

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРОВ

И.Т. Мислибаев¹, А.М. Махмудов¹, Ш.А. Махмудов¹

¹ Навоийский государственный горный институт, Навои, Узбекистан, e-mail: 1yy2@mail.ru

Аннотация: При конкретных горно-геологических условиях расчет производительности карьерных экскаваторов ведется для планирования и нормирования их работы, выбора транспорта и обеспечения им горных работ и установления рационального режима функционирования машин. В заданных условиях разработок открытым способом производительность экскаватора зависит от множества природных, горно-технологических, организационных факторов, сложно поддающихся учету и в значительной степени взаимодействующих с конструктивными параметрами карьерных экскаваторов. По существу, большинство факторов носят вероятностный характер. Вследствие этого для каждого реального случая на основе совокупного учета изменений многофакторных условий эксплуатации и технического состояния технологически увязанного оборудования целесообразно определять значения по производительности. Рассмотрены вопросы теоретического обобщения режимов функционирования и моделирования эксплуатационных показателей работы экскаваторов, учитывающие постоянно меняющиеся физико-механические свойства разрабатываемых пород участка и горизонта, технологические параметры забоя, конструктивно-силовые параметры экскаватора, вероятность показателей надежности его работы, случайный характер подачи транспорта, квалификацию машиниста экскаватора, климатические условия.

Ключевые слова: порода, экскаватор, забой, рабочее место, конструктивно-силовые параметры, надежность, часовая производительность, сменная производительность, метод, математическое моделирование, программа расчета, аналитическая зависимость, угол поворота, кусковатость.

Для цитирования: Мислибаев И.Т., Махмудов А.М., Махмудов Ш.А. Теоретическое обобщение режимов функционирования и моделирование эксплуатационных показателей работы экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 102–110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.

Theoretical generalization of modes and modeling of performance criteria of cutter-loaders

I.T. Mislibayev¹, A.M. Makhmudov¹, Sh.A. Makhmudov¹

¹ Navoiy State Mining Institute, Navoiy, Uzbekistan, e-mail: 1yy2@mail.ru

Abstract: The capacity calculations for cutter-loaders in specific geological conditions of open pit mining are meant for the operation scheduling and rating, dump truck selection and efficient

mode determination. In specific conditions of open pit mining, the capacity of a cutter-loader is governed by many natural, geotechnical and organizational factors which are difficult to embrace in totally while they have influence on design parameters of cutter-loaders. Inherently, most factors are of a probabilistic nature. Consequently, it is expedient to evaluate cutter-loader capacity in each specific case, based on the integrated consideration of variation in multi-factor operating conditions and technical state of technologically interlocked equipment. This article addresses theoretical generalization of operating modes and modeling of performance criteria of cutter-loaders with regard to constantly changing physical and mechanical properties of rocks on the excavation site, process variables of faces, design and power data of cutter-loaders, reliable performance probability, random arrival of dump trucks, cutter-loader operator's skills and climatic conditions.

Key words: rocks, cutter-loader, face, operation site, design and power parameters, reliability, capacity per hour, capacity per shift, method, mathematical modeling, calculation program, analytical relationship, rotational angle, lumpiness.

For citation: Mislubayev I. T., Makhmudov A. M., Makhmudov Sh. A. Theoretical generalization of modes and modeling of performance criteria of cutter-loaders. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(1):102-110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.

Введение

Вопросы определения эксплуатационных показателей работы и функционирования экскаваторов рассматривались в трудах многих ведущих ученых [1 – 6]. Но до настоящего времени не разработана единая методика расчета производительности экскаваторов, а рекомендации отдельных работ различаются. При этом расчетная производительность карьерного экскаватора для одной и той же машины имеет совершенно различные значения.

На основе выполненных исследований эксплуатационных показателей работы и проведенного анализа методик расчета производительности карьерных экскаваторов установлено следующее.

Отсутствуют единая методика, учитывающая постоянно меняющиеся физико-механические свойства разрабатываемых пород участка и горизонта, технологические параметры забоя, конструктивно-силовые параметры экскаватора, вероятность показателей надежности его работы, случайный характер подачи транспорта, квалификацию машиниста экскаватора и климатические условия.

