ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(11-2):39-51
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.271.4.681.518.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_39

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ – ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЧЕРПАНИЯ ВЗОРВАННЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ИЗ ОСЫПИ

Л.А. Антропов[1], Ю.А. Девяткин[2], Л.В. Петровых[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,
e-mail: antropov.l@yandex.ru
[2] ПАО «Уралмашзавод», Екатеринбург, Россия

Аннотация: На основании предложенной физической модели рабочего оборудования карьерных экскаваторов и экспериментальных работ, проведенных в производственных условиях, предлагается методика определения технико-экономического показателя — интенсивности процесса черпания взорванных скальных пород из осыпи, обрушенной части забоя после буровзрывных работ. Определены факторы, влияющие на интенсивность процесса черпания: конструктивные параметры экскаватора (геометрическая емкость ковша и составляющая веса рабочего оборудования), параметры электромеханической системы механизма подъема рабочего оборудования (средние значения усилий и скоростей, развиваемых приводом подъема, коэффициент формы механической характеристики привода подъема и время разгона привода подъема до скорости холостого хода), управляющее воздействие, определяемое соотношением избыточных усилий, развиваемых приводами подъема и напора механизмов рабочего оборудования, физико-механические свойства горной массы в забое (объемный вес, коэффициент разрыхления и относительный диаметр средневзвешенного куска горной породы), эффективность использования геометрической емкости ковша экскаватора (отношение коэффициента наполнения ковша к коэффициенту разрыхления горной породы в ковше). Проведенные исследования обосновывают предложенную оценку качества процесса черпания взорванных скальных пород из осыпи и факторы, влияющие на интенсивность наполнения ковша.

Ключевые слова: рабочее оборудование карьерного экскаватора, параметры карьерного экскаватора, процесс черпания пород, производительность экскаватора, горная осыпь, физико-механические свойства горной массы, наполнение ковша экскаватора.

Для цитирования: *Антропов Л. А., Девяткин Ю. А., Петровых Л. В.* Методика определения технико-экономического показателя — интенсивности процесса черпания взорванных скальных пород из осыпи // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-2. – С. 39–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_39.

Methodology for determining the technical and economic indicator – the intensity process of scooping blasted rocks from the hillside waste

L.A. Antropov[1], Yu.A. Devyatkin[2], L.V. Petrovykh[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: antropov.l@yandex.ru
[2] AO «Uralmashzavod», Ekaterinburg, Russia

© Л.А. Антропов, Ю.А. Девяткин, Л.В. Петровых. 2022.

Abstract: In the paper, based on the proposed physical model of the working equipment of quarry excavators and experimental work carried out in production conditions, a method is proposed for determining the technical and economic indicator — the intensity of the process of scooping blasted rocks from the hillside waste, the collapsed part of the face after drilling and blasting. The factors influencing the intensity of the scooping process are determined: the design parameters of the excavator (the geometric capacity of the bucket and the component of the weight of the working equipment), the parameters of the electromechanical system of the lifting mechanism of the working equipment (the average values of the forces and speeds developed by the lifting drive, the shape coefficient of the mechanical characteristics of the lifting drive and the acceleration time of the lifting drive to idle speed), the control action, determined by the ratio of excess forces developed by the lifting and pressure drives of the working equipment mechanisms, physical and mechanical properties of the rock mass in the face (volume weight, loosening coefficient and relative diameter of the weighted average piece of rock), the efficiency of using the geometric capacity of the excavator bucket (the ratio of the bucket filling coefficient to the rock loosening coefficient in the bucket). The conducted studies substantiate the proposed assessment of the quality of the process of scooping blasted rocks from the scree and the factors affecting the intensity of the filling of the scooping process.

Key words: working equipment of a quarry excavator, parameters of a quarry excavator, the process of scooping rocks, excavator performance, hillside waste, physical and mechanical properties of mined rock, filling the excavator bucket.

For citation: Antropov L. A., Devyatkin Yu. A., Petrovykh L. V. Methodology for determining the technical and economic indicator — the intensity process of scooping blasted rocks from the hillside waste. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-2):39-51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_39.

Введение

Отечественный и мировой опыт работы карьерного выемочно-погрузочного оборудования показывает, что при разработке крепких скальных пород и полускальных пород наиболее эффективными являются карьерные одноковшовые экскаваторы с реечным напором типа прямая механическая лопата большой единичной мощности (таблица) [1 — 3].

К технико-экономическим показателям выемочно-погрузочного оборудования относятся производительность, надежность, удельный расход электроэнергии и материалоемкость [4, 5]. Наиболее важным из перечисленных показателей технического уровня землеройного оборудования является производительность, так как имея надежную машину с низким расходом энергии и невысокой материалоемкостью, но не выполняющую главную задачу по производительности, мы теряем смысл в создании подобной техники.

Для правильного определения подвижки забоев, расчета транспортных средств требуется надежная методика расчета производительности одноковшовых карьерных экскаваторов.

Методы

В работах Н.Г. Домбровского [2], Р.Ю. Подэрни [6] введены понятия теоретической (паспортной), технической и эксплуатационной производительности одноковшовых экскаваторов.

