

## ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСКАВАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

А.П. Комиссаров<sup>1</sup>, Ю.А. Лагунова<sup>1</sup>, Р.Ш. Набиуллин<sup>1</sup>, С.А. Хорошавин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия,  
e-mail: horoshavin.s3@gmail.com

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы повышения эффективности работы карьерных экскаваторов, оборудованных прямой лопатой, касающиеся координации функционирования главных механизмов в процессе экскавации горных пород. Показано, что особенностью структуры приводов главных механизмов (подъемного и напорного) является наличие кинематической связи между валами двигателей, так как звенья главных механизмов и элементы рабочего оборудования (рукоять, головной блок стрелы, ковш и подвеска ковша) образуют единую кинематическую цепь. Кинематическая цепь входит в состав общего передаточного механизма приводов главных механизмов, включающего главные механизмы и рычажный механизм. Установлено, что обобщенные координаты рычажного механизма (координаты вершины режущей кромки ковша) определяют положения всех подвижных звеньев как главных механизмов, так и рычажного механизма, а также валов двигателей. Выполнен кинематический и силовой анализ рычажного механизма. Построена математическая модель процесса экскавации, основанная на определении положения ковша (вершины режущей кромки) в рабочей зоне карьерного экскаватора. На основе вычислительного эксперимента разработана цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора. Результаты работы могут быть использованы при создании системы автоматического управления приводами главных механизмов как в процессе экскавации горных пород, так и при выполнении транспортных операций экскаваторного цикла.

**Ключевые слова:** карьерный экскаватор, рабочее оборудование, приводы главных механизмов, процесс экскавации, рычажный механизм, общий передаточный механизм, математическая модель, цифровая модель.

**Для цитирования:** 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.

### Digital model of shovel work process

A.P. Komissarov<sup>1</sup>, Yu.A. Lagunova<sup>1</sup>, R.Sh. Nabiullin<sup>1</sup>, S.A. Khoroshavin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia,  
e-mail: horoshavin.s3@gmail.com

---

**Abstract:** The discussion focuses on improving efficiency of front-acting shovels by means of coordination of functions of main propelling machinery during excavation. The feature of the main propelling machinery (hoisting and crowding gears) is the kinematic connection between their shafts as the members of the mechanisms and components of the shovel equipment (lever, boom point sheave, bucket and ladle hanger) generate an integrated kinematic chain. The kinematic chain is included in the transversing gear of the main propelling machinery together with the leverage mechanism. The joint coordinates of the leverage mechanism (coordinates of the top cutting edge of the bucket) define position of all movable members of the main propelling machinery, leverage mechanism and gearing shafts. The kinematics and forces of the leverage mechanism are analyzed. The constructed mathematical model of the excavation process determines the bucket position (upper cutting edge) in the work zone of the shovel. Based on the computational experiment, the digital model of excavation by shovels is developed. The studies can be used to create an automated control for the main propelling machinery both during actual excavation of rocks and when performing haulage operations in the shoveling cycle.

**Key words:** shovel, implement, main propelling machinery, excavation process, leverage mechanism, main transversing gear, mathematical model, digital model

**For citation:** Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. Sh., Khoroshavin S. A. Digital model of shovel work process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(4):156-168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_156.

---

## Введение

Опыт эксплуатации карьерных экскаваторов показывает ее невысокий уровень эффективности, что обусловлено, прежде всего, противодействием главных механизмов [1], т.е. различием направлений векторов скоростей рабочих движений, а именно, вектор скорости (и усилия) подъема направлены в основном в сторону экскаватора (подъемной лебедки), а вектор скорости (и усилия) напора — в сторону обрабатываемого забоя.

Обзор публикаций по карьерным экскаваторам [2–7] показал, что вопросам формирования основных параметров главных механизмов и повышения эффективности функционирования карьерных экскаваторов уделяется недостаточно внимания [1, 8–11]. Разрабатываемые системы управления рабочим процессом основываются на абстрактных моделях — нечеткой логике, мультиагент-

ном подходе, модели динамики карьерного экскаватора [12–14].

## Цель работы

Целью исследования является повышение эффективности функционирования карьерного экскаватора за счет создания цифровой модели процесса экскавации рабочим оборудованием карьерного экскаватора.

## Методы исследования

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

## Задачи, решаемые в работе:

- анализ общего передаточного механизма приводов главных механизмов;
- определение кинематических и динамических передаточных функций рычажного механизма;
- разработка цифровой имитационной модели процесса экскавации рабо-

чим оборудованием карьерного экскаватора.