Моделирование при конкретных горно-геологических условиях эксплуатационных показателей работы и создание программы расчета производительности карьерных экскаваторов, для планирования и нормирования эксплуатации горнотранспортного оборудования, выбора транспорта, обеспечения им горных работ и установления рационального режима его функционирования является актуальной научно-практической задачей.

Теоретическое обоснование аналитических зависимостей

В конкретных условиях разработок открытым способом производительность экскаватора зависит от множества природных, горно-технологических, организационных факторов, сложно поддающихся учету и в значительной степени взаимодействующих с конструктивными параметрами карьерных экскаваторов, которые по существу имеют вероятностный характер.

При этом для каждого реального случая на основе совокупного учета изменений многофакторных условий эксплуатации и технического состояния экс-

каваторов и технологически увязанного транспортного оборудования целесообразно определять значения производительности.

Обобщение ранее выполненных в этой области исследований, а также учет накопленного в Республике Узбекистан и за рубежом опыта эксплуатации горнотранспортного оборудования позволили разработать предложения по уточнению методики расчетов производительности карьерных экскаваторов по функциональной работе на рабочем месте.

Определение эксплуатационной производительности экскаваторов по прочностным показателям пород основано на установлении времени цикла выемочных машин, взаимосвязи между мощностью двигателей напора, подъема, поворота, величины удельного сопротивления копанью; момента вращающихся частей экскаватора; угла поворота; конструктивных особенностей механизма открывания днища ковша; длительности непрерывной работы и передвижки экскаватора; а также вероятности безотказной его работы в заданных условиях эксплуатации. Эти показатели определяются различными параметрами и коэффициентами.

Для своевременной оценки эксплуатационных показателей работы экскаваторного оборудования нами была разработана методика их расчета с применением метода математического моделирования и программа расчета на языке DELPHI.

При этом с учетом вышесказанного в результате обобщения исследований В.В. Ржевского, Н.Г. Домбровского, Ю.И. Белякова, Р.Ю. Подэрни и других [7–13] установлена зависимость для определения часовой технической производительности карьерных экскаваторов ($\text{м}^3/\text{ч}$), которую рекомендуется принимать за основу математической модели

$$Q_{\text{max}} = \frac{3600EK_{\text{Э}}K_{\text{ЭТ}}K_{\text{В}}K_{\text{П}}K_{\text{И}}K_{\text{С}}K_{\text{КЛ}}P(t)}{\frac{9,8 \cdot 10^4 K_{\text{Э}}K_{\text{Р}}K_{\text{f}}E}{302N_{\text{П}}\eta_{\text{П}}} + 0,322\sqrt{\frac{I(1,37 + \eta_{\text{ПОВ}}^2)\beta^2}{N_{\text{ПОВ}}\eta_{\text{ПОВ}}}}} \frac{t_{\text{Р}}}{t_{\text{Р}} + t_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где E — вместимость ковша экскаватора, м^3 ; $K_{\text{Э}}$ — коэффициент экскавации; $K_{\text{ЭТ}}$ — коэффициент реализации технической производительности в процессе эксплуатации; $K_{\text{В}}$ — коэффициент использования карьерных экскаваторов во времени; $K_{\text{П}}$ — уровень совершенства подготовленности забоя; $K_{\text{С}}$ — уровень технического состояния экскаватора; $K_{\text{И}}$ — уровень профессиональной подготовленности и деятельности машиниста экскаватора; $K_{\text{КЛ}}$ — коэффициент, учитывающий климатические условия; $P(t)$ — вероятность безотказной работы экскаватора; K_{f} — коэффициент удельного сопротивления копанью, $\text{МН}/\text{м}^2$; $N_{\text{П}}$ — мощность двигателя механизма подъема, кВт; $\eta_{\text{П}}$ — КПД механизма подъема; I — момент инерции вращающихся частей экскаватора; $N_{\text{ПОВ}}$ — мощность двигателя механизма поворота, кВт; $\eta_{\text{ПОВ}}$ — КПД механизма поворота; β — угол поворота, рад; $t_{\text{Р,к}}$ — время разгрузки ковша, $t_{\text{Р,к}} = t'_{\text{Р}} + t_{\text{о}}$, с; $t'_{\text{Р}}$ — время разгрузки ковша в зависимости от свойства горной массы, с; $t_{\text{о}}$ — включение и срабатывание механизма открывания днища ковша экскаватора, с; $t_{\text{п}}$ — длительность непрерывной работы экскаватора с одного места установки, с; $t_{\text{н}}$ — длительность одной передвижки, с.