Типовые ряды карьерных экскаваторов

ипа прямая лопата
мировых производителей
Typical rows of quarry excavators of the straight shovel type of world manufacturers

Вместимость ковша, м³	10 – 12	12 – 17	16 – 25	27 – 32	32 – 36	40 – 60
Весовая нагрузка, т	18 – 25	27 – 30	35 – 40	45 – 55	57 – 65	80 – 110
Уралмашзавод т (м³)	ЭКГ-12 20 (12)	ЭКГ-15 30 (15)	ЭКГ-18 40 (22)	ЭКГ-25 45–49	ЭКГ-35 63 (35)	
ИЗ-РАРТЭКС т (м³)	ЭКГ-12 24 (12)	ЭКГ-15 27 (12,5)	ЭКГ-18Р/20К 38 (20)		ЭКГ-32Р/35К 57,6 (33)	ЭКГ-50 108 (60)
P&H т (м³)	1900AL 18 (10,7)			2300XPC 45,4 (25)	2800XPC 63,5 (35)	4100XPC 82–109 (47–67)
CATERPILLAR т (м³)				7295 38 (25)	7395 63,5 (35)	7495 80–100 (40–60)
TZ т (м³)	WK-12 21,8 (12)		WK-20 36 (20)	WK-27 48,6 (27)	WK-35 60,6 (35)	WK-55 99 (55)

Теоретическая производительность одноковшового карьерного экскаватора — это количество горной породы (в м³), которое может быть выработано в единицу времени (за час) при непрерывной его работе. Условия работы берутся предположительно одинаковыми для всех машин, коэффициенты наполнения ковша ($K_н$) и разрыхления породы ($K_р$) принимаются равными единице.

При расчете теоретической производительности экскаватора принимаются одинаковыми:

- угол поворота на выгрузку — 90°;
- высота черпания — до уровня напорного вала;
- номинальные скорости рабочих движений;
- удельные сопротивления породы копанию.

Теоретическая производительность для данной машины всегда одинакова, и повысить ее можно только внесением усовершенствований в ее конструкцию.

Если теоретическая производительность зависит только от конструктивных параметров экскаватора, то техническая производительность учитывает конкретные условия работы землеройной машины: категорию пород, коэффициенты разрыхления породы и наполнения ковша. Например, у одноковшового карьерного экскаватора [2]

$$Q_{тех} = Q_т \cdot \frac{K_н}{K_р} \frac{t_р}{t_р + t_п} = 60En_S \frac{t_р}{t_р + t_п} K_э, \quad (1)$$

где $Q_т = 60 \cdot E \cdot n_S$ — теоретическая производительность экскаватора, м³/ч; E — геометрическая вместимость (емкость) ковша, м³; $n_S = 60/t_ц$ — количество ковшей (циклов экскавации), разгружаемых в минуту; $t_ц = t_ч + t_п + t_р + t_{пз}$ — продолжительность цикла экскавации, с; $t_ч$ — длительность операции черпания, с; $t_{пр}$ — длительность поворота экскаватора на разгрузку, с; $t_р$ — длительность разгрузки ковша, с; $t_{пз}$ — длительность поворота в забой с порожним ковшом, с; $K_и = K_н/K_р$ — коэффициент использования емкости ковша, от.ед; $K_н$ — коэффициент наполнения ковша (0,8÷1,1); $K_р$ — коэффициент разрыхления горной породы в ковше (1,1÷1,4); $t_р$ — длительность непрерывной работы экскаватора

с одного положения, ч; $t_п$ — длительность одной передвижки, ч.

Эксплуатационная производительность — это действительный объем горной массы, отработанный экскаватором за определенный период эксплуатации. Она рассчитывается с учетом неизбежных организационных и технологических простоев: учитываются потери времени на приемку смены и осмотр машины, смазку, замену подвижного состава. Эксплуатационная производительность численно меньше технической. Ее величина отражает совершенство организации работы экскаватора и всех обслуживающих его машин. Эксплуатационная производительность может быть сменной, месячной и годовой (в последних случаях учитываются потери времени на ремонтные осмотры, текущие и капитальные ремонты)

$$Q_э = Q_{тех} T K_в = 60 E n_S \frac{K_н}{K_р} \frac{t_р}{t_р + t_п} T K_в, \quad (2)$$

где T — длительность смены, ч; $K_в = (T - T_п)/T$ — коэффициент использования экскаватора во времени (0,8 — 0,9 при автотранспорте), отн. ед.; $T_п$ — продолжительность простоев в течение рабочей смены, ч.

Эксплуатационная производительность экскаватора характеризует организацию работы на данном предприятии (не только по добыче полезного ископаемого, но и по обслуживанию экскаваторов, снабжению их запасными частями).

Для определения технической производительности экскаваторов необходимо знать: фактическую продолжительность цикла экскавации, коэффициент использования емкости ковша.

Если определение продолжительности транспортных операций ($t_{пр}$ и $t_{пз}$), времени на разгрузку ковша ($t_р$) и длительности одной передвижки ($t_п$) не представляет трудности, то для определения продолжительности операции черпания ($t_ч$) и коэффициента наполнения ковша ($K_н$), зависящих от физико-механическими свойствами, разрабатываемых горных пород, качества подготовки забоя и динамическими характеристиками электромеханических систем механизмов рабочего оборудования экскаватора и определяющих технико-экономические показатели эффективности работы карьерных экскаваторов, в настоящее время нет достаточно надежной методики их определения.

