ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕКСКАВАТОРІВ В КАР'ЄРІ**А. І. Крючков, Ю. Й. Бесарабець, Л. І. Євтеєва**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна. E-mail: l2212i@ukr.net

Дослідженнями встановлено, що енергоємність процесу екскавації для екскаваторів типу ЕКГ пов'язана з їх експлуатаційною продуктивністю екстремальною залежністю. Розроблені математичні моделі процесів екскавації дозволяють встановити оптимальну швидкість копання екскаватора, яка відповідає мінімальному значенню енергоємності екскавації для всіх категорій гірських порід у відповідності з їх класифікацією. Робота екскаватора в оптимальному режимі в залежності від категорії порід дозволяє знизити енергетичні витрати від 10 до 25 %.

Ключові слова: екскаватор, продуктивність, енергоємність, моделювання, оптимізація, енергозбереження.

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРОВ
В КАРЬЕРЕ****А. И. Крючков, Ю. И. Бесарабец, Л. И. Евтеева**

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

просп. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина. E-mail: l2212i@ukr.net

Исследованиями установлено, что энергоёмкость процесса эскавации для экскаваторов типа ЭКГ связана с их эксплуатационной производительностью экстремальной зависимостью. Разработанные математические модели процессов эскавации позволяют установить оптимальную скорость копания экскаватора, которая соответствует минимальному значению энергоёмкости эскавации для всех категорий горных пород в соответствии с их классификацией. Работа экскаватора в оптимальном режиме в зависимости от категории пород позволяет снизить энергетические затраты от 10 до 25%.

Ключевые слова: экскаватор, производительность, энергоёмкость, моделирование, оптимизация, энергосбережение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На видобуток, подрібнення та транспортування корисних копалин витрачається досить значна частка електричної енергії, яка виробляється в країні. Тому енергія є лімітуючим фактором розвитку гірничовидобувної промисловості, а її збереження являє собою вузлову проблему і є актуальною науково-практичною задачею.

Характерна особливість гірничовидобувної галузі промисловості полягає в тому, що питомі енерговитрати залежать від цілого ряду природних факторів, таких, як міцність та опір копанню корисних копалин і вміщуючих порід [1, 2].

Для порівняльної оцінки ефективності роботи кар'єрів по видобутку будівельних матеріалів використовують показник питомих сумарних зведених витрат, або інший показник, в який входять грошові витрати на виробництво продукції.

Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Випуск 1/2018(21).

Але робота таких підприємств за два останніх десятиріччя показала, що в умовах нестабільної економіки оцінка ефективності виробництва по вартісних показниках призводить до негативних наслідків. За цих умов значно кращий результат дає використання натуральних показників [3].

В зв'язку з цим в роботі використовується в якості показника ефективності енергоємність екскаваційних робіт [2, 3, 4, 5]. З іншого боку, введення такого показника зумовлено значним зростанням в останній час тарифу на всі види енергії в тому числі і на електричну енергію.

Найбільш глибоко і системно зв'язок енергоємності процесу екскавації гірських порід з параметрами процесу екскавації досліджений в роботі [2]. Результати цих досліджень, проведених при роботі екскаватора на блоках з різними гірничо-технологічними умовами, фізико-технічними властивостями гірської маси і параметрами розвалів, дозволили рекомендувати до практичного використання енергетичну шкалу екскавіруємості гірських порід [2].

Зниження високої експлуатаційної енергоємності екскаваційних робіт можливе як за рахунок впровадження нового більш продуктивного обладнання, так і використання працюючого обладнання в режимах, що також дозволяють знизити енергоємність екскавації.

Як показали експериментальні і аналітичні дослідження [6, 7, 8], одним з таких режимів є режим локальної оптимізації експлуатаційної продуктивності екскаваційних робіт.

