УДК 622.232 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-94-102

Определение режимных параметров рычажного механизма карьерного экскаватора

Лукашук О. А.[1]*, Летнев К. Ю.[1]
[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: oldim96@mail.ru

Реферат

Введение. *Для повышения эффективности процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора в аспекте определения рациональных режимов работы главных механизмов (механизмов подъема и напора) карьерного экскаватора при ведении процесса экскавации требуется установление законов движения главных механизмов.*

Целью исследования *является установление кинематических и динамических характеристик процесса экскавации за счет выявления закономерностей изменения режимных параметров главных механизмов.*

Методы исследования. *Математическое моделирование и вычислительный эксперимент при использовании методов теории машин и механизмов.*

Результаты. *Получены зависимости для определения рациональных значений скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории в процессе экскавации. Разработана имитационная модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора, представляющая собой набор расчетных значений режимных параметров главных механизмов, при которых реализуется перемещение ковша по заданной траектории с заданными энергосиловыми параметрами, реализуемыми на ковше. Разработан оптимизационный алгоритм управления рабочим процессом карьерного экскаватора, обеспечивающий реализацию необходимых значений режимных параметров главных механизмов при перемещении ковша с заданной скоростью копания в пределах рабочей зоны экскаватора. Показано, что при совместном действии главных механизмов в процессе экскавации образуется кинематическая цепь, соединяющая главные механизмы с ковшом и состоящая из ведомых звеньев главных механизмов и элементов рабочего оборудования. Установлено, что режимные параметры главных механизмов формируются в соответствии с кинематическими свойствами передаточного механизма, в состав которого входит кинематическая цепь.*

Область применения. *Результаты исследования могут быть использованы при разработке системы управления приводами главных механизмов.*

Ключевые слова: *рабочее оборудование прямая лопата; процесс экскавации горных пород; главные механизмы; передаточный механизм; рациональные значения скоростей подъема и напора.*

Введение. Ведение процесса экскавации горных пород, осуществляемой при координированной работе главных механизмов (подъема и напора) по перемещению ковша с одновременным отделением слоя породы и при непрерывном изменении условий работы, затруднено и ограничивается психофизическими возможностями машиниста экскаватора [1, 2]. Как показывает практика эксплуатации карьерных экскаваторов, длительность рабочего цикла в конкретных условиях значительно превышает расчетную.

В современных условиях рыночной экономики проблема повышения эффективности использования технологических возможностей карьерных экскаваторов приобретает особую актуальность [3–6].

Основным направлением решения данной проблемы является установление законов движения главных механизмов в процессе экскавации. Известные методы определения законов движения главных механизмов основаны на формальных подходах – нечеткая логика, искусственный интеллект и др. [7–11].

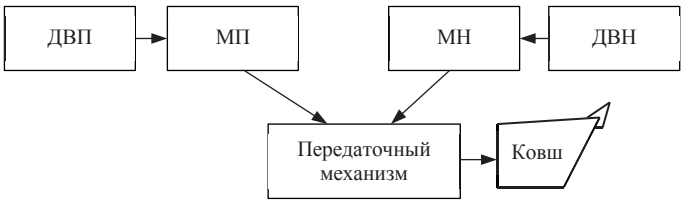

Рис. 1. Структурная схема электромеханической системы карьерного экскаватора: ДВП, ДВН – двигатели механизмов подъема (МП) и напора (МН)
Fig. 1. Block diagram of mining excavator electromechanical system: DVP and DVN are lifting and thrusting motors correspondingly

Цель и задачи исследования. Цель исследования – установление кинематических и динамических характеристик процесса экскавации за счет выявления закономерностей изменения режимных параметров (скоростей подъема и напора) главных механизмов, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

Задачи исследования состоят в следующем:

– обоснование математической модели передаточного механизма, образующегося в процессе экскавации;

– определение скоростей подъема и напора, обеспечивающих перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории.

Объектом исследования является механическая система, включающая главные механизмы (подъема и напора) и передаточный механизм.

Предмет исследования – установление функциональных зависимостей между параметрами, определяющими положение ковша (вершины режущей кромки) в забое, и режимными параметрами главных механизмов (скоростями подъема и напора).

