УДК 622.271.

# ВПЛИВ КОЛИВАНЬ ТА ОБМЕЖЕНЬ НА ШВИДКІСТЬ КОПАННЯ ТА КОЕФІЦІЄНТ ВИКОРИСТАННЯ ЕКСКАВАТОРА В ЧАСІ

**А. І. Крючков, Л. І. Євтєєва**
Національний технічний університет України «КПІ»
просп. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна. E-mail: l2212i@ukr.net

З використанням ймовірнісних динамічних нестаціонарних моделей розглянуто процес копання екскаватора типу мехлопата і процес використання екскаватора в часі з урахуванням технологічних і організаційних перерв, а також технічної надійності обладнання. Враховано ймовірнісний характер процесу екскавації та впливу на нього як випадкових коливань швидкості копання і коефіцієнта використання екскаватора в часі, так і їх обмежень, що дозволило значно підвищити адекватність, точність і достовірність моделей.

**Ключові слова:** екскаватор, швидкість копання, коефіцієнт використання в часі, щільність ймовірності, коливання, обмеження, продуктивність.

# ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ НА СКОРОСТЬ КОПАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА ВО ВРЕМЕНИ

**А. И. Крючков, Л. И. Евтеева**
Национальный технический университет Украины «КПИт»
просп. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина. E-mail: l2212i@ukr.net

С использованием вероятностных динамических нестационарных моделей рассмотрен процесс копания экскаватора типа мехлопата и процесс использования экскаватора во времени с учетом технологических и организационных перерывов, а также технической надежности оборудования. Учтен вероятностный характер процесса экскавации и влияния на него как случайных колебаний скорости копания и коэффициента использования экскаватора во времени, так и их ограничений, что позволило значительно повысить адекватность, точность и достоверность моделей.

**Ключевые слова:** экскаватор, скорость копания, коэффициент использования во времени, плотность вероятности, колебания, ограничения, производительность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Одним з головних елементів гірничих робіт на кар'єрі є вміння розрахувати продуктивність екскаватора на блоці при проектуванні робіт, при нормуванні та плануванні видобутку, при розрахунку собівартості виробництва, заробітної плати та організації робіт на кар'єрі.

На протязі останніх 30-40 років в цьому напрямку постійно проводиться науково-дослідна та методична робота, що дозволила розробити ряд інженерних методик розрахунку продуктивності екскаватора [1–5].

До останнього часу такі розрахунки проводились виходячи з експериментальних спостережень за раніше досягнутим рівнем видобутку при аналогічних умовах [3–6]. Базуючись на цьому підході, розроблені методики розрахунку

продуктивності екскаваторів, де за основу приймаються нормативи часу на виконання окремих технологічних процесів та операцій. На основі цих методів розроблені норми виробки на відкриті гірничі роботи [6–7].

Аналіз відповідності нормативної та фактичної продуктивності екскаваційних робіт на кар'єрах показав, що більше ніж на 67 % розглянутих екскаваційних блоках ці величини значно не співпадали (коефіцієнт лінійної кореляції в середньому r = 0,28). Такий стан зумовлений не тільки недоліками при нормуванні та організації екскаваційних робіт на кар'єрах, а також і недосконалістю нормативних матеріалів.

Таким чином, при розрахунку продуктивності екскаватора за зміну задовільні результати одержані тільки в вузькому діапазоні значень, що свідчить про необхідність подальшого удосконалення методики їх розрахунку. При цьому таке удосконалення повинно йти не по шляху повної відмови від раніше зробленого, а шляхом створення на наукових засадах більш адекватної моделі екскаваційних робіт, яка буде включати в себе раніше створені моделі, що знайшли практичне підтвердження в окремих випадках.