Экскавация взорванных скальных пород из осыпи (обрушенной части забоя), является сложным процессом, зависящим от многих факторов, учесть которые или повлиять на них в производственных условиях чаще всего бывает невозможно. Поэтому результаты экспериментов, полученные многими авторами очень трудно сопоставить, так как полученные зависимости имеют эмпирические коэффициенты, зависящие от конкретных условий работы экскаватора (параметры забоя, физико-механические свойства горной породы, наладочных параметров приводов механизмов рабочего оборудования, манеры работы машиниста).

Большая группа исследователей (В.К. Рубцов, Н.В. Мельников, Л.Н. Марченко, Н.П. Сеинов, Ю.И. Беляков, В.М. Матушенко, Ю.И. Анистратов, Н.И. Жабин, Л.С. Константинов, В.К. Угольников, С.Е. Гавришев, А.П. Ташкинов, А.А. Сысоев, А.Б. Исайченков, П.И. Опанасенко, Г.М. Крюков, Г.В. Кузнецов, П.А. Касьянов) занималась изучением влияния кусковатости взорванной горной массы на эффективность процесса черпания.

В работе В.К. Рубцова зависимость производительности экскаваторов от степени дробления пород в результате натурных исследований, получена для экскаватора ЭКГ-4,6 [7].

Л.С. Константинов, исследовав влияние кусковатости взорванной горной массы на эффективность экскавации, определил зависимость длительности черпания от среднего диаметра куска горной массы [8].

Ю.И. Беляков и В.М. Владимиров установили влияние кусковатости взорванной горной массы на производительности экскаватора [9].

Ю.И. Анистратов и Н.И. Жабин путем моделирования выявили рациональную степень дробления горной массы на карьерах с автомобильным транспортом [10].

В работе А.С. Ташкинова, А.А. Сысоева, И.А. Такшинов [11] приведены зависимости продолжительности черпания и коэффициента экскавации в зависимости от качества подготовки забоя к экскавации.

А.Б. Исайченков, П.И. Опанасенко и Е.А. Кононенко исследовали влияние кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора [12 — 14].

В.К. Угольников, С.Е. Гавришев, исследовав влияние гранулометрического состава горной массы на производительность экскаваторов, определил зависимость длительности черпания от среднего диаметра куска горной массы [15].

Влияние параметров главных механизмов карьерного экскаватора на производительность экскавации горных пород изучали В.В. Аксенов, А.П. Комиссаров [16, 17].

Математическим и компьютерным моделированием процессов работы экскаваторов в последние годы занимались В.С. Шестаков [3], F.A. Bender, O.A. Sawodny [18], B. Lee, H.J. Kim [19], X. Yu, X. Pang [20].

Анализ работы электроприводов экскаватора при экскавации однородной горной массы, выполненный M.A. Oskouei, K. Awuah-Offei [21], показал, что производительность процесса может изменяться до 50%, а энергопотребления — до 25% в зависимости от интенсивности выполнения оператором технологических операций. В.Т. Дмитриевым на примере анализа энергетических показателей шахтных подъемных установок доказано, что увеличение скорости подъема с 1 до 3 м/с обеспечивает снижение расхода электроэнергии на 26% [22].

Экспериментально полученные зависимости производительности, усилий, развиваемых механизмами рабочего оборудования в процессе черпания, от степени подготовки забоя к экскавации, полученные для отдельных типов экскаваторов, переносить на другие, более мощные экскаваторы, рискованно.

Результаты

В статье авторами на основании экспериментальных работ, проведенных в производственных условиях и на физической модели рабочего оборудования карьерных экскаваторов, предлагается методика определения технико-экономического показателя — интенсивности процесса черпания ($И_ч$) взорванных скальных пород из осыпи, которая при постоянной величине геометрической емкости ковша (E), определяется отношением коэффициента наполнения ковша ($K_н$) горной породой к длительности выполнения операции черпания ($t_ч$)

$$И_ч = (E \cdot K_н) / t_ч . \qquad (3)$$

К основным факторам, влияющим на интенсивность процесса черпания относятся:

- конструктивные параметры экскаватора, под которыми понимаются геометрическая емкость ковша (E) и составляющая веса рабочего оборудования ($G_{ро}$) при движении рабочего органа по наиболее вероятной траектории в забое;
- параметры электромеханической системы механизма подъема рабочего

оборудования: средние значения усилий и скоростей, развиваемых приводом подъема ($\bar{P}_п$, $\bar{V}_п$), коэффициент формы механической характеристики привода подъема ($K_ф$) и время разгона привода подъема до скорости холостого хода ($T_р$), поскольку основным приводом, определяющим интенсивность процесса черпания, является привод подъема (привод напора создает условия для производительной работы привода подъема);

- управляющее воздействие, определяемое соотношением избыточных усилий, развиваемых приводами подъема и напора механизмов рабочего оборудования — коэффициент управления ($K_у$). Зависимость между избыточным напорным и избыточным подъемным усилиями аппроксимируется прямолинейной зависимостью, проходящей через начало координат, а коэффициент пропорциональности находится в диапазоне $K_у$ = = 0,8÷1,5. Эта зависимость является показателем, характеризующим индивидуальные особенности работы машиниста;
- в связи с тем, что производительная работа экскаватора в скальном забое осуществляется в основном из осыпи — обрушенной части забоя, основными показателями, характеризующими параметры горной массы в забое, являются ее физико-механические свойства, это объемный вес (γ), коэффициент разрыхления ($K_р$) и относительный диаметр средневзвешенного куска горной породы ($d_{ср} / \sqrt[3]{E}$);
- эффективность использования геометрической емкости ковша экскаватора оценивается отношением коэффициента наполнения ковша ($K_н$) к коэффициенту разрыхления горной породы в ковше ($K_р$).