В цьому зв'язку, **метою** роботи є встановлення оптимальних параметрів режиму роботи екскаваторів типу ЕКГ на кар'єрах по видобутку будівельних матеріалів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. Теоретичні викладки, приведені в роботах [9, 10], та експериментальні дослідження показали, що енергетичні витрати на екскавацію гірських порід описуються рівнянням типу Гамільтона-Якобі

$$\frac{\partial D(t)}{\partial t} - \frac{e_K K_B \Pi_K}{E_x} D(t) = 0, \quad (1)$$

та рівнянням ФПК

$$\frac{\partial \omega(t)}{\partial t} = \frac{D}{2m} \nabla^2 \omega(t) + \frac{\nabla D}{m} \nabla \omega(t) + \frac{U}{D} \omega(t), \quad (2)$$

де $D(t)$ – механічна дія, яка витрачається на екскавацію установленної кількості метрів кубічних гірської маси, Дж·с; E_x – енергія холостого ходу екскаватора, Дж; e_K – енергоємність процесу копання, Дж/м³; K_B – коефіцієнт використання екскаватора за зміну; Π_K – продуктивність копання екскаватора, м³/с; $\omega(t)$ – нестационарна щільність ймовірності координат траєкторії руху ковша в масиві; m – маса ковша з гірською породою; U – потенціальна енергія ковша з породою, Дж. Необхідно відмітити, що кінетична та потенціальна енергії враховані в енергоємності копання e_K .

Розв'язок першого рівняння з врахуванням початкових умов можна записати у вигляді

$$D(t) = E_x \cdot t_k \exp \left[\int_0^{t_k} \frac{e_K K_B \Pi_K}{E_x} dt \right], \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (3)$$

Потужність, яка витрачається приводом на процес копання описується виразом

$$N_E(t) = \frac{D(t)}{t_k^2} = N_x \exp \left[\int_0^{t_k} \frac{e_K K_B \Pi_K}{N_x t_k} dt \right] = N_x \exp \left[\frac{e_K K_B \Pi_K}{N_x} \right]. \quad (4)$$

Розкладаючи цей вираз в степеневий ряд і обмежившись квадратичним

поліномом, одержимо: $N_E = N_x + e_K K_B \Pi_K + \frac{e_K^2 K_B^2}{2N_x} \Pi_K^2 + \dots$

По своїй структурі це рівняння має екстремум відносно Π_K , що буде використано в подальшому аналізі.

Розв'язок рівняння ФПК дає аналітичний вираз для щільності ймовірності $\omega(\Pi_K, t)$. Тоді математичне очікування для потужності копання знаходимо за виразом

$$\begin{aligned} \bar{N}_E &= \int_0^{t_k} N_E \omega(\Pi_K, t) d\Pi_K = \int_0^{t_k} N_x \omega(\Pi_K, t) d\Pi_K + \\ &+ \int_0^{t_k} e_K K_B \Pi_K \omega(\Pi_K, t) d\Pi_K + \int_0^{t_k} \frac{e_K^2 K_B^2}{2N_x} \Pi_K^2 \omega(\Pi_K, t) d\Pi_K. \end{aligned}$$

Проінтегрувавши це рівняння, одержимо:

$$\bar{N}_E = \bar{N}_x + \bar{e}_K \bar{\Pi}_E + \frac{\bar{e}_K^2}{2N_x} \left[\left(1 - \frac{\Pi_0}{\bar{\Pi}_E} \right)^2 + \left(1 + \frac{\sigma_{\Pi E}^2}{\bar{\Pi}_E^2} \right) \right] \bar{\Pi}_E^2, \quad (5)$$

де $\bar{N}_E$ – середня потужність приводів екскаватора при експлуатаційній продуктивності; $\bar{e}_K$ – середня енергоємність процесу копання; $\bar{\Pi}_E$ – математичне очікування експлуатаційної продуктивності екскаватора ($\bar{\Pi}_E = \bar{K}_B \cdot \bar{\Pi}_K$); $\bar{N}_x$ – потужність приводу при режимі холостого ходу; $\sigma_{\Pi E}^2$ – дисперсія експлуатаційної продуктивності екскаватора; $\Pi_0 = \frac{\sqrt{2} N_x}{\bar{e}_K}$ – оптимальне значення експлуатаційної продуктивності.