Однією з головних умов адекватності моделі об'єкту дослідження є вибір наукового принципу, на якому модель базується. В нашому дослідженні в залежності від обставин такими принципами можуть бути: принцип найменшої дії; принцип максимальної ентропії; принцип дуальності при русі маси в просторі [8]. Більш адекватні моделі окремих технологічних процесів на екскаваційному блоці значно підвижчують достовірність розрахунку параметрів режиму роботи екскаватора, що дозволяє синтезувати загальну модель екскаваційних робіт, точність і достовірність якої значно покращуються.

Метою даної роботи є встановлення впливу випадкових коливань і обмежень на швидкість копання та коефіцієнт використання екскаватора в часі ймовірнісних динамічних нестаціонарних моделях.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. 1. *Вплив коливань і обмежень на швидкість копання екскаватора.* У роботі [12] розроблені математичні ймовірнісні динамічні нестаціонарні моделі процесу копання гірського масиву ковшем екскаватора типу пряма мехлопата, які найбільш повно відповідають технологічному процесу, що моделюється. Подібного типу моделі базуються на принципі дуальності при русі маси в просторі [8]. Розроблені моделі дозволили встановити ряд динамічних ефектів процесу екскавації, у тому числі:

- вплив ряду обмежуючих факторів на продуктивність копання екскаваторів типу ЕКГ;
- зниження продуктивності копання екскаватора за рахунок випадкових коливань швидкості копання протягом циклу і зміни в цілому;
- зниження середнього значення коефіцієнта використання екскаватора в часі при його випадкових коливаннях за поточними змінами і наявності обмежень на діапазон його зміни;
- зменшення коефіцієнта використання екскаватора в часі при збільшенні швидкості копання (кореляційний зв'язок);

- вплив випадкових коливань і обмежень продуктивності копання $П_К$ і коефіцієнта використання екскаватора в часі $К_В$ на мінімальне значення енергоємності процесу при їх нелінійній залежності.

У роботі [13] процес копання екскаватора типу ЕКГ розглядається і моделюється як ймовірнісний динамічний нестаціонарний гаусівський процес. При цьому нестаціонарна щільність ймовірності продуктивності (швидкості) копання описується виразом

$$\omega\left(\ddot{I}_{\hat{E}},t\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\left[\sigma^2_{\ddot{I}_{\hat{e}}}\left(1-e^{-2\alpha t}\right)+\sigma^2_0\cdot e^{-2\alpha t}\right]}}\exp\left\{-\frac{\left[\ddot{I}_{\hat{E}}-\ddot{I}_0\left(1-e^{-2\alpha t}\right)\right]^2}{2\left[\sigma^2_{\ddot{I}_k}\left(1-e^{-2\alpha t}\right)+\sigma^2_0\cdot e^{-2\alpha t}\right]}\right\}; \quad (1)$$

а для стаціонарного випадку отримано нормальне гаусівське розподілення щільності ймовірності продуктивності (швидкості) копання:

$$\omega\left(\ddot{I}_{\hat{E}}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma_{\ddot{I}_k}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ddot{I}_{\hat{E}}-\bar{\ddot{I}}_{\hat{E}}}{\sigma_{vk}}\right]^2\right\}. \quad (2)$$

Однак на практиці відомо, що швидкість (продуктивність) копання залежить не тільки від випадкових коливань параметрів процесу, але і від їх максимальних і мінімальних значень, тобто від обмежень. Виявилося, що не залежно від типу розподілу щільності ймовірності швидкості копання $V_k$, це буде так званий усічений розподіл, обмежений знизу значенням $V_k = 0$, а зверху – значенням $V_к = V_{k\,max}$.

