

УДК 622.271

DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-257-260](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-257-260)

А.І. Крючков, к.т.н., доц.  
Л.І. Євтеєва, к.т.н., асист.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

### Системна оптимізація екскаваційних робіт на кар'єрі по критерію мінімальної енергоємності

Одним із ефективних напрямків збереження енергоресурсів на кар'єрі є оптимізація режимів роботи екскаваторів по критерію енергоємності. Для екскаваторів встановлені параметри режиму роботи, пов'язані з оптимальним значенням його експлуатаційної продуктивності. Однак, на тих кар'єрах, де екскаваторів було два і більше, експериментально було встановлено, що локальні оптимуми по окремих екскаваторам не відповідали оптимуму по кар'єру в цілому. Розглядаючи аналітично цю задачу, як задачу Ейлера на умовний екстремум, встановлені оптимальні експлуатаційні продуктивності кожного із екскаваторів (системний оптимум) при якому енергоємність екскаваційних робіт по кар'єру у середньому була менша, ніж енергоємність при локальних оптимумах (принцип емерджентності). Встановлений системний оптимізаційний режим екскавації дозволяє знизити затрати електроенергії в залежності від умов від 10 до 30 %.

**Ключові слова:** екскаватор; продуктивність; енергоємність; система; оптимізація; емерджентність.

**Вступ.** Робота гірничих підприємств за останні десятиріччя показала, що в умовах нестійкої економіки оцінка ефективності виробництва по вартісних критеріях часто має негативні наслідки. За цих умов значно кращі результати дає використання натуральних показників [1, 2 3]. В зв'язку з цим в статті використовується в якості критерія ефективності виробництва питома енергоємність екскаваційних робіт [1, 2, 4].

Експериментальні дослідження показали, що при оптимізації експлуатаційної продуктивності екскаватора оптимальні параметри його роботи дійсно відповідали мінімальному значенню питомої енергоємності екскавації. Але, якщо екскаваторів було два і більше, то оптимізація його продуктивності по кожному екскаватору окремо не призводила до мінімального значення питомої енергоємності екскаваційних робіт по кар'єру в цілому.

**Мета роботи** – враховуючи, що локальна оптимізація режиму роботи кожного екскаватора не призводить до мінімального значення питомої енергоємності екскаваційних робіт в цілому по кар'єру, необхідно аналітично встановити значення параметрів режиму роботи кожного екскаватора, при яких питома енергоємність в середньому по кар'єру буде мінімальною.

**Результати досліджень.** Якщо два, або більше екскаваторів працюють на одному кар'єрі і пов'язані між собою загальною транспортною системою, системою електропостачання, загальними умовно сталими витратами та іншими зв'язками, то виникає задача оптимізації продуктивностей кожного екскаватора, при яких загальна енергоємність екскаваційних робіт по групі з двох екскаваторів буде найменша. При цьому сумарна продуктивність по кар'єру повинна дорівнювати сумі продуктивностей двох незалежно працюючих екскаваторів.

При такому підході одержуємо класичну задачу Ейлера на умовний екстремум [5–6]. Розв'язок її знайдемо методом невизначених множників Лагранжа. Математично модель цієї задачі записується у вигляді цільової функції та обмеження:

$$\bar{e} = \frac{e_{E1} \Pi_{E1} + e_{E2} \Pi_{E2}}{\Pi_{E1} + \Pi_{E2}} \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$\Pi_{E1} + \Pi_{E2} = \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}} ; \quad (2)$$

де енергоємність по кожному екскаватору розраховується за виразами, Дж/м<sup>3</sup>:

$$e_{E1} = \frac{A_1}{\Pi_{E1}} + B_1 \Pi_{E1} + C_1 ; \quad (3)$$

$$e_{E2} = \frac{A_2}{\Pi_{E2}} + B_2 \Pi_{E2} + C_2 ; \quad (4)$$

де  $A_1 = N_{x1}$ ,  $A_2 = N_{x2}$  – потужність холостого ходу кожного із екскаваторів;

$C_1 = e_{k1}$ ,  $C_2 = e_{k2}$  – середнє значення енергоємності копання кожного із екскаваторів;

$$B_1 = \frac{e_{k1}^2}{2N_{x1}} \left[ \left( 1 - \frac{\Pi_{k1}^0}{\bar{\Pi}_{E1}} \right)^2 + (1 + R_{\Pi E1}^2) \right]; \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{e_{k2}^2}{2N_{x2}} \left[ \left( 1 - \frac{\Pi_{k2}^0}{\bar{\Pi}_{E2}} \right)^2 + (1 + R_{\Pi E2}^2) \right]; \quad (6)$$