Разработка программного обеспечения для оценки эксплуатационных показателей работы экскаваторного оборудования

В расчетах принимались данные хронометражных наблюдений при исследовании работы карьерных экскаваторов и данные отчетных материалов рудников

Исходные данные для расчета производительности экскаватора
Input data for cutter-loader capacity calculation

№	Наименование параметров, коэффициентов и показателей работы экскаваторов	Единица измерения	Обозначение	Значение
1	2	3	4	5
1	Вместимость ковша	м ³	E_k	15
2	Коэффициент экскавации		$K_э$	0,6
3	Коэффициент разрыхления		K_p	1,5
4	Коэффициент наполнения		K_n	0,9
5	Длительность непрерывной работы экскаватора с одного места установки	с	t_p	1500
6	Длительность одной передвижки	с	t_p	60
7	Коэффициент удельного сопротивления копания	МН/м ²	K_f	0,35
8	Коэффициент использования карьерных экскаватора во времени		$K_в$	0,7
9	Уровень технического состояния экскаватора		K_c	1
10	Мощность подъемных двигателей	кВт	N_n	500x2
11	КПД механизма подъема		η_n	0,82
12	Мощность двигателей подъема	кВт	$N_{под}$	220x2
13	КПД двигателей поворота		$\eta_{пов}$	0,87
14	Момент инерции вращающихся частей экскаватора	кг · м ²	I	40 137 851
15	Масса экскаватора	т	m	725
16	Угол поворота	рад	β	1,57
17	Время разгрузки ковша	с	$t_{p,k}$	3
18	Уровень совершенства подготовленности забоя		K_n	0,9
19	Уровень профессиональной подготовленности и деятельности машиниста экскаватора		K_i	0,98
20	Коэффициент климатических условий		$K_{кл}$	0,99
21	Вероятность безотказной работы экскаватора		$P(t)$	0,9
22	Диаметр среднего куска взорванной массы		$d_{ср,p}$	0,4
23	Основание натурального логарифма		e	2,71

Навоийского горно-металлургического комбината. Результаты определения эксплуатационных показателей работы карьерных экскаваторов будут рассмотрены на примере расчета карьерной механической лопаты с вместимостью ковша $E_k = 15 \text{ м}^3$ (рис. 1). Исходные данные для расчета сведены в таблицу.

В результате программного расчета определено, что при повороте платфор-

мы на 90° расчетное время цикла экскавации для экскаватора ЭКГ-15 составляет $T_c = 34,9 \text{ с}$, а техническая производительность $Q_{\text{тех}} = 818,16 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 1).

Расчеты также производились и для карьерных механических лопат с вместимостью ковшей $E_k = 5; 8; 10; 12,5; 18$ и 20 м^3 при разных углах поворота платформы. Следует отметить следующее: программа позволяет проводить

Производительность карьерного экскаватора

Файл

Производительность карьерного экскаватора

Данные | Результат Q_{tex} | Результат Q_e

Исходные данные

Вместимость ковша E = 15 м³

Коэффициент экскавации K_э = 0,6

Коэффициент разрыхления K_р = 1,5

Коэффициент технического состояния экскаватора K_с = 1

Продолжительность смены T_{см} = 11 ч

Длительность непрерывной работы экскаватора с одного места установки tr = 1500 с

Длительность одной передатки t_п = 60 с

Коэффициент удельного сопротивления копания K_f = 0,35 МН/м²

Коэффициент реализации технической производительности K_{рт} = 1

Коэффициент использования экскаватора во времени K_в = 0,7

Время разгрузки ковша tr_в = 2 с

Время открывания днища ковша экскаватора to = 1 с

Коэффициент управления машиной K_и = 0,98

Мощность подъемных двигателей N_п = 1000 кВт

КПД механизма подъема η_п = 0,82

Мощность двигателей поворота N_{пов} = 440 кВт

КПД двигателей поворота η_{пов} = 0,87

Момент инерции вращающихся частей экскаватора I = 40137851 кг·м²

Угол поворота β = 1,57 рад

Коэффициент подготовки забоя K_п = 0,9

Коэффициент климатических условий K_{кл} = 0,99

Вероятность безотказной работы экскаватора P(t) = 0,9

Диаметр среднего куска взорванной массы d_{ср} = 0,4 м

Рассчитать

Q_{tex} = 818,10628616571 Q_e = 9820,28863132933

34,9136311954222 0,591259395948586

33,5695657527203

Рис. 1. Схема диалогового окна для ввода данных в программу расчета
Fig. 1. Dialog window for data input