У нашому випадку розподіл щільності ймовірностей швидкості копання $V_к$ при $n \to \infty$ також асимптотично прагне не до нормального (закон Гауса), а до нормального усіченого розподілу

$$\omega\left(V_{\hat{E}}\right)=\frac{C_V}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma_k}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{V_{\hat{E}}-\bar{V}_{\hat{E}}}{\sigma_k}\right]^2\right\}, \quad (3)$$

з параметрами:

$C_V=\left[\hat{O}\left(\frac{V_k-\bar{V}_k}{\sigma_{vk}}\right)-\hat{O}\left(-\frac{\bar{V}_k}{\sigma_{vk}}\right)\right]$ – коригувальний множник, що охоплює діапазон зміни швидкості копання $V_k=\left(0...V_k^{\max}\right)$ і визначається через функцію Лапласа $\Phi(x)$ [9,11];

$\bar{V}_k=\int_0^{-\infty}V_k\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{vk}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{V_k-\bar{V}_k}{\sigma_{vk}}\right]^2dV_k\right\}$ – математичне очікування швидкості копання екскаватора без урахування її випадкових коливань і обмежень;

$D\left(V_k\right)=\sigma^2_{vk}$ – дисперсія швидкості копання екскаватора.

Тоді математичне очікування швидкості копання з урахуванням її випадкових коливань і обмежень визначається за виразом [9,13]

$$\hat{V}_k = \bar{V}_k \left[ 1 - R_{vk} f_{vk} \left( R_{vk}, V_k^{\max} \right) \right], \tag{4}$$

де $f_{vk}\left(R_{vk}, V_k^{\max}\right) = \frac{C_V}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp\left[ -\frac{\left(V_k^{\max} - \bar{V}_k\right)^2}{2\sigma_{vk}^2} \right] - \exp\left[ -\frac{\bar{V}_k^2}{2\sigma_{vk}^2} \right] \right\}$ – функція, що враховує коливання і обмеження швидкості копання; $V_k^{\max}$ – верхнє обмеження по швидкості копання; $R_{vk} = \frac{\sigma_{vk}}{\bar{V}_k}$ – коефіцієнт варіації швидкості копання.

*2. Вплив коливань і обмежень на коефіцієнт використання екскаватора в часі.* Дослідження показали [9–10], що формування коефіцієнта використання екскаватора в часі $K_B$ як за зміну, так і за місяць є процесом випадковим з відповідними характеристиками:

щільність ймовірності розподілу

$$\omega\left(K_B\right) = \frac{\left(\lambda K_B t_ç\right)\lambda^{n-1}}{\tilde{A}\left(n\right)} \exp\left(-\lambda K_B t_ç\right). \tag{5}$$

Для всіх екскаваційних вибоїв характерне обмеження коефіцієнта використання екскаватора в часі на максимальному рівні $K_B^{\max} = 0,6...0,7.$ Таким чином щільність ймовірності для $K_B$ при $n \to \infty$ асимптотично спрямовується не до нормального, а до усіченого нормального розподілу

$$\omega\left(K_B\right) = \frac{C_{KB}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{KB}} \exp\left\{ -\left( \frac{K_B - \bar{K}_B}{\sigma_{KB}^2} \right)^2 \right\}, \tag{6}$$

де $C_{KB} = \left[ \hat{O}\left( \frac{K_B^{\max} - \bar{K}_B}{\sigma_{KB}} \right) - \hat{O}\left( -\frac{\bar{K}_B}{\sigma_{KB}} \right) \right]$ – корегуючий множник, який знаходиться через функцію Лапласа $\bar{O}\left(x\right)$.

$$\bar{K}_B = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \qquad \sigma_{KB}^2 = \frac{\mu^2}{\left(\lambda + \mu\right)^2}, \tag{7}$$

з параметрами:

$\mu$ – інтенсивність ліквідації простоїв екскаватора, хв$^{-1}$;

$\lambda$ – інтенсивність настання простоїв екскаватора, хв$^{-1}$.