Експлуатаційна енергоємність екскаваторних робіт розраховується за виразом:

$$e_E = \frac{\bar{N}_E}{\bar{\Pi}_E} = \frac{A}{\bar{\Pi}_E} + B \bar{\Pi}_E + C, \text{ Дж/м}^3, \quad (6)$$

$$\text{де } A = N_x; \quad B = \frac{e_K^2}{2N_x} \left[\left(1 - \frac{\Pi_K^0}{\bar{\Pi}_E} \right)^2 + \left(1 + \frac{\sigma_{\Pi E}^2}{\bar{\Pi}_E^2} \right) \right]; \quad C = \bar{e}_K.$$

Таким чином, в залежності (6) враховується не тільки відхилення середньої продуктивності по циклам за зміну від оптимального значення $\bar{\Pi}_E^2 \left(\frac{\bar{\Pi}_E - \Pi_0}{\bar{\Pi}_E} \right)^2$, а і дисперсія продуктивності, як для кожного цикла копання, так і по циклам за зміну $\bar{\Pi}_E^2 \left(\frac{\bar{\Pi}_E^2 + \sigma_{\Pi\text{Ц}}^2 + \sigma_{\bar{\Pi}}^2}{\bar{\Pi}_E^2} \right) = \bar{\Pi}_E^2 (1 + R_{\text{Ц}}^2 + R_{\bar{\Pi}}^2)$.

Вираз (6) має екстремальний вигляд, тобто оптимальному значенню експлуатаційної продуктивності екскаватора $\Pi_E = \Pi_0$ відповідає мінімальне значення енергоємності $e_{\min}$ (рис. 1).

Рисунок 1 – Експлуатаційна енергоємність (e_E) процесу екскавації в залежності від швидкості копання (V_K) для шести категорій гірських порід

Дослідження залежності (6) на екстремум $\frac{\partial e_E}{\partial \bar{\Pi}_E} = -\frac{A}{\bar{\Pi}_E^2} + B = 0$, дозволяє встановити оптимальне значення експлуатаційної продуктивності екскаватора з врахуванням випадкового характеру коливань як продуктивності копання на циклі, так і коливань середньої продуктивності копання по циклам за зміну:

$$\Pi_0^\phi = \sqrt{\frac{A}{B}} = \frac{N_x}{e_K} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\left[\left(\frac{\bar{\Pi}_E - \Pi_0}{\bar{\Pi}_E} \right)^2 + \left(1 + \frac{\sigma_{\Pi E}^2}{\bar{\Pi}_E^2} \right) \right]}}, \quad (7)$$

де $\Pi_0 = \frac{N_x \sqrt{2}}{\bar{e}_K}$ – абсолютний оптимум продуктивності при $\sigma_{\Pi E} \rightarrow 0$, а $\bar{\Pi}_E \rightarrow \Pi_0$.

Оптимальному значенню експлуатаційної продуктивності екскаватора Π_0^ϕ відповідає мінімальна величина енергоємності

$$\begin{aligned} e_E^{\min} &= 2\sqrt{A \cdot B} + C = 2\sqrt{\frac{e_K^2 N_x}{N_x \cdot 2} \left[\left(\frac{\bar{\Pi}_E - \Pi_0}{\bar{\Pi}_E} \right)^2 + \left(1 + \frac{\sigma_{\Pi E}^2}{\bar{\Pi}_E^2} \right) \right]} + \bar{e}_K = \\ &= \bar{e}_K \left\{ \sqrt{2 \left[\left(\frac{\bar{\Pi}_E - \Pi_0}{\bar{\Pi}_E} \right)^2 + \left(1 + \frac{\sigma_{\Pi E}^2}{\bar{\Pi}_E^2} \right) \right]} + 1 \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

При автоматизованому управлінні процесом копання можливий режим, при якому $\bar{\Pi}_E = \Pi_0^\phi \rightarrow \Pi_0$, $\sigma_{\Pi E} \rightarrow 0$, $e_E^{\min} \rightarrow e_0^{\min}$ (рис. 2).