### Решение задачи исследования

Процесс экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора заключается в перемещении ковша от подошвы уступа до верхней части обрабатываемого экскаваторного забоя с одновременным отделением (срезом) слоя породы, толщина которого определяется из условия заполнения ковша, в условиях изменяющейся технологической обстановки (подвигание забоя, наличие негабаритов и др.) при синхронном управлении главными механизмами (подъемным и напорным) и непрерывном контроле положения ковша в забое [15, 16].

Перемещение ковша осуществляется при совместной работе двигателей главных механизмов. При этом главные механизмы и элементы рабочего оборудования, соединяющие главные механизмы с ковшом, образуют кинематическую цепь, связывающую двигатели главных механизмов. Особенностью структуры приводов главных механизмов (подъемного и напорного) является наличие

кинематической связи между валами двигателей, так как звенья главных механизмов и элементы рабочего оборудования (рукоять, головной блок стрелы, ковш и подвеска ковша) образуют единую кинематическую цепь.

Наличие кинематической связи между двигателями обуславливает определенные соотношения между угловыми скоростями валов двигателей и, соответственно, между скоростями рабочих движений (подъема и напора). При произвольном соотношении между скоростями рабочих движений (при ручном управлении процессом экскавации) возникают, как показывает практика эксплуатации и результаты испытаний [17, 18] карьерных экскаваторов, резкие колебания как скоростей рабочих движений, так и скорости копания, а также усилия подъема и напора (рис. 1 и 2).

Выполнен структурный и кинематический анализ участка кинематической цепи, состоящего из элементов рабочего оборудования.

Рассматриваемый участок кинематической цепи включает следующие звенья:

- звено «рукоять-ковш»: ковш жестко закреплен на рукояти;

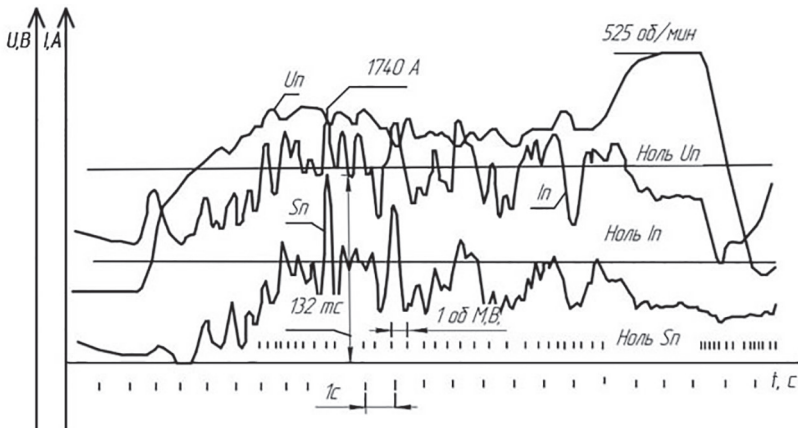


Рис. 1. Изменение скорости и усилия подъема при ручном управлении процессом экскавации:  $S_n$  — усилие подъема в канатах;  $U_n$  — скорость подъема;  $I_n$  — ток двигателя подъема

Fig. 1. Change in hoisting velocity and height in manual control of excavation process:  $S_n$  — hoisting force in cables;  $U_n$  — hoisting velocity;  $I_n$  — hoisting gear current

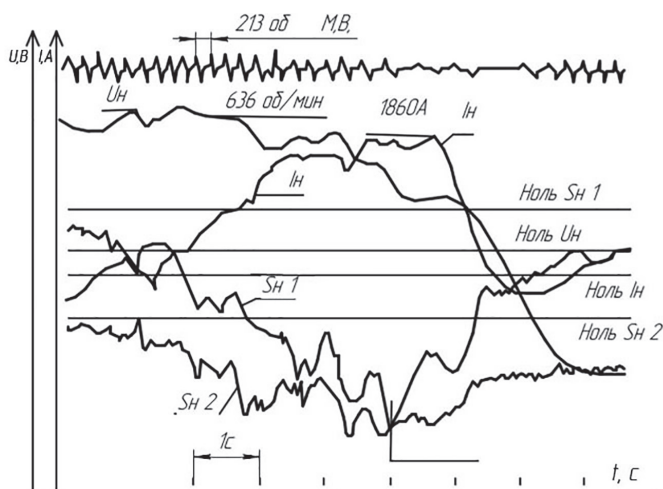


Рис. 2. Изменение скорости и усилия напора при ручном управлении процессом экскавации:  $S_{н1}$  — напорное усилие в левой балке рукояти;  $S_{н2}$  — напорное усилие в правой балке рукояти;  $U_n$  — скорость напора;  $I_n$  — ток двигателя напора

Fig. 2. Change in crowding velocity and force in manual control of excavation process:  $S_{c1}$  — crowding force in left-hand lever beam;  $S_{c2}$  — crowding force in right-hand lever beam;  $U_c$  — crowding velocity;  $I_c$  — crowding gear current

- звено «подвеска ковша и подъемный канат» (моделируются в виде стержня);

- головной блок стрелы.