расчеты с вводом любых параметров вместимости ковша, угла поворота платформы, различных коэффициентов, кусковатости разрушенной породы и др.,

что представлено на рис. 1. Результаты проведенных расчетов по формуле (1) и разработанной программе представлены на рис. 2.

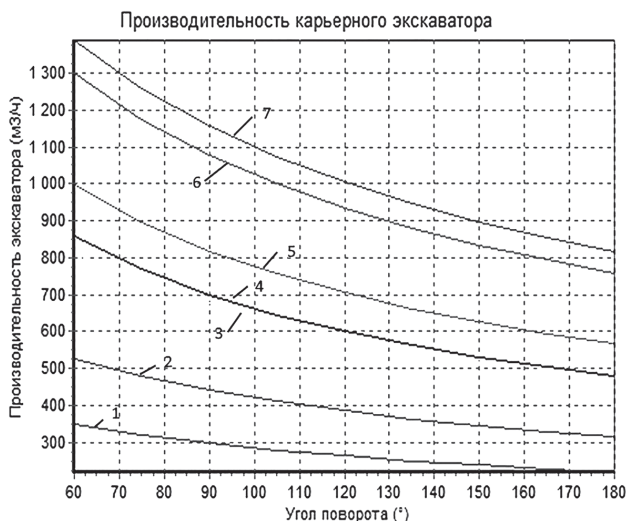


Рис. 2. Зависимость часовой технической производительности экскаваторов от угла поворота платформы: 1 — при $Q_{\text{тех}} = 5 \text{ м}^3$; 2 — при $Q_{\text{тех}} = 8 \text{ м}^3$; 3 — при $Q_{\text{тех}} = 10 \text{ м}^3$; 4 — при $Q_{\text{тех}} = 12,5 \text{ м}^3$; 5 — при $Q_{\text{тех}} = 15 \text{ м}^3$; 6 — при $Q_{\text{тех}} = 18 \text{ м}^3$ и 7 — при $Q_{\text{тех}} = 20 \text{ м}^3$

Fig. 2. Hourly technical capacity versus rotational angle of cutter-loader: 1 — at $Q_t = 5 \text{ м}^3$; 2 — at $Q_t = 8 \text{ м}^3$; 3 — at $Q_t = 10 \text{ м}^3$; 4 — at $Q_t = 12,5 \text{ м}^3$; 5 — at $Q_t = 15 \text{ м}^3$; 6 — at $Q_t = 18 \text{ м}^3$; 7 — at $Q_{\text{тех}} = 20 \text{ м}^3$

По графикам (рис. 2) для каждого типоразмера экскаватора определяются его технические производительности при разных углах поворота платформы.

На основе проведенных исследований подготовленности рабочих мест для экскаваторов различной вместимости ковшей и данных хронометражных наблюдений, а также учета влияния кусковатости взорванной горной массы и средних размеров кусков породы на процесс экскавации для определения сменной эксплуатационной производительности рекомендуется следующая аналитическая зависимость:

$$Q_3 = \frac{3600ET_{CM}K_{ЭТ}K_B K_{П} K_{И} K_C K_{КЛ} P(t)}{9,8 \cdot 10^4 \cdot 1,18 \exp\left(-6,5 \frac{d_{cp,p}^3}{E^{1/2}}\right) K_f E} \times \frac{I(1,37 + \eta_{пов}^2)\beta^2}{102N_{П}\eta_{П}} + 0,3223 \sqrt{\frac{I(1,37 + \eta_{пов}^2)\beta^2}{N_{пов}\eta_{пов}}} + t'_p + t_o, \quad (2)$$

$$\times \frac{\exp\left(-6,5 \frac{d_{cp,p}^3}{E^{1/2}}\right)}{\left(\left(\frac{d_{cp,p}^2}{0,75E^{1/3}}\right) \exp\left(1 - \frac{d_{cp,p}^2}{0,56E^{2/3}}\right) + 1,35\right) t_p + t_n} \frac{t_p}{t_p + t_n}$$

где T_{CM} — продолжительность смены, ч; \exp — основание натурального логарифма; $d_{cp,p}$ — диаметр среднего куска всей взорванной горной массы, м;

Вышеприведенная аналитическая зависимость (2) принята за основу математической модели для разработки программы экспресс расчета сменной эксплуатационной производительности экскаватора на языке DELPHI.