де  $\Pi_{k1}^0 = \frac{\sqrt{2}N_{x1}}{e_{k1}}$  – локальний оптимум для першого екскаватора при незалежній роботі;

$\Pi_{k2}^0 = \frac{\sqrt{2}N_{x2}}{e_{k2}}$  – локальний оптимум для другого екскаватора при незалежній роботі;

$\bar{\Pi}_{k1}, \bar{\Pi}_{k2}$  – середнє значення продуктивності екскаваторів без оптимізації;

$R_{\Pi E1} = \frac{\sigma_{\Pi E1}}{\bar{\Pi}_{k1}}, R_{\Pi E2} = \frac{\sigma_{\Pi E2}}{\bar{\Pi}_{k2}}$  – коефіцієнт варіації продуктивності по кожному екскаватору.

Таким чином, в залежностях (5), (6) враховуються не тільки відхилення середньої продуктивності  $\bar{\Pi}_{k1}, \bar{\Pi}_{k2}$  по циклам за зміну від оптимального локального значення  $\Pi_{k1}^0, \Pi_{k2}^0$ , а і дисперсія продуктивності копання, так і по циклам за зміну.

Мінімальні значення енергоємності екскавації при локальних оптимумах:

$$e_{E1}^{\min} = 2\sqrt{A_1 \cdot B_1} + C_1; \quad (7)$$

$$e_{E2}^{\min} = 2\sqrt{A_2 \cdot B_2} + C_2; \quad (8)$$

Для розв'язку задачі Ейлера на умовний екстремум складемо функцію Лагранжа першого роду з урахуванням функції цілі (1) та обмеження (2):

$$L(\Pi_{E1}, \Pi_{E2}, \lambda) = \left( \frac{A_1}{\Pi_{E1}} + B_1 \Pi_{E1} + C_1 \right) \Pi_{E1} + \left( \frac{A_2}{\Pi_{E2}} + B_2 \Pi_{E2} + C_2 \right) \Pi_{E2} + \lambda \left[ (\Pi_{E1} + \Pi_{E2}) - \left( \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}} \right) \right]; \quad (9)$$

де  $\lambda$  – невизначений множник Лагранжа.

Дослідження на екстремум функції трьох змінних дає наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial L}{\partial \Pi_{E1}} = \frac{(2B_1 \Pi_{E1} + C_1)}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}}} + \lambda = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Pi_{E2}} = \frac{(2B_2 \Pi_{E2} + C_2)}{\sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}}} + \lambda = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = (x_1 + x_2) \left( \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}} \right) = 0. \quad (12)$$

Розв'язок цих рівнянь дає оптимальні значення продуктивності кожного екскаватора, але вже при системній оптимізації:

$$\Pi_{E1}^C = \frac{2B_2 \left( \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}} \right) - C_1 + C_2}{2(B_1 + B_2)}; \quad (13)$$

$$\Pi_{E2}^C = \frac{2B_1 \left( \sqrt{\frac{A_1}{B_1}} + \sqrt{\frac{A_2}{B_2}} \right) - C_1 + C_2}{2(B_1 + B_2)}. \quad (14)$$

З двох останніх виразів можна зробити висновок, що оптимальні значення продуктивності екскаваторів при системній оптимізації дійсно не співпадають з оптимальними значеннями локальних оптимумів (принцип емерджентності). Локальний і системний оптимуми співпадатимуть тільки у випадку, коли два однакові екскаватори будуть працювати з машиністами приблизно однакової кваліфікації і в однакових умовах, тобто  $A_1 = A_2 = A, B_1 = B_2 = B, C_1 = C_2 = C$ . Тоді:

$$P_{01} = P_{02} = P_0 = \sqrt{\frac{A}{B}}. \quad (15)$$

Для умов Демидівського кар'єру розглянемо роботу двох екскаваторів ЕКГ-5А на породах третьої категорії та на породах п'ятої категорії [10]. Для цих умов середня енергоємність копання  $\bar{e}_{k1} = 0,60$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\bar{e}_{k2} = 0,80$  МДж/м<sup>3</sup>, а фактична середньозважена експлуатаційна енергоємність для двох екскаваторів складає 2,23 МДж/м<sup>3</sup>. Розрахунок параметрів при локальному оптимумі для кожного з екскаваторів виконаний по виразу (15) для оптимальної продуктивності та по виразам (3), (4) для мінімальної енергоємності екскавації. Результати розрахунку приведені в таблиці 1 та на рисунку 1.