Враховуючи вираз (7), математичне очікування коефіцієнта використання екскаватора в часі з врахуванням його варіації та обмежень знайдемо з виразу

$$\hat{K}_B = \bar{K}_B \left[ 1 - f_{KB} \cdot \left( R_{KB}, K_B^{\max} \right) \right], \tag{8}$$

де $R_{KB} = \bar{K}_B / \sigma_{KB}$ – коефіцієнт $K_B$; $\hat{K}_B$ та $\bar{K}_B$ – математичні очікування з врахуванням випадкових коливань та обмежень і без них (рис. 1);

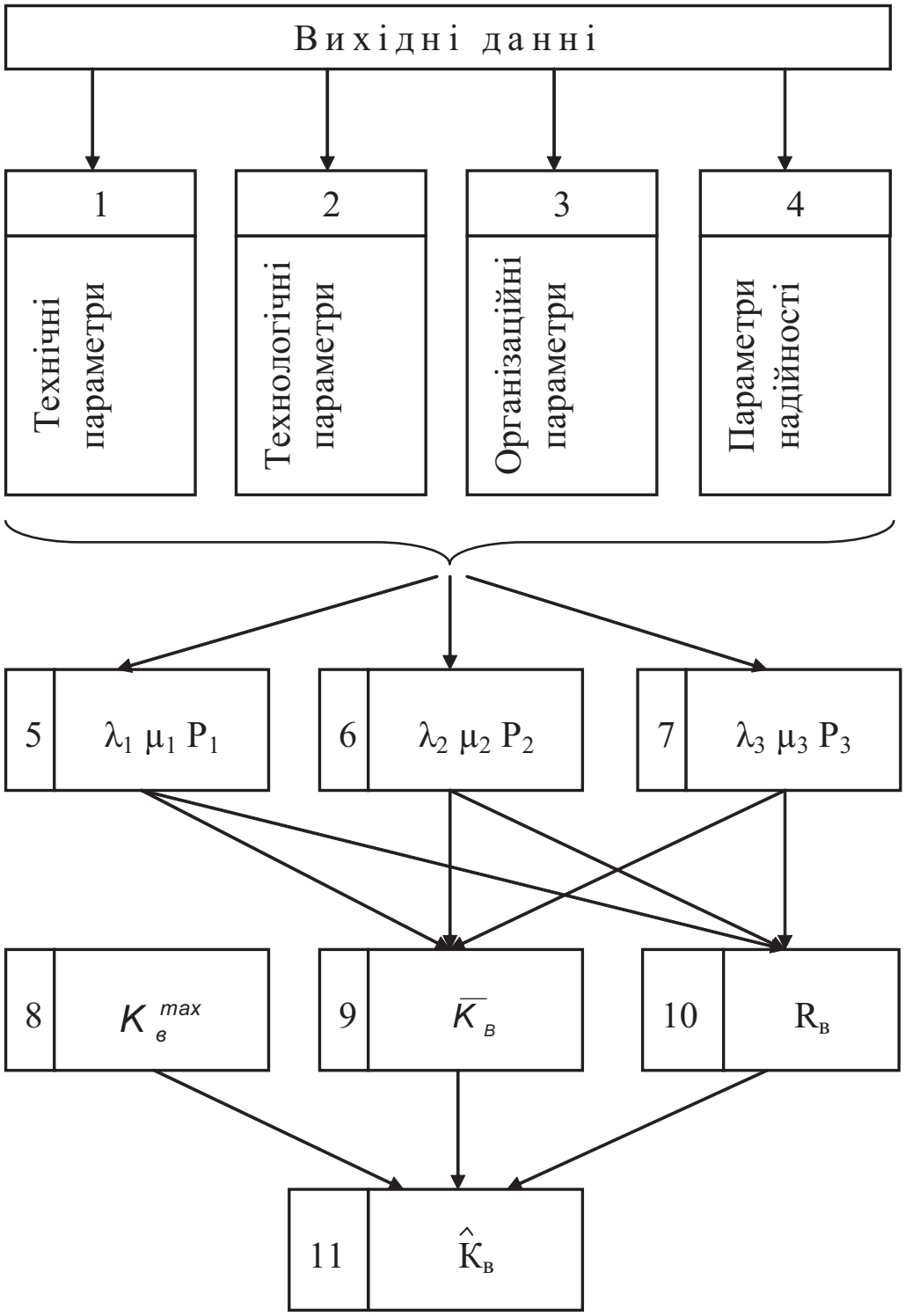


Рисунок 1 – Схема розрахунку математичного очікування коефіцієнта машинного часу екскаватора типу мехлопата при обмеженнях