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма расчета $И_ч$ от вышеперечисленных факторов.

На основании выполненных экспериментальных исследований, установлена зависимость между коэффициентом наполнения ковша горной породой и избыточным усилием, развиваемым приводом подъема ($P_и = \bar{P}_п - G_{ро}$) при работе в скальном взорванном забое (черпание из осыпи с коэффициентом разрыхления $K_р$ = 1,4÷1,5).

$$K_н = \frac{\bar{P}_п - 0{,}5G_{ро}}{E \cdot \gamma \cdot K_у \left(1 + 21\frac{d_{ср}}{\sqrt[3]{E}}\right)} K_р . \quad (4)$$

С использованием зависимости (4) по заданному значению коэффициента наполнения ковша определяется среднее усилие, развиваемое приводом подъема

$$\bar{P}_п = E\gamma \frac{K_н}{K_р} K_у \left(1 + 21\frac{d_{ср}}{\sqrt[3]{E}}\right) + 0{,}5G_{ро} . \quad (5)$$

Для успешного протекания процесса черпания требуется еще некоторый запас по усилию, развиваемому приводом подъема — среднемаксимальное усилие, которое связано со средним соотношением $\bar{P}_{см.п} = 1{,}3\bar{P}_п$.

В качестве примера на рис. 2 приведена последовательность изменения усилия и скорости, развиваемых приводом подъема (1) в процессе черпания на фоне механической характеристики привода (2).

В процессе черпания в начальной стадии происходит разгон привода подъема с увеличением сопротивления внедрению ковша в осыпь взорванной горной породы, усилие в подъемном канате возрастает, затем скорость и усилие стабилизируются в определенных пределах (участок наполнения ковша). В этом диапазоне находятся и средние за процесс черпания скорость и усилие привода подъема. При достижении зоны вывода ковша из осыпи, когда нагрузки на рабочий орган начинают снижаться, привод подъема интенсивно разгоняется, и скорость привода увеличивается.

