2,25 до 2,92 разів, в залежності від типорозмірів навантажувача.

Визначено, що при розробці ділянок об'ємом 2,0 млн м³ зміна насипної густини з 2,0 до 3,2 м³/т призведе до збільшення часу їх відпрацювання навантажувачем САТ 994К з 200 до 550 змін; САТ 992К – з 298 до 852 змін; САТ 990К – з 370 до 1082 змін.

Перелік посилань

1. Луценко, С. О. (2008). *Визначення режиму гірничих робіт при змінних параметрах і інтенсивності відпрацювання ділянок залізрудного кар'єру*. (автореф. дис. канд. техн. наук 05.15.03)
2. Grant, J. R., & Dutton, A. J. (1983). Development of a fragmentation monitoring system for evaluating open slope blast performance at Mount Isa Mines. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden* (pp. 637-652).
3. Nielsen, K. (1987). Model studies of loading capacity as a function of fragmentation from blasting. In *Proceedings of 3rd Mini-Symposium on Explosives and Blasting Research* (pp. 71-80).
4. Singh, S., & Yalcin, T. (2002). Effects of muck size distribution on scooping operations. In *Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique* (Vol. 1, pp. 315-326). ISEE; 1999.
5. Zhang, W., Wang, S., Hou, L., & Jiao, R. J. (2021). Operating data-driven inverse design optimization for product usage personalization with an application to wheel loaders. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100212>
6. *Екскаратори навантажувачі* (n.d). Retrieved November 29, 2022, from <https://zeppelin.ua/products>
7. Symonenko, V. I., Haddad, J. S., Cherniaiev, O. V., Rastsvietaiev, V. O., & Al-Rawashdeh, M. O. (2019). Substantiating systems of open-pit mining equipment in the context of specific cost. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 100(2), 301-305. <https://doi.org/10.1007/s40033-019-00185-2>

ABSTRACT

Aim. To establish the dependence of the front loader performance on the bulk density of the rock mass at the mining of iron ore deposit.

Research methodology. At the developing the methodology, analytical and computational research methods were used to determine the time of working off rock mass of different density by a front loader. Appropriate calculation methods are relevant for determining the required amount of technical equipment and are acceptable for modern mining.

Research results. A method has been developed for establishing the duration of the working cycle and the productivity of a front-end loader when mining different types of rock mass at an iron ore pit mining. Efficient parameters of rock extraction have been established, depending on changes in rock density. In the course of the study, the relationship between the density of the rock mass and the coefficient of filling and the coefficient of loosening of the rock was established. The influence of these coefficients directly on the performance of front loaders is determined. The indicators of these coefficients depend on the physical and mechanical properties of soft and rocky rocks and can change the performance of front loaders up to 5 times.

Scientific novelty. It has been established that the duration of the working cycle is based on the time of digging (depending on the specific gravity of the rock mass), the time of maneuvering and the time of unloading, which are determined by the technical characteristics of mining machines. The influence of the bulk density of the rock mass on the duration of the working cycle and the performance

of the front loader is determined. The required number of front-end loaders of different capacities was calculated as excavation and loading equipment in the conditions of the iron ore deposit mining.

Practical value. The developed method for calculating the performance of a front-end loader depending on the density of the rock mass makes it possible to determine the effective number of loaders in the conditions of mining iron ore pits, which is confirmed by the example of the Eristovsky MPP.

Keywords: *performance of excavation and loading equipment, front loader, rock mass density, iron ore deposit.*