Рисунок 2 – Вплив випадкових коливань (варіації R_V) швидкості копання V_K екскаватора на експлуатаційну енергоємність e_E процесу екскавації

При ручному управлінні процесом екскавації для роботи в оптимальному режимі машиніст повинен: видержувати на кожному циклі $\bar{V}_{KЦ}$ якомога ближче до V_K^0 ; зменшити коливання швидкості копання на кожному циклі до $\sigma_{\Pi E} \rightarrow \sigma_{\Pi E}^{\min}$.

З виразів (7) та (8) випливає, що як оптимальна експлуатаційна продуктивність екскавації Π_0^ϕ , так і мінімальна величина експлуатаційної енергоємності $e_E^{\min}$ залежать від величини випадкових коливань швидкості копання, яка оцінюється коефіцієнтом варіації R_V . Зменшення коефіцієнта варіації призводить до зменшення енергоємності процесу копання і до збільшення величини оптимальної продуктивності Π_0^ϕ (рис. 2).

Залежності типу (6) розраховані і побудовані для кожної категорії гірських порід з урахуванням динамічного коефіцієнта опору копанню K_F^ϕ .

Аналіз показав, що для підтримки енергоємності екскавації на рівні близького до мінімального для порід першої та другої категорій досить навіть невисокої кваліфікації машиніста (рис. 2). Теж саме можна сказати і про роботу на породах шостої категорії, коли продуктивність близьку до оптимальної фактично підтримує сам привод.

Більш складна задача виникає при роботі на породах (3...5) категорій. Кар'єрні екскаватори типу пряма мехлопата не обладнані індикатором швидкості копання, тому підтримувати оптимальний режим копання здатний тільки машиніст в залежності від своєї кваліфікації. Але контролює він при цьому режимі не саму швидкість копання, близьку до оптимальної V_0^ϕ , а час копання t_0^ϕ , який відповідає оптимальній швидкості копання, при приблизно незмінній висоті уступу H :

$$t_0^\phi = H_v / V_0^\phi, \text{ с.} \quad (9)$$

Таким чином, машиніст для роботи екскаватора в режимі, близькому до оптимального повинен витримувати як можна меншим відхилення фактичного часу копання від оптимального

$$\Delta t = (t_\phi - t_0^\phi) \rightarrow \min, \text{ с.} \quad (10)$$

що еквівалентно умові:

$$\Delta \Pi = (\bar{\Pi}_\phi - \bar{\Pi}_E^0) \rightarrow \min.$$

Другою умовою є зменшення коливання швидкості копання до мінімального рівня, який залежить від динаміки роботи екскаватора і коливань опору ґрунта копанню:

$$\Delta \sigma_{VK} = (\sigma_{VK}^\phi - \sigma_{VK}^{\min}) \rightarrow 0. \quad (11)$$

Ці дві умови і є тими необхідними умовами, які забезпечують режим копання екскаватора, близький до оптимального. На жаль режим абсолютного оптимуму (при $\sigma_{VK} \rightarrow 0$) практично не можливий із-за технічних і геотехнологічних причин.