Методы исследования – методы теории машин и механизмов, математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Выполнен структурный анализ кинематической цепи, образующейся при совместном действии горных механизмов (подъема и напора).

Кинематическая цепь состоит из ведомых звеньев главных механизмов (кремальерной шестерни механизма напора, головного блока стрелы, фрагмента подъемного каната, сбегающего с головного блока) и элементов рабочего оборудования (седлового подшипника, рукояти, ковша, жестко закрепленного на рукояти, и подвески ковша) (рис. 1).

Приняты следующие допущения:

– головной блок стрелы фактически представляет собой ведомое звено механизма подъема, так как скорость точки схода подъемного каната с головного блока равна скорости подъема, и в кинематическом отношении является кривошипом;

– подъемный канат (фрагмент) представляет собой невесомую нерастяжимую нить в виде стержня переменной длины;

– подвеска ковша, шарнирно соединенная с ковшом, образует вместе с подъемным канатом единый стержень.

В результате структурного анализа кинематической цепи установлено:

– кинематическая пара, образованная подъемным канатом и головным боком, эквивалентна по отношению к скорости вращательной паре (шарниру), которая в данном случае является мгновенной;

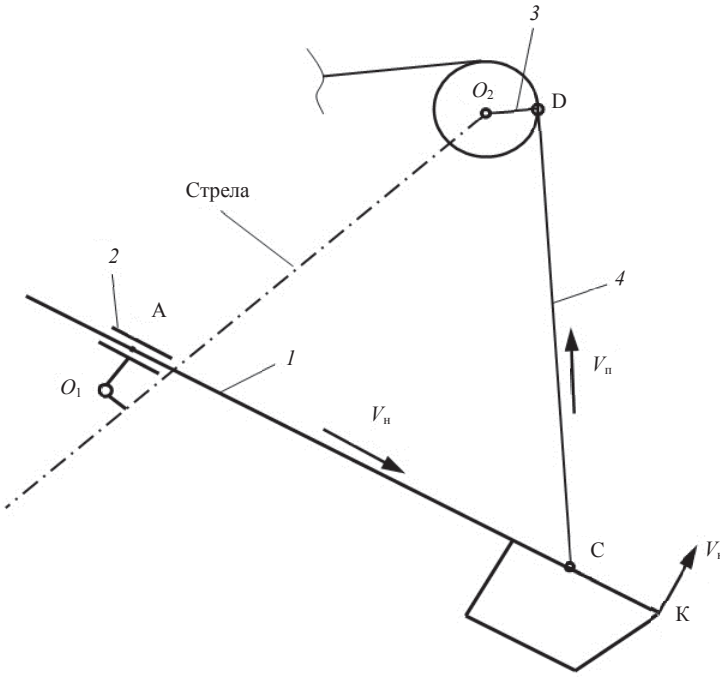

Рис. 2. Схема кинематической цепи, образующейся при совместном действии механизмов подъема и напора:
1 – звено *рукоять–ковш*; *2*, *3* – кривошип; *4* – подъемный канат; $V_к$, $V_п$, $V_н$ – скорости напора, подъема и копания
Fig. 2. The scheme of kinematic chain generated by the joint action of lifting and thrusting:
1 – *handle–bucket* unit; *2*, *3* – crack; *4* – hoist; V_t, V_l, V_d – velocities of thrusting, lifting, and digging

– звено *рукоять–ковш* образует со стойкой (стрелой) двухподвижное соединение в виде поступательной пары (*рукоять–седловой подшипник*) и вращательной пары (*седловой подшипник–стрела*);

– кинематическая цепь включает четыре подвижных звена: два кривошипа (кремальерная шестерня и головной блок), стержень (подъемный канат и подвеска ковша) и звено *рукоять–ковш*;

– кинематическая цепь образует со стойкой (стрелой) двухкривошипно-рычажный механизм.

Таким образом, в процессе экскавации образуется передаточный рычажный механизм, преобразующий движения ведомых звеньев главных механизмов в движение (перемещение) ковша [12].

Число степеней свободы (подвижности) передаточного механизма составит

$$S = 3n - 2P_5 = 2,$$

где $n = 4$ – число пар подвижных звеньев; $P_5 = 5$ – число кинематических пар пятого класса (одноподвижных).