В результате анализа экспериментального материала установлено, что

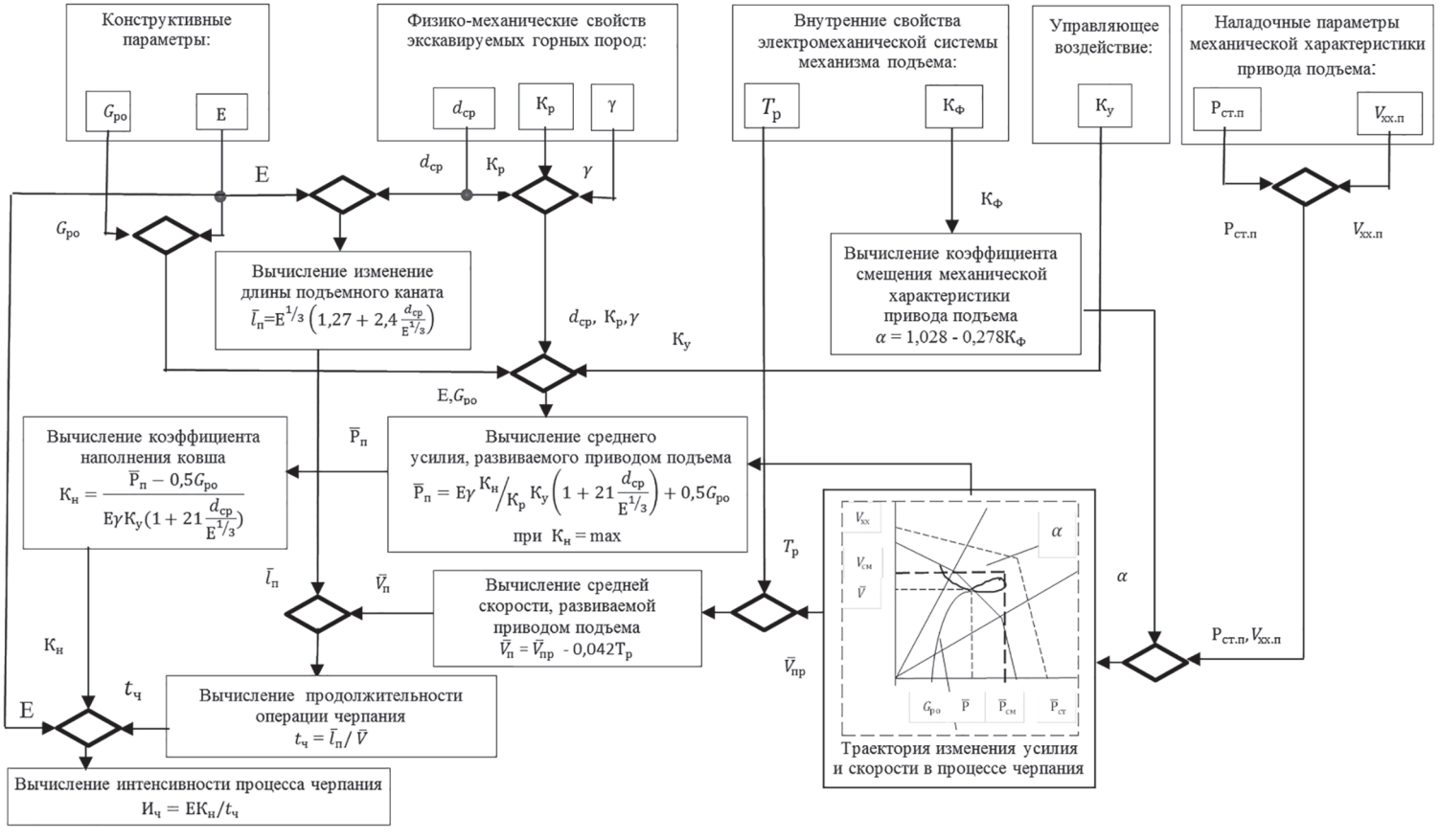

Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета интенсивности наполнения ковша при черпании взорванных скальных пород из осыпи

Fig. 1. Block diagram of algorithm for calculating the intensity of bucket filling when scooping blasted rocks from the scree

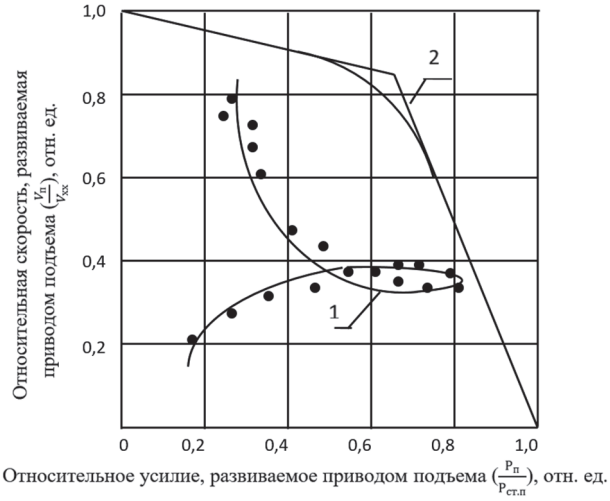

Рис. 2. Последовательность изменения мгновенных значений усилия и скорости, развиваемых приводом подъема (1) в процессе черпания, на фоне механической характеристики привода (2)

Fig. 2. Sequence of changes in the instantaneous values of force and speed developed by lifting drive (1) during the scooping process against background of mechanical characteristics of drive (2)

значения средних скоростей и усилий, развиваемых приводом подъема в процессе черпания, связаны между собой смещенной (2) механической характеристикой (рис. 3), причем коэффициент смещения зависит от коэффициента формы механической характеристики ($K_ф$).

При работе привода подъема с известной (заданной) механической характеристикой (1), имеющей три зоны:

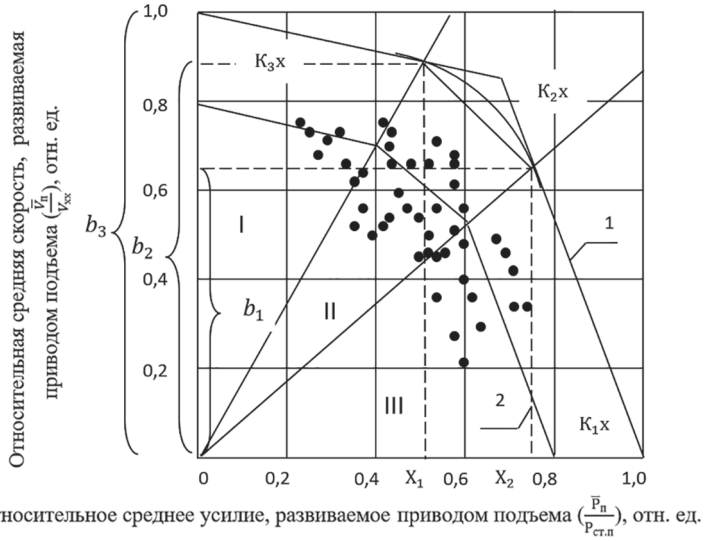

Рис. 3. Связь средних значений усилий и скоростей, реализуемых приводом подъема в процессе черпания, на фоне не смещенной (1) и смещенной (2) механических характеристик привода подъема

Fig. 3. Relationship between average values of forces and speeds realized by the lifting drive during scooping process against the background of unbiased (1) and displaced (2) mechanical characteristics of lifting drive

I — зона жесткой части механической характеристики;
II — зона переходной части механической характеристики;
III — зона крутопадающей части механической характеристики.

$$y = \begin{cases} K_1 x + b_1 & \text{при } 1 > x \geqslant x_2 \\ K_2 x + b_2 & \text{при } x_2 > x \geqslant x_1 \\ K_3 x + b_3 & \text{при } x_1 > x \geqslant 0 \end{cases} . \qquad (6)$$