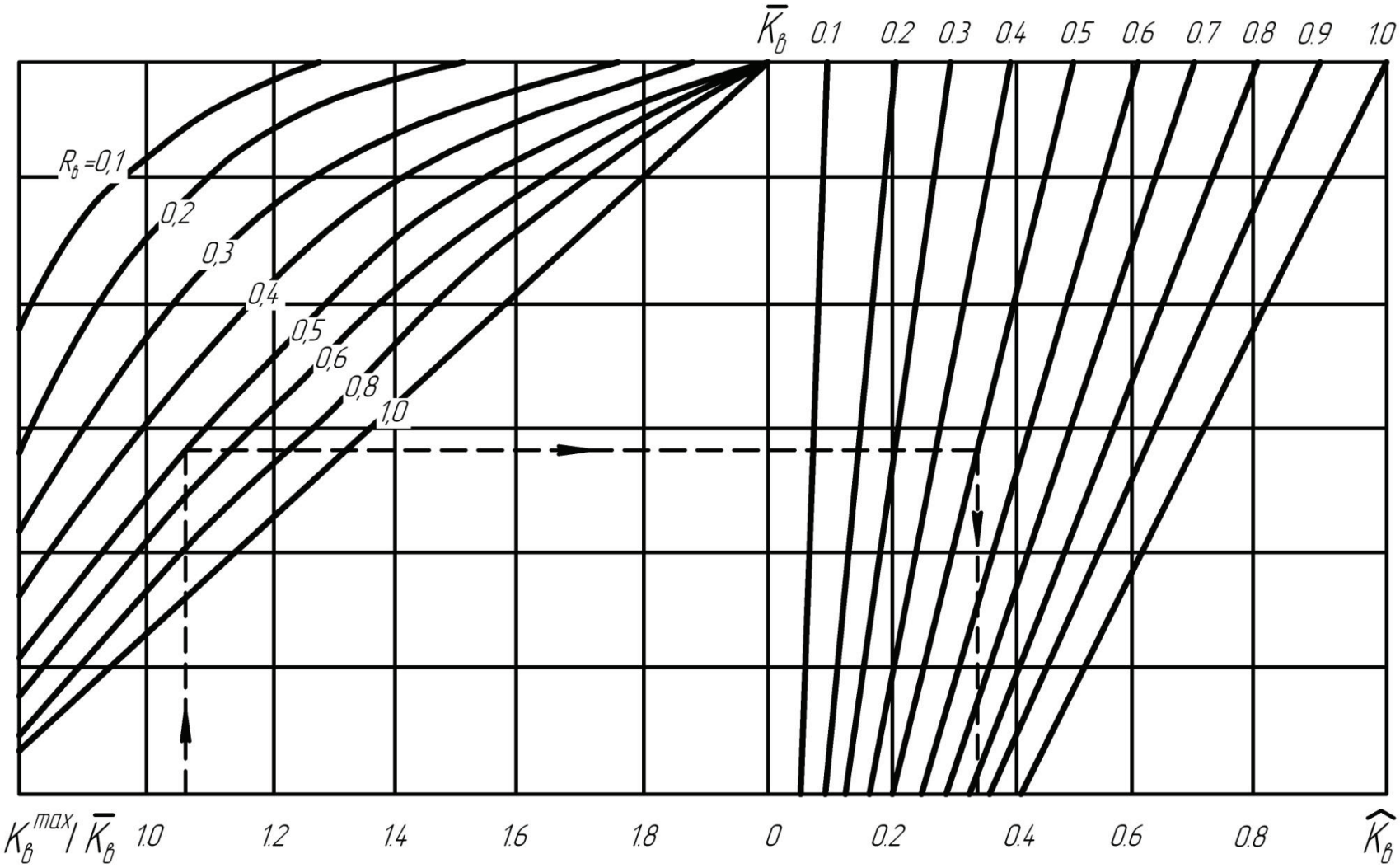


Рисунок – 2 Номограма для визначення середнього значення коефіцієнта використання машинного часу екскаватора типу мехлопата при обмеженнях