В механизме с двумя степенями свободы (двумя обобщенными координатами) могут быть или два начальных звена, если за обобщенные координаты приняты координаты двух звеньев, или одно начальное звено, если оно образует со стойкой двухподвижную пару [13].

Таблица 1. Значения режимных параметров главных механизмов при различных углах наклона траектории перемещения ковша
Table 1. Duty parameters values for the main machinery at different tilt angles of a bucket path

Координаты вершины режущей кромки, м		Скорость подъема, м/с	Скорость напора, м/с	Сила тяжести груженого ковша, кН	Усилие подъема, кН	Усилие напора, кН	Мощность усилия подъема, кВт	Мощность усилия напора, кВт	КПД механизма
$X_к$	$Y_к$	$V_п$	$V_н$	$G_{к+п}$	$F_п$	$F_н$	$P_п$	$P_н$	η
Угол наклона траектории ψ = 70°									
14,0	0	0,91	–0,74	400	732	–295	667	218	0,37
15,5	4	0,81	–0,52	500	799	–327	646	169	0,40
17,0	8	0,68	–0,12	600	959	–300	649	35	0,48
18,5	12	0,70	0,34	700	1179	–234	829	80	0,36
Угол наклона траектории ψ = 60°									
14,0	0	0,87	–0,61	400	801	–195	696	119	0,40
16,3	4	0,76	–0,30	500	876	–183	662	56	0,45
18,6	8	0,66	0,13	600	978	–59	645	8	0,50
20,9	12	0,59	0,50	700	1093	296	640	148	0,41
Угол наклона траектории ψ = 50°									
14,0	0	0,80	–0,46	400	853	–103	681	48	0,45
17,4	4	0,66	–0,06	500	940	–20	618	1	0,53
20,8	8	0,51	0,36	600	1062	271	537	98	0,51
24,2	12	0,17	0,64	700	1285	917	221	590	0,40

За начальное звено принимается звено *рукоять–ковш* и, соответственно, при этом положения всех звеньев как передаточного механизма, так и главных механизмов определяются положением звена *рукоять–ковш*.

Таким образом, в процессе экскавации образуется общий передаточный механизм главных приводов, включающий главные механизмы и передаточный механизм (рис. 2).

За обобщенные координаты передаточного механизма принимаем координаты вершины режущей кромки ковша точки K ($X_к$ и $Y_к$) в системе координат XOY, где ось OX совпадает с уровнем стояния экскаватора, а ось OY – с осью вращения поворотной платформы.

Выполнен кинематический анализ передаточного механизма на основе графоаналитического метода путем построения планов механизма и скоростей.

Рычажные механизмы отличаются от других механизмов тем, что они обладают «индивидуальными» кинематическими свойствами, которые определяются структурной схемой механизма, видом кинематических связей между звеньями и геометрическими параметрами (длинами) звеньев.

Основной характеристикой рычажного механизма являются кинематическая и динамическая передаточные функции (передаточные отношения), определяющие зависимости между кинематическими и динамическими параметрами ведомого и ведущего звеньев [14].

Для определения скоростей рабочих движений (подъема и напора) необходимо задать законы движения начального звена, т. е. траекторию перемещения ковша (вершины режущей кромки) и скорость копания, а также размеры звеньев передаточного механизма.

Так как скорость напора меняет направление в зависимости от положения ковша в забое, то, соответственно, изменяется форма плана скоростей и вид зависимостей для определения скоростей рабочих движений.