Последняя смещается относительно заданной механической характеристики на величину коэффициента смещения (α), определяемого по экспериментальным данным методом наименьших квадратов

$$\alpha = \frac{\frac{b_1}{K_1^2+1}\sum_{i=1}^{n_1}\left(y_i - K_1 x_i\right) + \frac{b_2}{K_2^2+1}\sum_{i=n_1+1}^{n_2}\left(y_i - K_2 x_i\right) + \frac{b_3}{K_3^2+1}\sum_{i=n_1+1}^{n_3}\left(y_i - K_3 x_i\right)}{\frac{b_1^2}{K_1^2+1} + \frac{b_2^2}{K_2^2+1} + \frac{b_3^2}{K_3^2+1}}, \qquad (7)$$

где n_1, n_2, n_3 — количество экспериментальных значений, приходящихся на зоны I, II, III.

По смещенной (внутренней) механической характеристике

$$y = \begin{cases} K_1 x + b_1\alpha & \text{при } \alpha > x \geqslant \alpha x_2 \\ K_2 x + b_2\alpha & \text{при } \alpha x_2 > x \geqslant \alpha x_1 \\ K_3 x + b_3\alpha & \text{при } \alpha x_1 > x \geqslant 0 \end{cases} \qquad (8)$$

определяется средняя скорость привода подъема

$$\bar{V} = \left(K_i \frac{\bar{P}_n}{P_{ст.п}} + b_i\left(1{,}028 - 0{,}278 \cdot K_\Phi\right)\right)V_{XX} - 0{,}042T_p, \qquad (9)$$

где α = 1,028 — 0,278 — коэффициент смещения, зависящий от коэффициента полноты механической характеристики привода подъема (K_Φ); K_i и b_i — коэффициенты, описывающие уравнения отрезка прямой механической характеристики, на которой находится значение относительного среднего усилия $\bar{P}_n / P_{ст.п}$, развиваемого приводом подъема; V_{xx} — значение скорости холостого хода, развиваемой приводом подъема; T_p — значение времени разгона привода подъема до скорости холостого хода (быстродействие привода).

Исследования влияния быстродействия привода на среднюю скорость, развиваемую приводом подъема в процессе черпания, показали, что относительная скорость привода подъема и время разгона связаны следующей зависимостью:

$$\bar{V}_{пр} = \bar{V} + K_\varepsilon T_p, \qquad (10)$$

где $\bar{V}_{пр}$ — приведенная относительная средняя скорость привода подъема в процессе черпания (T_p = 0); K_ε = 0,042 — коэффициент, характеризующий ускорение, развиваемое приводом при изменении времени разгона.

Для систем приводов, применяемых на карьерных экскаваторах, средние скорости в процессе черпания в зависимости от быстродействия привода могут отличаться на величину до 10%.

Обсуждение результатов

Таким образом, среднюю скорость привода подъема можно определить в зависимости от среднего усилия, развиваемого приводом подъема в процессе черпания по следующему алгоритму:

1. Для известной (заданной) механической характеристики привода подъема по зависимости (7) определяется коэффициент смещения (α) и строится смещенная механическая характеристика.

2. По «внутренней» смещенной механической характеристике определяется средняя приведенная скорость привода подъема ($\bar{V}_{пр}$).

3. В зависимости от времени разгона привода подъема определяется средняя скорость привода ($\bar{V}$), значение относительного среднего усилия $\bar{P}_п / P_{ст.п}$.

Экспериментально полученная зависимость изменения длины подъемного каната от относительной кусковатости горной массы для $K_н$ = 1 имеет вид:

$$\bar{l}_п = E^{1/3}\left(1,27 + 2,4\frac{d_{ср}}{\sqrt[3]{E}}\right). \quad (11)$$

Продолжительность процесса черпания определяется

$$t_ч = \bar{l}_п / \bar{V}, \quad (12)$$

где $\bar{l}_п$ — изменение длины подъемного каната в процессе черпания.

Расчетные и экспериментально полученные значения продолжительности и коэффициента наполнения ковша хорошо согласуются.

Заключение

Расчетные и экспериментально полученные значения технико-экономического показателя интенсивности процесса черпания ($И_ч$) взорванных скальных пород из осыпи, которая при постоянной величине геометрической емкости ковша (E) определяется отношением коэффициента наполнения ковша горной породой ($K_н$) к длительности выполнения операции черпания ($t_ч$)

$$И_ч = E \cdot K_н / t_ч = \frac{\left(\bar{P}_п - 0,5G_{po}\right)\bar{V}}{\gamma K_у\left(1 + 21\frac{d_{ср}}{\sqrt[3]{E}}\right)\left(1,27 + 2,4\frac{d_{ср}}{\sqrt[3]{E}}\right)}, \quad (11)$$

хорошо согласуются.

Проведенные исследования обосновывают предложенную оценку качества процесса черпания взорванных скальных пород из осыпи и факторы, влияющие на интенсивность наполнения процесса черпания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анистратов К. Ю.* Анализ факторов, определяющих эффективность карьерных экскаваторов с реечным напором ПАО Уралмашзавод // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S38. — С. 70—83. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-70-83.