Звенья связаны между собой и двуногой стойкой в кинематические пары:

- посредством седлового подшипника звено «рукоять-ковш» и двуногая стойка образуют поступательную и вращательную двухподвижную пару;

- звено «подвеска ковша и подъемный канат» с ковшом образуют вращательную пару (шарнир);

- гибкое звено (канат) и головные блоки стрелы образуют кинематическую пару, по отношению к скорости эквивалентную шарниру, который в данном случае принимаем мгновенным. Однако, с учетом последнего, по отношению к ускорениям и перемещениям эквивалентности не образуются.

Участок кинематической цепи, рассматриваемый в работе, включает в себя три подвижных звена, образуя вместе с двуногой стойкой четырехзвенный рычажный механизм (рис. 3).

Как следствие, во время экскавации породы рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора образует общий передаточный механизм приводов при совместном действии приводов главных механизмов, который состоит из подъемного и зубчатого механизма и рычажного механизма, соединяющего главные механизмы с ковшом.

Число степеней подвижности рычажного механизма составляет

$$S = 3n - 2p5 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 1 = 2,$$

где  $n = 3$  — число подвижных звеньев;  $p5 = 3$  — число кинематических пар V класса (одноподвижных);  $p4 = 1$  — число кинематических пар IV класса (двухподвижных).

Число степеней подвижности равно числу обобщенных координат механизма при условии, что связи в механизме голономные. Обобщенные координаты должны приписываться начальному звену в механизме с двумя обобщенными координатами, если это звено образует с двуногой стойкой двухподвижную кинематическую пару. Как содействие, зве-

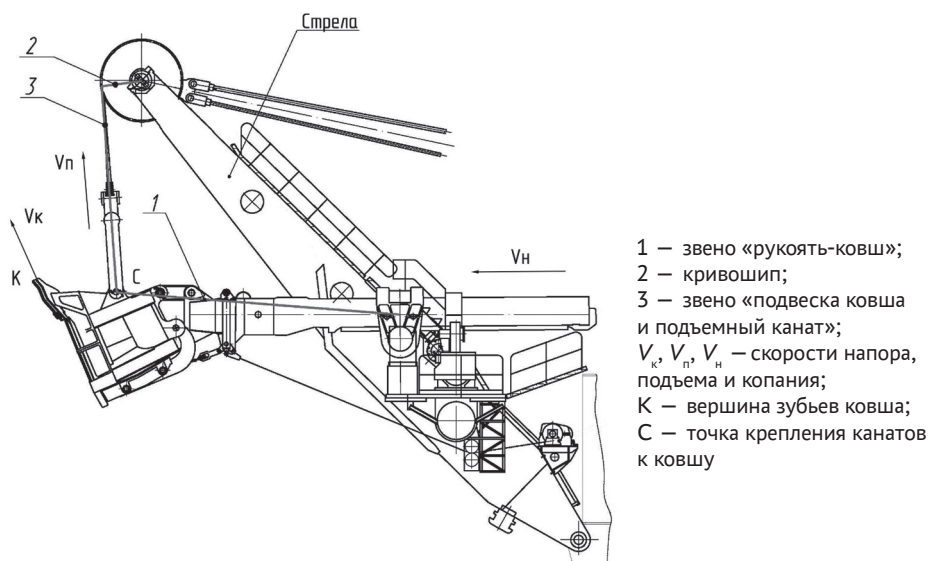


Рис. 3. Схема рычажного механизма  
 Fig. 3. Leverage mechanism layout

но «рукоять-ковш» является начальным звеном рычажного механизма, и ему приписываются обобщенные координаты механизма. Положение звена «рукоять-ковш» определяет положение всех звеньев рычажного механизма и главных механизмов, звенья которых образуют кинематические связи со звеньями рычажного механизма. Координаты вершины режущей кромки ковша (зубьев) точки К ( $X_k$  и  $Y_k$ , рис. 3), определяющие положение звена «рукоять-ковш», принимаем за обобщенные координаты рычажного механизма.

Следовательно, звено «рукоять-ковш» является ведущим звеном общего передаточного механизма приводов главных механизмов и в процессе экскавации происходит «обратимость» главных механизмов, т.е. выходные звенья главных механизмов, совершающие движения, для выполнения которых предназначены главные механизмы, становятся ведомыми.