Для підтвердження цих умов проведені дослідження за роботою машиністів екскаватора з різною кваліфікацією (табл. 1)

Таблиця 1 – Експериментальні дані дослідження параметрів циклу екскавації

№ циклу	Час копання, t_K , с	Час повороту ковша і розвантаження, $t_{П}$, с	Час опускання ковша в забій, t_0 , с	Тривалість циклу, $t_{Ц}$, с	Коефіцієнт використання екскаватора на циклі, $K_{ВЦ}$	Швидкість копання, V_K , м/с
1	2	3	4	5	6	7
1	7,0	6,5	4,5	28,0	0,25	1,42
2	7,0	10,0	12,0	29,0	0,24	1,42
3	8,6	9,0	13,0	30,5	0,28	1,16
4	9,0	9,0	14,0	32,0	0,28	1,11
5	6,5	7,5	10,5	24,5	0,26	1,66
6	8,5	6,5	11,0	26,0	0,32	1,17
...	...	...	...	...	...	...
59	5,0	12,0	12,0	29,0	0,17	2,00
60	7,0	9,0	12,0	27,0	0,25	1,42

Статистична обробка результатів цих експериментів показала, що фактичний розподіл швидкості копання на циклі $V_{КЦ}$ аналітично описується законом Гауса. Тоді розподіл середньої швидкості копання по циклам $\bar{V}_{КЦ}$ (рис. 3) з математичним очікуванням швидкості копання за зміну $\bar{V}_{КЗ}$ розраховується за виразом:

$$\bar{V}_{КЗ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{V}_{КЦi}, \text{ м/с}, \quad (12)$$

та дисперсією:

$$\sigma_{\bar{V}_3} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{V}_{КЦi} - \bar{V}_{КЗ})^2. \quad (13)$$

Рисунок 3 – Гістограма розподілу швидкості копання екскаватора по циклам за зміну ($n_u = 60$)

В нашому випадку значення $\bar{V}_{КЦ}$ приведені в табл. 1 та на рис. 3 при $n = 60$ циклів за зміну. Значення $\bar{V}_{КЗ} = 1,40$ м/с, а дисперсія і коефіцієнт варіації $\sigma_{\bar{V}_3} = 0,30$ м/с, $R_{\bar{V}_3} = 0,21$ відповідно. Оптимальне значення для породи третьої категорії – $V_K^{\phi} = 1,45$ м/с, тобто середня швидкість копання наближена до опти-

мальної. Коливання швидкості копання як на циклі, так і по циклам за зміну призводять до збільшення енергоємності з $1,4 \text{ МДж/м}^3$ до $1,7 \text{ МДж/м}^3$. Але ця величина менша, ніж робота екскаватора в фактичному неоптимальному режимі $e^\phi = 1,85 \text{ МДж/м}^3$. Абсолютного оптимуму, тобто $\Pi_0^\phi \rightarrow \Pi_0 = \frac{\sqrt{2}N_x}{\bar{e}_k}$ при $R_{PE} \rightarrow 0$

можна досягнути тільки з використанням автоматизованого управління режимом копання екскаватора.

Порівнянням фактичного значення експлуатаційної енергоємності (e_E^ϕ) з мінімальним при локальній оптимізації ($e_E^{\min}$) встановлено: на величину енергоємності впливає не тільки середня швидкість копання ($\bar{V}_k$), а і відхилення її від оптимального значення (V_0^ϕ); на коливання швидкості копання (V_k) впливають як зміна опору гірської породи копанню на циклі по висоті уступу (R_{VU}), так і кваліфікація машиніста (R_v).

Економія електричної енергії на процесі копання за рахунок оптимізації параметрів процесу для шести категорій гірських порід при середній кваліфікації машиніста приведена на рис. 4 та рис. 5. Найбільша економія – на породах п'ятої категорії. Найменша – на породах першої категорії.

Рисунок 4 – Співставлення фактичних та розрахункових енергетичних показників процесу екскавації для різних категорій гірських порід:

- ⊗ – фактична експлуатаційна енергоємність процесу екскавації (e_E^ϕ);
- – розрахункова експлуатаційна енергоємність екскавації;
- ▲ – енергоємність при оптимальному режимі екскавації;
- – енергоємність процесу копання (e_K);
- – коефіцієнт динамічного опору породи копанню (K_F^ϕ)

Рисунок 5 – Зниження енергоємності екскавації гірської породи при локальному режимі оптимізації

Зменшення величини коливань швидкості копання як першого так і другого типів призводить до зниження енергоємності процесу екскавації (рис. 2). В середньому енергоємність процесу екскавації при переході від усередненого фактичного режиму екскавації до локального оптимального знижується від 10 % до 25 %.