2. *Домбровский Н. Г.*, *Жуков П. А.*, *Аверин Н. Д.* Экскаваторы. — Свердловск: Машгиз, 1946. — 664 с.

3. *Комиссаров А. П.*, *Лагунова Ю. А.*, *Набиуллин Р. Ш.*, *Хорошавин С. А.* Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 4. — С. 156—168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.

4. *Комиссаров А. П.*, *Лагунова Ю. А.*, *Шестаков В. С.*, *Иванов И. Ю.* Энергопотребление одноковшовых экскаваторов // Горный журнал, 2018. — № 1. — С. 73—77.

5. *Шестаков В. С.*, *Хорошавин С. А.* Составление моделей для расчета рабочего оборудования карьерных экскаваторов производства ОАО «Уралмашзавод» // Горное оборудование и электромеханика. — 2013. — № 8. — С. 14—19.

6. *Подэрни Р. Ю.*, *Клементьева И. Н.*, *Ляпин Д. Г.* Особенности взаимодействия рабочего органа компактногороторного экскаватора в зоне его фрикционного контакта с породой // Уголь. — 2016. — № 12 (1089). — С. 20—23. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-12-20-22.

7. *Рубцов В. К.* Исследование дробимости горных пород взрывами на карьерах: Автореферат дис. на соискание уч. степени доктора техн. наук. — М.: МГИ, 1971. — 34 с.

8. *Константинов Л. С.* Исследование влияния кусковатости взорванной горной массы на эффективность работы экскаваторов и автотранспорта // Взрывное дело. — 1969. — № 67/24. — С. 178—186.

9. *Беляков Ю. И.*, *Владимиров В. М.* Совершенствование экскаваторных работ на карьерах. — М.: Недра, 1974. — 303 с.

10. *Анистратов Ю. И.*, *Жабин Н. И.* Рациональная степень дробления горной массы на карьерах с автомобильным транспортом // Горный журнал. — 1969. — № 1. — С. 36—38.

11. *Ташкинов А. С.*, *Сысоев А. А.*, *Такшинов И. А.* Сравнительная оценка производительности карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород // Вестник КузГТУ. — 2009. — № 4. — С. 17—20.

12. *Исайченков А. Б.*, *Опанасенко П. И.*, *Кононеков А. Б.* Исследовали влияние кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Bucyrus 495 HD // Маркшейдерия и недропользование. — 2014. — № 6. — С. 17—19.

13. *Исайченков А. Б.*, *Федотенко В. С.*, *Кононенко Е. А.* Патент на изобретение РФ № 2570797. Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации. Заявка № 2014138906. Приоритет изобретения 25.09.14., зарегистрир. В Гос. Реестре изобретений РФ 17.11.15 опубл. 10.12.2015. Бюл. № 34.

14. *Остапенко П. И.*, *Исайчеков А. Б.* Оптимизация кусковатости взорванных полускальных вскрышных пород на разрезе «Тугнуйский» // Горный журнал. — 2015. — № 9. — С. 25—35.

15. *Угольников В. К.*, *Гавришев С. Е.*, *Угольников Н. В.* Влияние гранулометрического состава горной массы на производительность экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — СВ 7. — С. 70—77.

16. *Aksenov V. V.*, *Dubinkin D. M.*, *Khoreshok A. A.*, *Markov S. O.*, *Efremenkov A. B.*, *Tyulenev M. A.* Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning // Journal of Physics Conference Series. 2021, vol. 2052, no. 1, article 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012001.

17. *Комиссаров А. П.*, *Лагунова Ю. А.*, *Лукашук О. А.*, *Плотников Н. С.*, *Саитов В. И.* Взаимодействие главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. — 2018. — № 4(52). — С. 93—97. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-4-93-97.

18. *Bender F. A.*, *Sawodny O. A.* Predictive driver model for the virtual excavator / The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2014). 2014, pp. 187—192. DOI: 10.1109/ICARCV.2014.7064302.

19. *Lee B.*, *Kim H. J.* Trajectory generation for an automated excavator / Proceedings of the 14 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014). Seoul, 2014, pp. 716—719. DOI: 10.1109/ICCAS.2014.6987872.

20. *Yu X.*, *Pang X.*, *Zou Z.*, *Zhang G.*, *Hu Y.*, *Dong J.*, *Song H.* Lightweight and high-strength design of an excavator bucket under uncertain loading // Mathematical Problems in Engineering. 2019, vol. 2019, no. 1. DOI: 10.1155/2019/3190819.

21. *Oskouei M. A.*, *Awuah-Offei K.* Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines // Mining Technology. Transactions of the Institu-

tions of Mining and Metallurgy: Section A. 2014, vol. 123, no. 4, pp. 175–182. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000067.

22. *Дмитриев В. Т.*, *Тимухин С. А.*, *Симисинов Д. И. Карякин А. Л.* Анализ энергетических показателей шахтных подъемных установок // Горный журнал. — 2017. — № 8. — С. 70—72. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.13. ГИАБ

REFERENCES

1. Anistratov K.Yu. Analysis of the factors determining the efficiency of career excavators with latest press PAO Uralmashzavod. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S38, pp. 70—83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-70-83.