Кинематические и динамические свойства рычажного механизма определяются кинематическими и динами-

ческими передаточными функциями [19], т.е. передаточными отношениями между основными параметрами (скоростями и усилиями), реализуемыми на ведущем звене (звене «рукоять-ковш») и ведомых звеньях главных механизмов (подъемной лебедке и кремальберной шестерне), значения которых определяются координатами вершины режущей кромки ковша, т.е. положением звена «рукоять-ковш».

В результате кинематического и силового анализа рычажного механизма были получены выражения для передаточных функций.

В общем виде кинематические и динамические функции рычажного механизма (относительные значения скоростей и усилий подъема и напора) составят:

$$\begin{aligned} \text{КПФП} &= \\ &= \frac{F_{\Pi i}}{F_k} = f_2(X_{Ki}, Y_{Ki}, \psi, l_n, l_i, \Phi_i, V_{Hi}); \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{КПФН} &= \\ &= \frac{V_{Hi}}{V_k} = f_1(X_{Ki}, Y_{Ki}, \psi, l_n, l_i, \Phi_i); \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ДПФП} &= \\ &= \frac{F_{\text{П}i}}{F_{\text{К}}} = f_3(X_{\text{К}i}, Y_{\text{К}i}, \psi, l_n, l_i, \varphi_i, G_n, G_{\text{ГМ}}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ДПФН} &= \\ &= \frac{F_{\text{Н}i}}{V_{\text{К}}} = f_4(X_{\text{К}i}, Y_{\text{К}i}, \psi, l_n, l_i, \varphi_i, G_n, G_{\text{ГМ}}, F_{\text{П}i}) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $V_{\text{К}}$ ,  $V_{\text{н}i}$ ,  $V_{\text{п}i}$  — скорость копания и текущие значения скоростей напора и подъема;  $F_{\text{К}}$ ,  $F_{\text{н}i}$ ,  $F_{\text{п}i}$  — сила сопротивления породы копанию и текущие значения усилий подъема и напора;  $X_{\text{К}i}$ ,  $Y_{\text{К}i}$  — текущее значение координат вершины режущей кромки ковша (точки К);  $\psi$  — угол наклона траектории перемещения ковша;  $l_n$ ,  $l_i$  — постоянные и текущие значения (вылет рукоятки, длина подъемного канала) геометрических размеров звеньев;  $\varphi_i$  — текущее значение угловых расстояний между звеньями;  $G_n$  — силы тяжести звеньев;  $G_{\text{ГМ}}$  — сила тяжести горной массы в ковше.

На рис. 4 приведены графики кинематических передаточных функций рычажного механизма (относительные значения скоростей подъема и напора) при перемещении ковша по эквидистантным траекториям (радиус копания на уровне стояния экскаватора изменяется от минимального до максимального значений).

На основе кинематических и динамических передаточных функций рычажного механизма получены аналитические зависимости для определения необходимых соотношений скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша по заданной траектории при отработке экскаваторного забоя, а также выполнена оценка распределения потребляемой мощности между приводами главных механизмов.

В качестве метода исследования закономерностей формирования кинематических и энергетических характеристик процесса экскавации горных пород

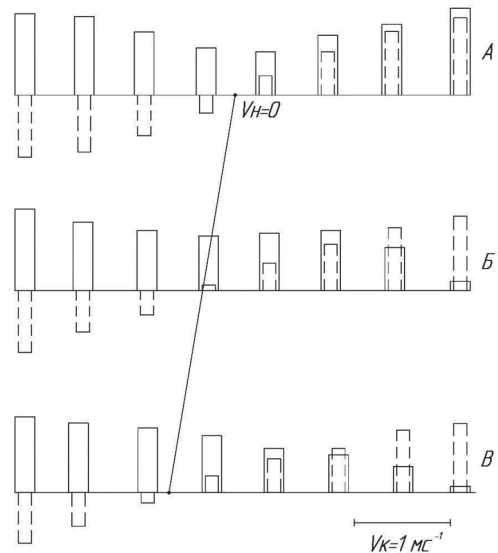


Рис. 4. Диаграмма скоростей подъема и напора при перемещении ковша по эквидистантным траекториям: А (начальной), Б (средней), В (конечной). Радиусы копания на высоте стояния экскаватора составляют:  $RA = 9$  м;  $RB = 13,5$  м,  $RC = 18$  м, высота уступа  $H = 18$  м

Fig. 4. Diagram of hoisting and crowding velocities in movement of bucket along equi-distant trajectories: A (initial), B (medium), C (final). Digging radius at shovel stand height:  $RA = 9$  m;  $RB = 13.5$  m,  $RC = 18$  m, bench height  $H = 18$  m

принят вычислительный эксперимент. Проведение эксперимента на основе математической модели процесса экскавации тождественно нахождению значений выходных характеристик при заданных значениях исходных данных.