Таблиця 1

Параметри режимів роботи екскаваторів

Режими	ПЕЗ м <sup>3</sup> /с	ПЕ5 м <sup>3</sup> /с	еЕЗ МДж/м <sup>3</sup>	еЕ5 МДж/м <sup>3</sup>	$\bar{e}_E$ МДж/м <sup>3</sup>	ΔеЕ МДж/м <sup>3</sup>	ΔС грн/м <sup>3</sup>
фактичний	0,11 (0,59)	0,09 (0,5)	1,72	2,85	2,23	–	–
локальний оптимальний	0,24 (1,5)	0,17 (0,92)	1,45	2,17	2,04	0,19	0,093
системний оптимальний	0,27 (1,62)	0,14 (0,80)	1,46	2,2	1,70	0,53	0,300

При системній оптимізації оптимальна продуктивність для кожного екскаватора розраховується за виразами (13) та (14), а підстановка цих значень у вирази (13) та (15) дозволяє одержати мінімальні значення енергоємностей, які дійсно не співпадають з локальними оптимумами. Якщо при локальній оптимізації середньозважена енергоємність складає 2,04 МДж/м<sup>3</sup>, то при системній оптимізації вона буде менша на 0,34 МДж/м<sup>3</sup> і складає 1,7 МДж/м<sup>3</sup> (табл. 1).

Порівняння параметрів роботи екскаваторів в трьох режимах (рис. 1) свідчать про доцільність зниження витрат електроенергії за рахунок оптимізації параметрів процесу екскавації.

Таким чином, якщо перевести МДж в кВт.год., то при роботі екскаватора в режимі близького до оптимального економія по статті «електроенергія» становить від 0,10 до 0,30 грн/м<sup>3</sup> на кожному кубі гірської маси. Реалізація запропонованих оптимальних режимів роботи екскаватора при проведенні експериментів на Товкачівському кар'єрі дозволила отримати економію витрат на електроенергію в розмірі 70 тис. грн. при експерименті. Очікувана економія складає близько 150 тис. грн./рік на кожному екскаватор.

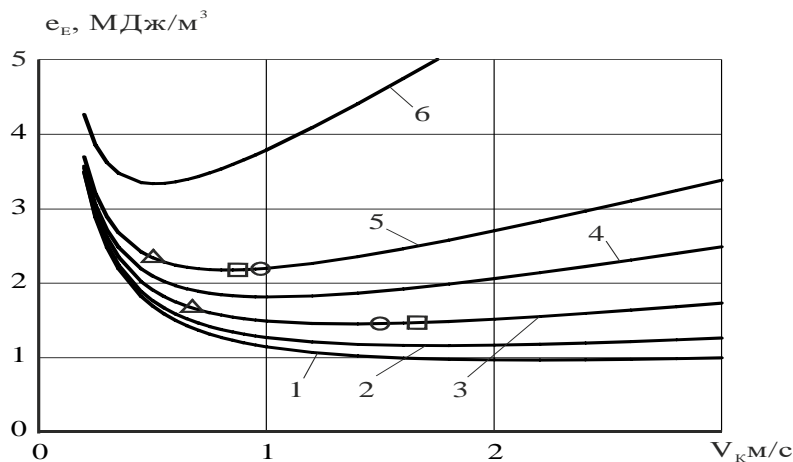


Рис. 1. Експлуатаційна енергоємність ( $e_E$ ) процесу екскавації в залежності від швидкості копання ( $V_K$ ) для шести категорій гірських порід:  $\Delta$  – фактичний режим;  $O$  – локальний оптимальний режим;  $\square$  – системний оптимальний режим

**Висновки.** В статті замість вартісних критеріїв ефективності виробництва в умовах нестабільної економіки використаний критерій мінімуму енергоємності екскаваційних робіт.

Залежність енергоємності екскаваційних робіт від експлуатаційної продуктивності екскаватора має екстремальний характер, що дозволило встановити оптимальну продуктивність, якій відповідає мінімальне значення енергоємності для всіх категорій гірських порід.

Роботу екскаватора розглянуто в трьох режимах: фактичний усереднений режим; локальний оптимальний режим; системний оптимальний режим.

При роботі екскаватора в локальному режимі в залежності від категорійності гірських порід зниження енергоємності екскаваційних робіт в порівнянні з середньою фактичною становить від 0,15 до 0,40 МДж/м<sup>3</sup>, або від 8 до 20 %.

Розглядаючи кар'єр, як систему з двох, або більше екскаваційних дільниць, встановлено, що оптимальні значення продуктивності кожної дільниці при роботі в системі не співпадають з оптимальним значенням при локальній оптимізації, що дозволило ще знизити середню енергоємність на 20...40 % в порівнянні з середнім фактичним значенням, виходячи з того, щоб сумарна продуктивність не змінилася і забезпечила мінімальну енергоємність екскаваційних робіт по кар'єру.