Проведені експерименти по оптимальному управлінню процесом екскавації показали, що в режимі, найближчим до оптимального, може працювати машиніст навіть середньої кваліфікації на ґрунтах від першої до шостої категорій. Результати експерименту на ґрунтах третьої категорії за 60 циклів за зміну приведені на рис. 2 в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експерименту

Кат.	K_F^ϕ	n_η	$\bar{V}_K$	$\sigma_{\bar{V}}$	$R_{\bar{V}3}$	R_{V0}	V_0	e_K	e_E^ϕ	e_E^{min}	Δe
-	МПа	-	м/с	м/с	-	-	м/с	МДж/м ³	МДж/м ³	МДж/м ³	МДж/м ³
3	0,27	60	1,40	0,30	0,21	0,15	1,50	0,60	1,70	1,45	0,25

ВИСНОВКИ. 1. Аналітичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що експлуатаційна продуктивність екскаваторів типу ЕКГ зв'язана з енергоємністю процесу екскавації екстремальною залежністю.

2. Розроблені математичні моделі процесу екскавації дозволяють встановити оптимальну швидкість копання масиву гірських порід, яка відповідає мінімальному значенню енергоємності екскавації для всіх категорій гірських порід у відповідності з їх класифікацією.

3. Робота екскаватора в оптимальному режимі екскавації в залежності від категорії порід дозволила знизити енергетичні витрати на 10...25 %, що підтверджується як розрахунками по розробленим моделям, так і проведеними експериментальними спостереженнями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Крючков А.І., Євтєєва Л.І. Математична модель процесу копання екскаватора типу мехлопата. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2011. Вип. 20. С. 122–131.
2. Крючков А.І., Євтєєва Л.І. Вплив швидкості копання гірських порід ковшем екскаватора на їх опір копанню. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2015. Вип. 2(14)/2014. С. 97–103.

3. Темченко А.Г. Ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. Кривий Ріг: Мінерал, 2000. 216 с.
4. Крючков А.І., Євтеєва Л.І. Обґрунтування методики розрахунку змінної експлуатаційної продуктивності екскаватора типу мехлопата на блоці. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2016. Вип. 30. С. 81–89.
5. Крючков А.І., Євтеєва Л.І. Вплив коливань та обмежень на швидкість копання та коефіцієнт використання екскаватора в часі. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук: КрНУ ім. Остроградського*. 2016. Вип. 2(16). С. 74–83.
6. Воробьев В.Д., Крючков А.И., Евтеева Л.И. Аналитический метод определения производительности и энергоемкости процесса копания экскаватора типа мехлопата. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук. КрНУ ім. Остроградського*. 2009. Вип. 1/2009(3). С. 26–34.
7. Крючков А.И., Евтеева Л.И. Энергоемкость погрузки горной массы в транспортные средства одноковшовым экскаватором. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2010. Вип. 19. С. 79–86.
8. Kruckov A., Yevteyeva L. «Optimization of soil digging by scoop of power-shovel with energy intensity criterion», *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук. КрНУ ім. Остроградського*. 2015. Вип. 1(15)/2015. С. 84–88.
9. Крючков А.И., Евтеева Л.И. Закономерности формирования производительности экскаватора типа мехлопата. *Уголь Украины*. 2010. Вип. 10. С. 13–15.
10. Крючков А.І., Євтеєва Л.І. Оптимізація продуктивності екскаваторів на кар'єрі за критерієм енергоемності. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук. КрНУ ім. Остроградського*. 2014. Вип. 1(13)/2014. С. 97–103.