Выполнен вычислительный эксперимент по определению основных параметров главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод» в процессе экскавации горных пород при заданных значениях скорости копания и усилия, реализуемого на режущей кромке ковша.

В табл. 1–7 приведены исходные данные и результаты вычислительного эксперимента.

Результаты расчетов приведены в табл. 2–7.

Таблица 1

**Исходные данные для расчета**  
**Computation inputs**

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Значение
1	2	3	4
1. Вместимость ковша	м <sup>3</sup>	$E_k$	20
2. Плотность породы	т/м <sup>3</sup>	$\rho$	2,5
3. Сила тяжести ковша (груженого)	кН	$G_k$	400 (700)
4. Координаты оси пяты стрелы	м	$X_{T0}$	3,3
	м	$Y_{T0}$	5,2
5. Координаты оси напорного вала	м	$X_{O1}$	9
	м	$Y_{O1}$	12
6. Координаты оси головных блоков	м	$X_{O2}$	16
	м	$Y_{O2}$	17,9
7. Радиус головного блока	м	$R$	1,28
8. Радиус кремальерной шестерни	м	$0_1 A$	0,7
9. Длина рукояти	м	$L_p$	12
10. Сила тяжести рукояти	кН	$G_p$	300
11. Угол наклона траектории к горизонту	град	$\psi$	60
12. Координаты точки К (вершины режущей кромки ковша)	м	$X_k$	
	м	$Y_k$	
13. Скорость вершины режущей кромки ковша (скорость копания)	м/с	$V_k$	1
14. Касательная составляющая силы сопротивления копания при высоте уступа 12 м и 17 м	кН	$P_{o1}$	325(230)
15. Коэффициент нормальной составляющей силы сопротивления копания		$k$	0,1

Таблица 2

**Радиус копания на уровне стояния экскаватора RK.**

**УС = 9 м, высота уступа H = 12 м, угол откоса уступа  $\alpha = 60^\circ$**

**Digging radius at shovel stand height RD.**

**УС = 9 м, bench height H = 12 м, bench slope angle  $\alpha = 60^\circ$**

Координаты точки К		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести ковша с породой, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность подъема, кВт	Мощность напора, кВт	Суммарная мощность, кВт
x, м	y, м								
9	0	0,95	-0,87	400	437	-581	415	504	919
10,15	2	0,91	-0,81	450	509	-577	465	465	930
11,3	4	0,84	-0,70	500	574	-588	481	410	891
12,45	6	0,70	-0,51	550	692	-581	481	294	775
13,6	8	0,52	-0,19	600	916	-583	480	113	593
14,75	10	0,50	0,19	650	1240	-673	626	126	752
15,9	12	0,66	0,50	700	1585	-840	1039	422	1461

Таблица 3

**Радиус копания на уровне стояния экскаватора RK.**

**УС = 12 м, высота уступа H = 12 м, угол откоса уступа  $\alpha = 60^\circ$**

**Digging radius at shovel stand height RD.**

**УС = 12 м, bench height H = 12 м, bench slope angle  $\alpha = 60^\circ$**

Координаты точки K		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести ковша с породой, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность подъема, кВт	Мощность напора, кВт	Суммарная мощность, кВт
x, м	y, м								
12	0	0,90	-0,72	400	678	-341	613	246	859
13,15	2	0,85	-0,61	450	723	-351	617	214	831
14,3	4	0,78	-0,45	500	764	-358	596	160	756
15,45	6	0,70	-0,23	550	847	-333	589	75	664
16,6	8	0,65	0,04	600	951	289	614	11	625
17,75	10	0,66	0,29	650	1047	219	687	64	751
18,9	12	0,69	0,50	700	1102	89	763	45	808

Как следует из приведенных данных, основные параметры главных механизмов изменяются в широком диапазоне и определяются значениями координат вершины режущей кромки ковша точки K.

Разработана имитационная цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора, заключающаяся в цифровом воспроизведении исследуемого процесса на основе ма-

тематической модели при переборе вариантов исходных данных (уравнение траектории перемещения ковша, параметры рабочего оборудования и др.).