Економія електроенергії при роботі екскаватора в оптимальному режимі складає від 0,19 до 0,53 МДж/м<sup>3</sup>, або від 0,10 до 0,30 грн./м<sup>3</sup>. При проведенні експериментів на Товкачівському кар'єрі економія витрат по статті «електроенергія» склала 70 тис. грн. При річній продуктивності 0,5 млн.м<sup>3</sup>, очікувана економія складає 150 тис.грн./рік на кожний екскаватор.і

#### Список використаної літератури:

1. Темченко А.Г. Ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва / А.Г. Темченко. – Кривий Ріг : Мінерал, 2000. – 216 с.
2. Экономико-математическое моделирование параметров карьеров / М.Г. Новожилов, В.Г. Селянин, Г.Д. Пчёлкин и др. – М. : Недра, 1971. – 198 с.
3. Крючков А.И. Энергоёмкость погрузки горной массы в транспортные средства одноковшовым экскаватором / А.И. Крючков, Л.И. Евтеева // Вісник НТУУ «КПІ» : зб. наук. праць. Серія : Гірництво. – 2010. – Вип. 19. – С. 79–86.
4. Тангаев И.А. Энергоёмкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И.А. Тангаев. – М. : Недра, 1986. – 231 с.
5. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М. : Наука, 1964. – 870 с.
6. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
7. Крючков А.И. Оптимізація продуктивності екскаваторів на кар'єрі за критерієм енергоємності / А.И. Крючков, Л.И. Євтеєва // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2014. – Вип. 1 (13).
8. Воробьев В.Д. Аналитический метод определения производительности и энергоёмкости процесса копания экскаватора типа мехлопата / В.Д. Воробьев, А.И. Крючков, Л.И. Евтеева // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2009. – Вип. 1 (3). – С. 26–34.
9. Kruckov A. Optimization of soil digging by scoop of power-shovel with energy intensity criterion / A. Kruckov, L.Yevtieieva // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2015. – Вип. 1 (15). – С. 84–88.
10. Беляков Ю.И. Выемочно-погрузочные машины на карьерах / Ю.И. Беляков. – М. : Недра, 1987. – 268 с.

#### References:

1. Temchenko, A.G. (2000), *Resursozberigajuchi tehnologii' girnychogo vyrobnyctva*, Mineral, Kryvyj Rig, 216 p.
2. Novozhilov, M.G., Seljanin, V.G., Pchjolkina, G.D. and others (1971), *Jekonomiko-matematicheskoe modelirovanie parametrov kar'erov*, Nedra, Moskva, 198 p.
3. Krjuchkov, A.I. and Evteeva, L.I. (2010), «Jenergoemkost' pogruzki gornoj massy v transportnye sredstva odnokovshovym jeksavatorom», *Visnyk NTUU «KPI»*, zb. nauk. prac', Serija *Girnyctvo*, Vol. 19, pp. 79–86.
4. Tangae, I.A. (1986), *Jenergoemkost' processov dobychi i pererabotki poleznyh iskopaemyh*, Nedra, Moskva, 231 p.
5. Vigodskij, M.Ja. (1964), *Spravochnik po vysshej matematike*, Nauka, Moskva, 870 p.
6. Tihonov, V.I. and Mironov, M.A. (1982), *Markovskie process*, Radio i svjaz', Moskva, 624 p.
7. Krjuchkov, A.I. and Jevtjejeva, L.I. (2014), «Optymizacija produktyvnosti ekskavatoriv na kar'jeri za kryterijem energoemnosti», *Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii' girnychogo vyrobnyctva*, Vol. 1 (13).
8. Vorob'ev, V.D., Krjuchkov, A.I. and Evteeva, L.I. (2009), «Analiticheskij metod opredelenija proizvoditel'nostoi i jenergoemnosti processa kopanija jeksavatora tipa mehlopata», *Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii' girnychogo virobnyctva*, Vol. 1 (3), pp. 26–34.
9. Kruckov, A. and Kruckov, A. (2015), «Optimization of soil digging by scoop of power-shovel with energy intensity criterion», *Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii' girnychogo vyrobnyctva*, Vol. 1 (15), pp. 84–88.
10. Beljakov, Ju.I. (1987), *Vyemochno-pogruzochnye mashiny na kar'erah*, Nedra, Moskva, 268 p.

**Крючков** Анатолий Иванович – кандидат технічних наук, доцент Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- фізика руйнівних процесів в твердих матеріалах;
- математичне моделювання.

**Євтеєва** Любов Іванівна – кандидат технічних наук, асистент Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- математичне моделювання.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2018.