$$f_{KB}\left(K_B^{\max}, R_{KB}\right) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}}\left\{\exp\left[-\frac{\left(K_B^{\max} - \bar{K}_B\right)^2}{2\sigma_{KB}^2}\right] - \exp\left[-\frac{\bar{K}_B^2}{2\sigma_{KB}^2}\right]\right\} \quad (9)$$

– функція, яка враховує закон розподілу ймовірності, коливання та обмеження коефіцієнта використання екскаватора в часі.

Математичне очікування коефіцієнта використання екскаватора в часі з врахуванням перелічених параметрів $\hat{K}_B$ можливо також розрахувати з використанням схеми розрахунку (рис. 1) та номограми (рис. 2.) [9].

ВИСНОВОК. Врахування випадкового характеру процесу формування коефіцієнта використання екскаватора в часі з врахуванням його коливань та обмежень визвало необхідність нової математичної моделі з використанням додаткової інформації та дозволило підвищити загальну точність розрахунків в 2,5…3 рази, що підтверджує достовірність головних положень розробленої методики розрахунків і необхідність деякого збільшення об’єму важливої інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теория и практика открытых разработок / Н.В. Мельников, А.И. Арсентьев, М.С. Газизов и др.; под общ. ред. Н.В. Мельникова. – М., Недра, 1973. – 636 с.

2. Технология открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Часть 1. Технология, механизация и автоматизация производственных процессов на открытых горных работах. Под общ. ред. М.Г. Новожилова. – М., Недра, 1971. – 512 с.

3. Домбровский Н.Г. Экскаваторы. – М.: Машиностроение, 1969. – 261 с.

4. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Недра, 1971. – 236 с.

5. Беляков Ю.И. Проектирование экскаваторных работ. – М.: Недра. 1983. – 349 с.

6. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы – М.: Недра, 1985. – 479 с.

7. Методика расчета производительности экскаватора: Нормы технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных материалов. – Л.: Стройиздат, 1977. – 566 с.

8. Крючков А.І. Наукові принципи і математичні моделі процесів гірничого виробництва // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Збірн. наук. праць. – 2000. – Вип. 2. – С. 11–17.

9. Крючков А.И. Влияние вариации и корреляции параметров режима работы очисного комбайна на нагрузку лавы: дис. … кандидата техн. наук: 05.15.02 / Крючков Анатолий Иванович. – М., 1988. – 233 с.

10. Крючков А.И. Закономерности формирования и математическая модель коэффициента машинного времени очисных комбайнов // Сборник трудов Вроцловского политехнического ин-та. Вроцлав. Содружество: 1983. – Вып. 39. – С. 113–120.

11. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

12. Крючков А.І., Євтєєва Л.І. Математична модель процесу копання екскаватора типу мехлопата // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 20. – С. 122–131.

13. Крючков А.И., Евтеева Л.И. Закономерности формирования производительности экскаватора типа мехлопата // Уголь Украины: – 2010. – Вип. 10. – С. 13–15.