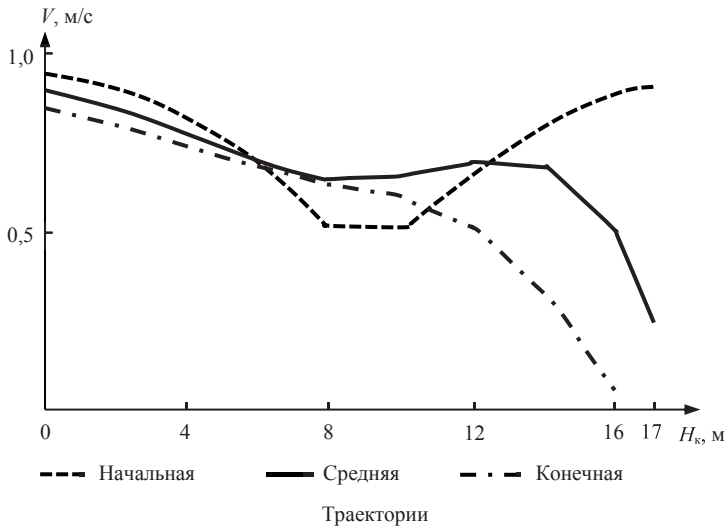

Рис. 3. Графики зависимости скорости подъема от высоты копания
Fig. 3. Hoisting velocity-digging height curve

На основе математической модели передаточного механизма получены выражения для определения скоростей рабочих движений (подъема и напора), обеспечивающих перемещение ковша по заданной траектории.

Зависимости для определения кинематических передаточных функций (соотношений между скоростями подъема $V_п$, напора $V_н$ и скоростью копания $V_к$) составят в общем виде:

$$КПФН = \frac{V_н}{V_к} = f_1\left(X_к, Y_к, l_i, \psi, \alpha_i\right);$$

$$КПФП = \frac{V_п}{V_к} = f_2\left(V_н, X_к, Y_к, l_i, \psi, \alpha_i\right),$$

где КПФН, КПФП – кинематические передаточные функции движений напора и подъема; l_i – длины звеньев; ψ – угол наклона касательной к траектории перемещения ковша в точке К; α_i – углы, определяющие положения звеньев.

В табл. 1 приведены результаты вычислительного эксперимента по расчету параметров экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод».

На рис. 3 и 4 представлены графики скоростей подъема и напора при перемещении ковша в процессе отработки забоя высотой 17 м.

Разработана имитационная модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата карьерного экскаватора, представляющая со-

бой набор расчетных значений режимных параметров главных механизмов, при которых реализуется перемещение ковша по заданной траектории с заданными энергосиловыми параметрами, реализуемыми на ковше.

Имитационная модель процесса экскавации определяет алгоритм цифрового управления, который формирует управляющее воздействие на приводы главных механизмов [15].

Разработан оптимизационный алгоритм управления рабочим процессом карьерного экскаватора, обеспечивающий реализацию необходимых значений режимных параметров главных механизмов при перемещении ковша с заданной скоростью копания в пределах рабочей зоны экскаватора.

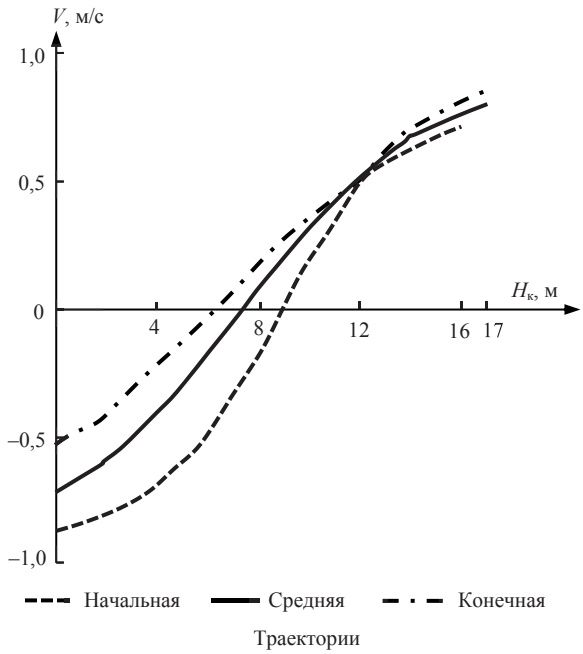

Рис. 4. Графики зависимости скорости напора от высоты копания
Fig. 4. Thrust velocity-digging height curve

Алгоритм определяет содержание и последовательность выполнения следующих операций, обеспечивающих перемещение ковша по заданной траектории:

– расчет на ЭВМ скоростей подъема и напора в начальном положении ковша, а также в последующих положениях, соответствующих перемещению ковша с заданным шагом;

– определение значений скоростей для трех положений (начального, среднего и конечного) и передача команд, пропорциональных значениям скоростей, на вход системы управления приводами главных механизмов;

– перемещение ковша в последующее положение.