Приведенные в таблицах расчетные значения скоростей и усилий подъема и напора, обеспечивающие перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданным траекториям, представляют собой фрагмент цифровой имитационной модели процесса экскавации рабо-

Таблица 4

**Радиус копания на уровне стояния экскаватора RK.**

**УС = 15 м, высота уступа H = 12 м, угол откоса уступа  $\alpha = 60^\circ$**

**Digging radius at shovel stand height RD.**

**УС = 15 м, bench height H = 12 м, bench slope angle  $\alpha = 60^\circ$**

Координаты точки K		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести ковша с породой, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность подъема, кВт	Мощность напора, кВт	Суммарная мощность, кВт
x, м	y, м								
15	0	0,85	-0,55	400	857	-121	728	67	795
16,15	2	0,80	-0,42	450	893	-114	713	48	761
17,3	4	0,74	-0,24	500	930	-89	690	22	712
18,45	6	0,69	-0,04	550	974	-32	670	1	671
19,6	8	0,64	0,16	600	1027	70	661	11	672
20,75	10	0,60	0,35	650	1083	233	646	81	727
21,9	12	0,51	0,50	700	1143	483	578	242	820



Таблица 5

**Радиус копания на уровне стояния экскаватора RK.**

**УС = 9 м, высота уступа H = 18 м, угол откоса уступа  $\alpha = 60^\circ$**

**Digging radius at shovel stand height RD.**

**УС = 9 м, bench height H = 18 м, bench slope angle  $\alpha = 60^\circ$**

Координаты точки К		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести ковша с породой, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность подъема, кВт	Мощность напора, кВт	Суммарная мощность, кВт
х, м	у, м								
9	0	0,95	-0,87	400	289	-634	275	550	825
10,15	2	0,91	-0,81	433	363	-608	331	490	821
11,3	4	0,84	-0,70	467	420	-603	352	421	773
12,45	6	0,70	-0,51	500	517	-579	359	292	651
13,6	8	0,52	-0,19	533	699	-549	366	106	472
14,75	10	0,50	0,19	567	969	584	489	110	599
15,9	12	0,66	0,50	600	1261	693	826	348	1174
17,05	14	0,80	0,70	633	1527	829	1221	578	1799
18,2	16	0,89	0,81	667	1782	987	1578	795	2373
19,35	18	0,93	0,87	700	2094	1212	1951	1052	3003

Таблица 6

**Радиус копания на уровне стояния экскаватора RK.**

**УС = 12 м, высота уступа H = 18 м, угол откоса уступа  $\alpha = 60^\circ$**

**Digging radius at shovel stand height RD.**

**УС = 12 м, bench height H = 18 м, bench slope angle  $\alpha = 60^\circ$**

Координаты точки К		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести ковша с породой, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность подъема, кВт	Мощность напора, кВт	Суммарная мощность, кВт
х, м	у, м								
12	0	0,90	-0,72	400	517	-411	468	296	764
13,15	2	0,85	-0,61	433	560	-402	478	246	724
14,3	4	0,78	-0,45	467	595	-395	464	177	641
15,45	6	0,70	-0,23	500	674	-346	472	80	552
16,6	8	0,65	0,04	533	755	294	487	11	498
17,75	10	0,66	0,29	567	838	217	550	64	614
18,9	12	0,69	0,50	600	886	95	613	48	661
20,05	14	0,68	0,65	633	896	115	608	74	682
21,2	16	0,49	0,75	667	890	497	433	371	804
22,35	18	0	0,81	700	1029	1114	3	904	907

Таблица 7

**Радиус копания на уровне стояния экскаватора РК.**

**УС = 15 м, высота уступа H = 18 м, угол откоса уступа  $\alpha = 60^\circ$**

**Digging radius at shovel stand height RD.**

**US = 15 m, bench height H = 18 m, bench slope angle  $\alpha = 60^\circ$**

Координаты точки K		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести ковша с породой, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность подъема, кВт	Мощность напора, кВт	Суммарная мощность, кВт
x, м	y, м								
15	0	0,85	-0,55	400	690	-207	586	119	700
16,15	2	0,80	-0,42	433	722	-187	577	78	655
17,3	4	0,74	-0,24	467	754	-152	559	37	596
18,45	6	0,69	-0,04	500	791	-91	544	4	548
19,6	8	0,64	0,16	533	835	9	538	1	539
20,75	10	0,60	0,35	567	885	156	528	54	582
21,9	12	0,51	0,50	600	937	372	474	186	660
23,05	14	0,32	0,62	633	1013	685	327	423	750
24,2	16	0,04	0,70	667	1181	1126	43	793	836
*25,35	18	-0,27	0,77	700	1522	1718	407	1320	1727

\* не реализуется положение ковша

чим оборудования карьерного экскаватора при отработке конкретного забоя.

Результаты работы могут быть использованы при разработке системы интеллектуального управления двигателями главных механизмов, обеспечивающей координацию рабочих движений и перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории с постоянной скоростью копания.

### Заключение

В работе представлена методика расчета скоростей подъема и напора главных механизмов карьерных экскаваторов посредством вычислительного эксперимента, позволяющая определить значения скоростей рабочих движений по всем траекториям копания экскаватора.