## INFLUENCE OF FLUCTUATIONS AND LIMITATIONS OF SPEED OF DIGGING AND COEFFICIENT OF USE OF EXCAVATOR FOR THE TIME

**A. Kruchkov, L. Yevtieieva**

National Technical University of Ukraine «KPI»

prosp. Peremohy, 37, 03056, Kyiv-56, Ukraine. E-mail: l2212i@ukr.net

The **purpose** of this study is to establish influence of random oscillations and limits on the rate of digging and usage rate of power-shovel in time in probabilistic dynamical non-stationary models. **Research methods.** Using duality principle of mass motion in space, probabilistic dynamic unsteady models for digging process of power-shovel and for process of power-shovel use in time, taking into account necessary complex technological and organizational interruptions, and also technical reliability of equipment, were developed. **Research results.** Use of probabilistic dynamic unsteady models allows to establish effect of fluctuations and restrictions of parameters on densities of probability of digging speed and power-shovel use in time. **Originality.** It is taken into account probabilistic nature of non-stationary process of excavation and influence it as random fluctuations of digging speed and of coefficient of power-shovel use in time, so and their limitations, that greatly increased adequacy and accuracy of models. **Practical importance.** Based on conducted research, there were developed method for calculating performance of power-shovel digging, method of calculating use of power-shovel in time and method of determining operational shift productivity of power-shovel.

**Key words:** excavator, speed of digging, coefficient of use for the time, closeness of probability, fluctuations, limitations, productivity.

REFERENCES

1. Melnikov, N.V., Arsentyev, A.I., Gazizov, M.S. i dr. “Teoriya i praktika otkrytyh razrabotok” /; pod obsch. red. N.V. Melnikova. M.: Nedra, 1973. – 636 p.

2.”Tehnologiya otkrytoy razrabotki mestorogdeniy poleznyh iskopaemyh”. *Chast 1. Tehnologiya, mehanizatziya i avtomatizatziya proizvodstvennyh protzessov na otkrytyh gornyh rabotah*. Pod obsch. red. M.G. Novogilova. M.: Nedra, 1971. – 512 p.

3. Dombrovskiy, N.G. “Ekskavatory”, M.: Mashinostroenie, 1969. – 261 p.

4. Vyetrov, U.A. “Rezaniye gruntov zemleroynymi mashinami”, M.: Nedra, 1971. – 236 p.

5. Belyakov, U. I. “Proektirovaniye ekskavatornyh rabot”, M.: Nedra. 1983. – 349 p.

6. Rzhevskiy, V.V. “Otkrytye gornye raboty. Proizvodstvennye protzessy”, M.: Nedra, 1985. – 479 p.

7. “Metodika rascheta proizvoditelnosti ekskavatora: Normy tehnologicheskogo proektirovaniya predpriyatiy promyshlennosti nerudnyh stroitelnyh materialov”. – L.: Stroyizdat, 1977. – 566 p.

8. Kruchkov, A.I. “Naukovi pryntzypy i matematychni modeli protzesiv girnychogo vyrobnytztva” *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Girnytztvo»:* Zbirn. Nauk. pratz. – 2000. – Vyp. 2. – pp. 11–17.

9. Kruchkov, A.I. “Vliyanie variatzii i korrelyatzii parametrov regima raboty ochisnogo kombayna na nagruzku lavy”: *dis. ... kandydata tehn. nauk: 05.15.02 / Kruchkov Anatoliy Ivanovych*. – M., 1988. – 233 p.

10. Kruchkov, A.I. “Zakonomernosti formirovaniya i matematicheskaya model koefitzienta mashinnogo vremeni ochisnyh kombaynov”, *Cbornik trudov Vrotzlavskogo politehnicheskogo in-ta. Vrotzlav. Codrugestvo*: 1983. – Vyp. 39. – pp. 113–120.

11. Korn, G. “Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i ingenerov”, per. c angl. / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1968. – 720 p.

12. Kruchkov, A.I., Yevtieieva L.I. “Matematychna model protzecu kopannya ekskavatora typu mehlopata”, *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Girnytztvo»: Zbirn. Nauk. pratz*. – 2011. – Vyp. 20. – pp. 122–131.

13. Kruchkov, A.I., Yevtieieva, L.I. “Zakonomernosti formirovaniya proizvoditelnosti ekskavatora typa mehlopata” Ugol Ukrainy: Zbirn. Nauk. pratz. – 2010. – Vyp. 10. – pp. 13– 15.

Стаття надійшла 14.12.2015.