2. Dombrovskiy N. G., Zhukov P. A., Averin N. D. *Ekskavatory* [Excavators], Sverdlovsk, Mashgiz, 1946, 664 p.

3. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. Sh., Khoroshavin S. A. Digital model of shovel work process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 156—168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.

4. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Shestakov V. S., Ivanov I. Yu. Energy consumption of single-bucket excavators. *Gornyi Zhurnal*, 2018, no. 1, pp. 73—77. [In Russ].

5. Shestakov V. S., Horoshavin S. A. Establishment of models for calculation of working equipment mining excavators of the production OJSC «Uralmashzavod». *Mining Equipment and Electromechanics*. 2013, no. 8, pp. 14—19. [In Russ].

6. Poderni R.Yu., Klementyeva I. N., Lyapin D. G. Specific features of interaction of a working organ of a compact bucket wheel excavatorwith rock in a zone of their frictional contact. *Ugol'*. 2016, no. 12 (1089), pp. 20—23. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-12-20-22.

7. Rubtsov V. K. *Issledovanie drobimosti gornykh porod vzryvami na kar'erakh* [Investigation of rock fragmentation by explosions in quarries], Doctor's thesis, Moscow, MGI, 1971, 34 p.

8. Konstantinov L. S. Investigation of the effect of lumpiness of the exploded rock mass on the efficiency of excavators and vehicles. *Explosion technology*. 1969, no. 67/24, pp. 178—186. [In Russ].

9. Belyakov Yu. I., Vladimirov V. M. *Sovershenstvovanie ekskavatornykh rabot na kar'erakh* [Improvement of the escalator work in quarries], Moscow, Nedra, 1974, 303 p.

10. Anistratov Yu. I., Zhabin N. I. Rational degree of crushing of rock mass in quarries with road transport. *Gornyi Zhurnal*. 1969, no. 1, pp. 36—38. [In Russ].

11. Tashkinov A. S., Sysoev A. A., Takshinov I. A. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2009, no. 4, pp. 17—20. [In Russ].

12. Isaichenkov A. B., Opanasenko P. I., Kononekov A. B. Investigated the effect of lumpiness of blasted rocks on the performance of Bucyrus 495 HD excavator. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2014, no. 6, pp. 17—19. [In Russ].

13. Isaychenkov A. B., Fedotenko V. S., Kononenko E. A. *Patent RU 2570797*, 10.12.2015. [In Russ].

14. Ostapenko P. I., Isaichekov A. B. Optimization of lumpiness of blasted semi-horizontal overburden rocks at the Tugnuysky section. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 9, pp. 25—35. [In Russ].

15. Ugolnikov V. K., Gavrishev S. E., Ugolnikov N. V. The influence of the granulometric composition of rock mass on the productivity of excavators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, special edition 7, pp. 70—77. [In Russ].

16. Aksenov V. V., Dubinkin D. M., Khoreshok A. A., Markov S. O., Efremenkov A. B., Tyulenev M. A. Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning. *Journal of Physics Conference Series*. 2021, vol. 2052, no. 1, article 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012001.

17. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Lukashuk O. A., Plotnikov N. S., Saitov V. I.Interaction of the main mechanisms of a quarry excavator during excavation of rocks. *News of the Ural State Mining University*. 2018, no. 4(52), pp. 93—97. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-4-93-97.

18. Bender F. A., Sawodny O. A. Predictive Driver Model for the Virtual Excavator. *The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2014)*. 2014, pp. 187—192. DOI: 10.1109/ICARCV.2014.7064302.

19. Lee B., Kim H. J. Trajectory generation for an automated excavator. *Proceedings of the 14 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*. Seoul, 2014, pp. 716—719. DOI: 10.1109/ICCAS.2014.6987872.

20. Yu X., Pang X., Zou Z., Zhang G., Hu Y., Dong J., Song H. Lightweight and high-strength design of an excavator bucket under uncertain loading. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019, vol. 2019, no. 1. DOI: 10.1155/2019/3190819.

21. Oskouei M. A., Awuah-Offei K. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines. *Mining Technology. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2014, vol. 123, no. 4, pp. 175–182. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000067.

22. Dmitriev V. T., Timukhin S. A., Simisinov D. I., Karyakin A. L. Analysis of energy indicators of mine lifting installations. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 8, pp. 70—72. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антропов Леонид Александрович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: antropov.l@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4436-4573,
Девяткин Юрий Алексеевич — канд. техн. наук,
инженер, ПАО «Уралмашзавод»,
ORCID ID: 0000-0001-5263-9349,
Петровых Любовь Вячеславовна[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: lyubov.petrovyh@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4074-2063,
[1] Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Антропов Л.А., e-mail: antropov.l@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.A. Antropov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: antropov.l@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4436-4573,
Yu.A. Devyatkin, Assistant Professor, Engineer,
AO «Uralmashzavod», 620012, Ekaterinburg, Russia,
L.V. Petrovykh[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: lyubov.petrovyh@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4074-2063,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: L.A. Antropov, e-mail: antropov.l@yandex.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 01.10.2022; принята к печати 10.10.2022.
Received by the editors 16.06.2022; received after the review 01.10.2022; accepted for printing 10.10.2022.