Посредством вычислительного эксперимента были установлены взаимосвязи между скоростью подъема и напора в процессе эксплуатации карьерного экска-

ватора. Результаты эксперимента могут служить базой для разработки адаптивной системы управления рабочим процессом, которая обеспечивает за счет согласования скоростей рабочих движений в конкретных условиях эксплуатации повышение эффективности экскавации породы.

### Вклад авторов

Комиссаров А.П. — генерация идеи исследования, анализ результатов исследования и подготовка данных.

Лагунова Ю.А. — постановка задачи исследования, анализ результатов исследования.

Набиуллин Р.Ш. — выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов исследования и подготовка данных.

Хорошавин С.А. — получение данных для анализа, анализ результатов исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подэрни Р. Ю., Булес П. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой // Горный журнал. — 2015. — № 1. — С. 55–61.
2. Комиссаров А. П., Летнев К. Ю., Лукашук О. А. Анализ двухкривошипно-рычажных механизмов рабочего оборудования карьерных экскаваторов / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека». — Екатеринбург: УГГУ, 2017. — С. 41–46.
3. Корюков А. А., Анистратов К. Ю. Геометрическая модель рабочего оборудования карьерного экскаватора для расчета нагрузок электропривода и контроля положения ковша // Известия вузов. Горный журнал. — 2013. — № 3. — С. 106–113.
4. Кузнецов А. Л., Анистратов К. Ю. Карьерные экскаваторы ПАО «Уралмашзавод» — настоящее и будущее российской горнодобывающей промышленности // Уголь. — 2016. — № 8. — С. 77–81.
5. Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. и др. Горные машины. Энциклопедия. Т. IV-24. — М.: Машиностроение, 2011. — 493 с.
6. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов // Автоматизация в промышленности. — 2013. — № 10. — С. 33–37.
7. Певзнер Л. Д. Автоматизированное управление мощными одноковшовыми экскаваторами. — М.: Горное дело, 2014.
8. Zhang L., Zhao J, Long P, Wang L, Qian L, Lu F, Song X, Manocha D. An autonomous excavator system for material loading tasks // Science Robotics. 2021, vol. 55, no. 6, pp. 8474–8481.
9. Yang Y., Long P., Song X., Pan J., Zhang L. Optimization-based framework for excavation trajectory generation // IEEE Robotics and Automation Letters. 2021, vol. 2, no. 6, pp. 1479–1486.
10. Бабаков С. Е., Певзнер Л. Д. Алгоритмизация управления движением ковша экскаватора в режиме черпания с применением нечеткой логики // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 9. — С. 8–17.
11. Дружинин А. В. Повышение качества управления одноковшовыми экскаваторами на основе мультиагентного подхода // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 11–12.
12. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Управление операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты с применением нечеткой логики // Уголь. — 2012. — № 8. — С. 64–65.
13. Певзнер Л. Д., С. Е. Бабаков. Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 12. — С. 249–252.
14. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Алгоритм управления операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты с применением нечеткой логики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 1. — С. 263–271.
15. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator // International Journal of Intelligent Robotics and Applications. 2021, vol. 1, no. 5.
16. Ramezani M., Tafazoli S. Using Artificial Intelligence In Mining Excavators: Automating routine operational decisions // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2021, vol. 1, no. 15, pp. 6–11. DOI: 10.1109/MIE.2020.2964053.
17. Sotiropoulos F. E., Asada H. H. Dynamic modeling of bucket-soil interactions using Koopman-DFL lifting linearization for model predictive contouring control of autonomous excavators // IEEE Robotics and Automation Letters. 2022, vol. 1, no. 7, pp. 151–158.
18. Рехтман А. П., Крагель А. А. Комплексные испытания экскаватора ЭКГ-12 // Механизация строительства. — 2001. — № 1. — С. 24–26.

19. Самолазов А. В., Донченко Т. В., Шибанов Д. А. Практические результаты внедрения экскаваторов ЭКГ-18Р и ЭКГ-32Р производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П.Г. Коробкова» на угледобывающих предприятиях России // Уголь. — 2013. — № 4. — С. 36 — 38. **МИАБ**

## REFERENCES

1. Poderni R. Yu., Bules P. Comparative analysis of hydraulic and mechanical straight shovel excavators. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 1, pp. 55 — 61. [In Russ].

2. Komissarov A. P., Letnev K. Yu., Lukashuk O. A. Analysis of double-crank-lever mechanisms of the working equipment of mining excavators. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Chteniya pamyati V.R. Kubacheka»* [Technological equipment for the mining and oil and gas industry. Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Readings in memory of V.R. Kubachek»], Ekaterinburg, UGGU, 2017, pp. 41 — 46. [In Russ].