Расчеты сменной эксплуатационной производительности проводились для карьерных механических лопат с различной вместимостью ковшей при различной

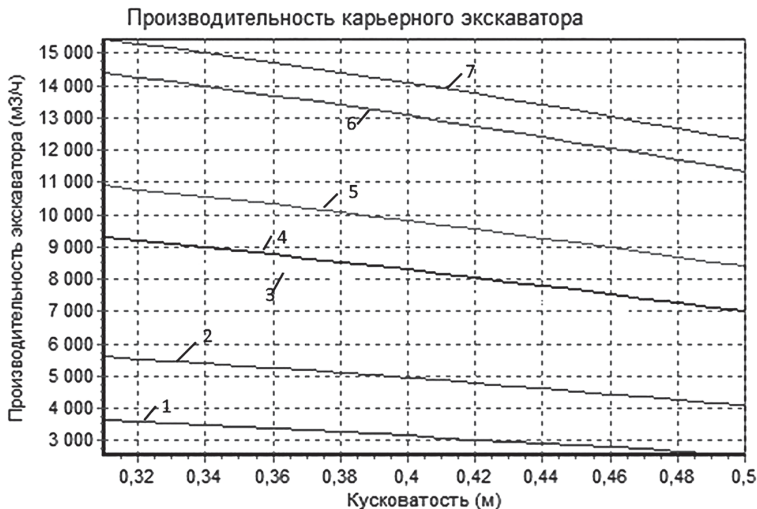


Рис. 3. Зависимость сменной эксплуатационной производительности экскаваторов от среднего размера куска разрыхленной породы: 1 — при $Q_3 = 5 \text{ м}^3$; 2 — при $Q_3 = 8 \text{ м}^3$; 3 — при $Q_3 = 10 \text{ м}^3$; 4 — при $Q_3 = 12,5 \text{ м}^3$; 5 — при $Q_3 = 15 \text{ м}^3$; 6 — при $Q_3 = 18 \text{ м}^3$ и 7 — при $Q_3 = 20 \text{ м}^3$

Fig. 3. Shift working capacity of cutter-loader versus average particle size of loose rock: 1 — at $Q_w = 5 \text{ м}^3$; 2 — at $Q_w = 8 \text{ м}^3$; 3 — at $Q_w = 10 \text{ м}^3$; 4 — at $Q_w = 12,5 \text{ м}^3$; 5 — at $Q_w = 15 \text{ м}^3$; 6 — at $Q_w = 18 \text{ м}^3$; 7 — at $Q_w = 20 \text{ м}^3$

степени подготовленности забоя и кусковатости горных пород. Результаты расчетов приведены на рис. 3 [14].

Из графика можно определить значение сменной эксплуатационной производительности экскаватора ЭКГ-15 при повороте платформы на 90°, что составляет $Q_3 = 9820 \text{ м}^3/\text{смена}$ при принятом среднем размере куска породы 0,4 м.

Для сравнения полученных расчетных значений с фактической производительностью экскаватора проведен хронометраж совместной работы экскаватора ЭКГ-15 и карьерного автосамосвала грузоподъемностью 190–220 т. Исследованиями определена фактическая сменная производительность экскаватора ЭКГ-15 на руднике Мурунтау, которая составила в среднем 9378–9623 м^3 в смену.

Определение цикла погрузки руды в автосамосвалы проводилось с учетом объемного веса породы в массиве $\gamma = 2,67 \text{ т/м}^3$ и коэффициента разрыхления = 1,5. В соответствии с рекомендациями Л.И. Барона [15] число циклов погрузки принималось равным 6–8 в один автосамосвал при массе груза на ковше 26,7–28,6 т, расстоянии транспортирования в среднем 3–4 км. По

результатам анализа хронометражных наблюдений цикл погрузки 190 т руды автосамосвалом составил 3,4–3,6 мин.