ENERGY SAVING MODES OF EXCAVATOR WORK IN THE CAREER

A. Kryuchkov, Yu. Besarabets, L. Yevtieieva

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" prosp. Peremohy, 37, Kyiv, Ukraine. E-mail: l2212i@ukr.net

Purpose. On a mining operations, grinding and transporting of minerals waste considerable enough part of energy. Therefore energy is the limiting factor of development of mineral resource industry, and its saving is a key problem and is an actual theoretical and practical task. The decline of high operating energy intensity of excavation is possible as due to application of new more productive equipment so and by use of existing equipment in the modes, that also allow to reduce energy intensity of excavation. Experimental and analytical researches are show, that one of such mode is the mode of local optimization of the operating productivity of excavation. In this connection, **the purpose** of work is establishment of optimal parameters of the mode of operations of power-shovels on careers with the mining operations of build materials. **Methodology.** Theoretical and experimental researches show that expenditure of energy on excavation of breeds is described by Hamilton-Jacobi equation and Fokker-Planck-Kolmogorov equation. At the solution of equations the mathematical models for determination of operating productivity of power-shovels are received. Analysis of dependences of determination of operating productivity allows setting optimal speed

of digging of array of breeds, that satisfies the minimum value of energy intensity of excavation for all categories of breeds in accordance with their classification. **Results.** It is established by analytical and experimental researches, that the operating productivity of power-shovels is related to energy intensity of process of excavation by extreme dependence. **Originality.** For the first time it is established that the operating productivity of power-shovels is related to energy intensity of process of excavation by extreme dependence. **Practical value.** Work of power-shovel in the optimal mode of excavation depending on the category of breeds allows to reduce power charges on 10...25%, that is confirmed by both calculations for to the developed models and experimental observation.

Key words: excavator, productivity, power consumption, mathematical simulation, optimization, energy saving.

REFERENCES

1. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2011), "Mathematical model of excavation process of excavator type shovel", *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Hirnyystvo»*, no. 20, pp. 122–131.
2. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2015), "Influence of digging speed of geological materials by bucket excavator on their resistance to digging." *Suchasni resursoenerhozberihayuchi tekhnolohiyi hir-nychoho vyrobnystva*, no. 2(14)/2014, pp. 97–103.
3. Temchenko, A.H. (2000), *Resursozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnystva* [Resource-saving technologies of mining production], Mineral, Kryvyy Rih, Ukraine.
4. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2016), "Justification of the methodology for calculating the variable operating productivity of a excavator type shovel on a quarry bloc", *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Hirnyystvo»*, no. 30, pp. 81–89.
5. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2016), "Influence of fluctuations and limitations on digging speed and the coefficient of use of the excavator in time", *Suchasni resursoenerhozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnystva*, no. 2(16), pp. 74–83.
6. Vorobiov, V.D., Kryuchkov, A.Y., Yevtyeyeva, L.Y. (2009), "An analytical method for determining the productivity and energy intensity of the excavation process of a excavator type shovel", *Suchasni resursoenerhozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnystva*, no. 1/2009(3), pp. 26–34.
7. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2010), "Energy intensity of loading of rock mass into vehicles by a single bucket excavator", *Visnik NTUU «KPI». Seriya «Girnitstvo»*, no. 19, pp. 79–86.
8. Kruckov, A., Yevtyeyeva, L. (2015), "Optimization of soil digging by scoop of power-shovel with energy intensity criterion", *Suchasni resursoenerhozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnystva*, no. 1(15)/2015, pp. 84–88.
9. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2010), "Regularities of the formation of productivity of excavator of shovel type ", *Ugol' Ukrainy*, no. 10, pp. 13–15.
10. Kryuchkov, A.I., Yevtyeyeva, L.I. (2014), "Optimization of excavators productivity on a career with the criterion of energy intensity. Modern resource-saving technologies of mining production" *Suchasni resursoenerhozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnystva*, no. 1(13)/2014, pp. 97–103.

Стаття надійшла 22.05.2018.