3. Koryukov A. A. Geometric model of the working equipment of a quarry excavator for calculating the loads of the electric drive and controlling the position of the bucket. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2013, no. 3, pp. 106 — 113. [In Russ].

4. Kuznetsov A. L., Anistratov K. Yu. Mining excavators of PJSC Uralsmashzavod — the present and future of the Russian mining industry. *Ugol'*. 2016, no. 8, pp. 77 — 81. [In Russ].

5. Lagunova Yu. A., Komissarov A. P., Shestakov V. S., etc. *Gornye mashiny. Entsiklopediya*. T. IV-24 [Mining machines. Encyclopedia. Vol. IV-24], Moscow, Mashinostroenie, 2011, 493 p.

6. Malafeev S. I., Tikhonov Yu. V. Intelligent control components for open pit excavators. *Automation in industry*. 2013, no. 10, pp. 33 — 37. [In Russ].

7. Pevzner L. D. *Avtomatizirovannoe upravlenie moshchnymi odnokovshovymi ekskavatorami* [Automated control of powerful single-bucket excavators], Moscow, Gornoe delo, 2014.

8. Zhang L., Zhao J, Long P, Wang L, Qian L, Lu F, Song X, Manocha D. An autonomous excavator system for material loading tasks. *Science Robotics*. 2021, vol. 55, no. 6, pp. 8474 — 8481.

9. Yang Y., Long P., Song X., Pan J., Zhang L. Optimization-based framework for excavation trajectory generation. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021, vol. 2, no. 6, pp. 1479 — 1486.

10. Babakov S. E., Pevzner L. D. Algorithmization of excavator bucket motion control in scooping mode using fuzzy logic. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2012, no. 9, pp. 8 — 17. [In Russ].

11. Druzhinin A. V. Improving the quality of control of single-bucket excavators based on a multi-agent approach. *Novye ognepory*. 2016, no. 3, pp. 11 — 12. [In Russ].

12. Pevzner L. D., Babakov S. E. Management of the scooping operation of a mining shovel-shovel using fuzzy logic. *Ugol'*. 2012, no. 8, pp. 64 — 65. [In Russ].

13. Pevzner L. D., Babakov S. E. Mathematical model of the dynamics of a mining excavator as a control object. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 12, pp. 249 — 252. [In Russ].

14. Pevzner L. D., Babakov S. E. Algorithm for controlling the scooping operation of a quarry shovel excavator using fuzzy logic. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 1, pp. 263 — 271. [In Russ].

15. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2021, vol. 1, no. 5.

16. Ramezani M., Tafazoli S. Using Artificial Intelligence In Mining Excavators: Automating routine operational decisions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021, vol. 1, no. 15, pp. 6 — 11. DOI: 10.1109/MIE.2020.2964053.

17. Sotiropoulos F. E., Asada H. H. Dynamic modeling of bucket-soil interactions using Koopman-DFL lifting linearization for model predictive contouring control of autonomous excavators. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022, vol. 1, no. 7, pp. 151–158.

18. Rekhman A. P., Kragel A. A. Complex tests of the EKG-12 excavator. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2001, no. 1, pp. 24–26. [In Russ].

19. Samolazov A. V., Donchenko T. V., Shibanov D. A. Practical results of the introduction of excavators EKG-18R and EKG-32R manufactured by «IZ-KARTEKS im. P.G. Korobkov» at the coal mining enterprises of Russia. *Ugol'*. 2013, no. 4, pp. 36–38. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Комиссаров Анатолий Павлович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: Anatoliy.Komissarov@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4320-8111,

*Лагунова Юлия Андреевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: yu.lagunova@mail.ru, avtor ID: 178105,

ORCID ID: 0000-0000-2440-4121,

*Набиуллин Рустем Шафкатович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, e-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7519-2156,

*Хорошавин Сергей Александрович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, e-mail: horoshavin.s3@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6895-9256,

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет.

**Для контактов:** Хорошавин С.А., e-mail: horoshavin.s3@gmail.com.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.P. Komissarov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: Anatoliy.Komissarov@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4320-8111,

*Yu.A. Lagunova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: yu.lagunova@mail.ru, avtor ID: 178105,

ORCID ID: 0000-0000-2440-4121,

*R.Sh. Nabiullin*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: nabiullin.r@m.ursmu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7519-2156,

*S.A. Khoroshavin*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: horoshavin.s3@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-6895-9256,

<sup>1</sup> Ural State Mining University,

620144, Ekaterinburg, Russia.

**Corresponding author:** S.A. Khoroshavin, e-mail: horoshavin.s3@gmail.com.

Получена редакцией 29.01.2022; получена после рецензии 10.02.2022; принята к печати 10.03.2022.

Received by the editors 29.01.2022; received after the review 10.02.2022; accepted for printing 10.03.2022.