Заключение


В результате расчета определено фактическое значение времени цикла экскавации для конкретных условий работы с учетом разных углов поворота платформы экскаватора. Для условий работы экскаватора ЭКГ-15 фактическое время цикла экскавации составляет $T_{\text{ц}} = 34 \text{ с}$. При этом установлена зависимость часовой технической производительности экскаватора от угла поворота платформы, имеющая односторонний нормальный характер распределения.

Зависимость сменной эксплуатационной производительности от изменения средних размеров кусков разрушенной породы подчиняется монотонно убывающей функции нормального распределения (функция Лапласа).

Полученные результаты способами хронометражного измерения и по выражениям (1) и (2) отличаются незначительно, что подтверждает достоверность расчета производительности экскаватора с помощью рекомендуемых формул (расхождение 2–5%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домбровский Н. Г. Экскаваторы // Общие вопросы теории, проектирования, исследования и применения. — М.: Машиностроение, 1969. — 318 с.
2. Беляков Ю. И. Экскаваторные работы: Справочник рабочего. — М.: Недра, 1992. — 288 с.
3. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. — М.: МГГУ, 2007. — 680 с.
4. Репин Н. Я., Репин Л. Н. Выемочно-погрузочные работы: Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — 267 с.
5. Кантович Л. И., Литвин О. И., Хорешок А. А., Тюленева Е. А. Опыт и перспективы применения гидравлических экскаваторов при отработке угленасыщенных зон на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 152–160. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-152-160.
6. Анистратов К. Ю. Технико-экономическое обоснование эффективности применения карьерных экскаваторов ЭКГ-18 с реечным напором ПАО УРАЛМАШЗАВОД на угольных разрезах // Горное дело. — 2016. — № 3(9). — С. 6–11.

7. Ржевский В. В. Открытые горные работы: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1985. — 549 с.
8. Квагинидзе В. С., Козовой Г. И., Чакветадзе Ф. А., Антонов Ю. А., Корецкий В. Б. Экскаваторы на карьерах. Конструкции, эксплуатация и расчет: Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2011. — 409 с.
9. Инамов У. Управление качеством эксплуатации и ремонта горного оборудования. — Ташкент: Фан, 1988. — 88 с.
10. Томаков П. И. Интенсификация использования оборудования на карьерах. — М.: Недра, 1980. — 219 с.
11. Жариков С. Н. Совершенствование расчета производительности карьерного экскаватора // Записки горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 56–61. DOI: 10.25515/PMI/2018/1.56.
12. Лукашук О. А., Летнев К. Ю. Определение энергозатрат при экскавации грунта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 113–118. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-113-118.
13. Samwel V. M. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time // Engineering. 2017. Vol. 09. No 07. Pp. 599–624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
14. Опанасенко П. И., Исайченков А. Б. Новый способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 1. — С. 317–226.
15. Барон Л. И. Кусковатость и методы ее измерения. — М.: Изд-во АН СССР, 1982. — 121 с.
16. Fisonga M., Mutambo V. P. Optimization of the fleet per shovel productivity in surface mining: Case study of Chilanga Cement, Lusaka Zambia // Cogent Engineering. 2017. Vol. 4. No 1. Article 1386852. DOI: 10.1080/23311916.2017.1386852.
17. Vondráková T., Voštová V. Selection of excavators for earth work on the basis of their performance // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 245. No 2. Article 022086. DOI: 10.1088/1757-99X/245/2/022086.
18. Nasonov M. Yu., Lykov Yu. V. Effects of working conditions on excavator performance – longevity of metal structures // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. No 4. 042017. DOI: 10.1088/1755-1315/194/4/042017. 

REFERENCES

1. Dombrovskiy N. G. *Ekskavatory. Obshchie voprosy teorii, proektirovaniya, issledovaniya i primeneniya* [Excavators. General issues of theory, design, research and application], Moscow, Mashinostroenie, 1969, 318 p.
2. Belyakov Yu. I. *Ekskavatornye raboty: Spravochnik rabochego* [Excavation work: Handbook], Moscow, Nedra, 1992, 288 p.
3. Poderni R. Yu. *Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov: Uchebnik dlya vuzov* [Quarry machinery: Textbook for students], Moscow, MGGU, 2007, 680 p.
4. Repin N. Ya., Repin L. N. *Vyemochno-pogruzochnye raboty: Uchebnoe posobie* [Excavation: Tutorial], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 267 p.
5. Kantovich L. I., Litvin O. I., KHoreshok A. A., Tyuleneva E. A. Hydraulic excavators in coal-rich zones of open pit mines in Kuzbass: Experience and prospects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 4, pp. 152–160. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-152-160.
6. Anistratov K. Yu. Feasibility study the use of rack and pinion excavators EKG-18 PJSC URALMASHZAVOD at coal mines. *Gornoe delo.* 2016, no 3(9), pp. 6–11. [In Russ].
7. Rzhavskiy V. V. *Otkrytye gornye raboty: Uchebnik dlya vuzov* [Open cast mining: Textbook for students], Moscow, Nedra, 1985, 549 p.
8. Kvaginidze V. S., Kozovoy G. I., Chakvetadze F. A., Antonov Yu. A., Koretskiy V. B. *Ekskavatory na kar'erakh. Konstruktsii, ekspluatatsiya i raschet.* Uchebnoe posobie [Excava-

tors in quarries. Designs, operation and calculation: Tutorial], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2011, 409 p.

9. Inamov U. *Upravlennie kachestvom ekspluatatsii i remonta gornogo oborudovaniya* [Quality management of mining equipment operation and repair], Tashkent, Fan, 1988, 88 p.

10. Tomakov P. I. *Intensifikatsiya ispol'zovaniya oborudovaniya na kar'erakh* [Intensification of the use of equipment in quarries], Moscow, Nedra, 1980, 219 p.

11. Zharikov S. N. Improvement of mining excavator productivity calculation. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 229, pp. 56–61. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI/2018/1.56.

12. Lukashuk O. A., Letnev K. Yu. Determination of energy consumption in soil excavation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 6, pp. 113–118. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-113-118.

13. Samwel V. M. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time. *Engineering*. 2017. Vol. 09. No 07. Pp. 599–624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.

14. Opanasenko P. I., Isaychenkov A. B. New method for the determination of influence of grain size composition of rocks on excavation performance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 1, pp. 317–226. [In Russ].

15. Baron L. I. *Kuskovatost' i metody ee izmereniya* [Lumpiness and methods of its measurement], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1982, 121 p.

16. Fisonga M., Mutambo V. P. Optimization of the fleet per shovel productivity in surface mining: Case study of Chilanga Cement, Lusaka Zambia. *Cogent Engineering*. 2017. Vol. 4. No 1. Article 1386852. DOI: 10.1080/23311916.2017.1386852.

17. Vondráková T., Vořtová V. Selection of excavators for earth work on the basis of their performance. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245. No 2. Article 022086. DOI: 10.1088/1757-99X/245/2/022086.

18. Nasonov M. Yu., Lykov Yu. V. Effects of working conditions on excavator performance – longevity of metal structures. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 194. No 4. 042017. DOI: 10.1088/1755-1315/194/4/042017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мислибаев Илхом Туйчибаевич¹ — д-р техн. наук, доцент,
декан горного факультета,

Махмудов Азамат Махмудович¹ — канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой, e-mail: maxmudov-azamat@inbox.ru,

Махмудов Шерзод Азаматович¹ — докторант,
e-mail: 1yy2@mail.ru,

¹ Навоийский государственный горный институт, Узбекистан.

Для контактов: Махмудов Ш.А., e-mail: 1yy2@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I. T. Mislibayev¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Dean of the Faculty of Mining,

A. M. Makhmudov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Head of Chair, e-mail: maxmudov-azamat@inbox.ru,

Sh. A. Makhmudov¹, Doctorial Student, e-mail: 1yy2@mail.ru,

¹ Navoiy State Mining Institute, Navoiy, Uzbekistan.

Corresponding author: Sh. A. Makhmudov, e-mail: 1yy2@mail.ru.

Получена редакцией 11.02.2020; получена после рецензии 23.03.2020; принята к печати 10.12.2020.

Received by the editors 11.02.2020; received after the review 23.03.2020; accepted for printing 10.12.2020.