Таким образом, на основе имитационной модели процесса экскавации, полученной в результате вычислительного эксперимента, можно определить для любой точки в рабочей зоне экскаватора режимные параметры главных механизмов при заданных энергосиловых параметрах, реализуемых на ковше, и при заданной траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки).

Выводы. Предложенная методика расчета режимных параметров (скоростей подъема и напора) главных механизмов карьерных экскаваторов посредством вычислительного эксперимента позволяет определить фактические значения скоростей рабочих движений в конкретных горнотехнических условиях работы (размеры забоя, вид траекторий перемещения ковша и др.).

Установление взаимозависимостей между режимными параметрами главных механизмов в процессе экскавации может служить основой для разработки адаптивной системы цифрового управления приводами главных механизмов, обеспечивающей за счет согласования скоростей рабочих движений в конкретных условиях эксплуатации повышение эффективности функционирования экскаватора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. P. 187–192.

2. Lee B., Kim H. J. Trajectory generation for an automated excavator // Proceedings of the 14th International Conference on Control, Automation and Systems (Iccas/14). Seoul. 2014. P. 716–719.

3. Jud D., Hottiger G., Leemann P., Hutter M. Planning and control for autonomous excavation // 2017 IEEE Robotics and Automation Letters, 2(4), 7962150. P. 2151–2158.

4. Bao H., Zhang R. Study on optimization of coal truck flow in open-pit mine // Advances in Civil Engineering. 2020. 8848140.

5. Malafeev S. I., Serebrennikov N. A. Improving the energy efficiency of mining excavators based on the modernization of electrical equipment and control systems // Ugol. Russian Coal Journal. 2018. No. 10. P. 30–34.

6. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the minerals industry: best practices and research directions. Springer, 2017. 333 p.

7. 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.

8. Корюков А. А. Геометрическая модель рабочего оборудования карьерного экскаватора для расчета нагрузок электропривода и контроля положения ковша // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 3. С. 106–113.

9. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Интеллектуализация карьерного экскаватора // ГИАБ. 2015. № 11. С. 107–115.

10. Певзнер Л. Д. Автоматизированное управление мощными одноковшовыми экскаваторами. М.: Горное дело, 2014. 400 с.

11. Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е. Алгоритм управления операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты с применением нечеткой логики // ГИАБ. 2015. № 1. С. 263–271.

12. Комиссаров А. П., Летнев К. Ю., Лукашук О. А. Анализ двухкривошипно-рычажных механизмов рабочего оборудования карьерных экскаваторов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В. Р. Кубачека: сб. трудов XIV Междунар. науч.-техн. конф. 20–21 апреля 2017. Екатеринбург: УГГУ, 2017. С. 41–46.

13. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1979. 576 с.

14. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров. М.: МГГУ, 2007. 680 с.

15. Лукашук О. А., Летнев К. Ю., Комиссаров А. П. Определение режимов работы двигателей главных механизмов одноковшового экскаватора // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 52–58.

Поступила в редакцию 28 октября 2020 года

Сведения об авторах:

Лукашук Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. E-mail: oldim96@mail.ru

Летнев Константин Юрьевич – старший преподаватель кафедры подъемно-транспортных машин и роботов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. E-mail: k.y.letnev@urfu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-94-102

Determining operation parameters of the leverage mechanism in a mining excavator

Olga A. Lukashuk[1], Konstantin Iu. Letnev[1]
[1] Ural Federal University named after The First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *The paper analyzes the process of rock excavation using a front-shovel operational equipment of an open-pit excavator in the context of determining rational modes of operation for its main mechanisms (lifting and thrusting mechanisms) during the excavation.*

The main purpose of the study *is to establish the kinematic and dynamic characteristics of the excavation process by identifying patterns of changes in the operating parameters of the main mechanisms.*

Research methodology *includes mathematical modelling and computational experiment with the use of machines and mechanisms theory methods.*

Results. *Dependencies were obtained to determine rational values of lifting and thrusting velocities which ensure that the bucket (top of its cutting edge) moves along a specified trajectory while excavating. A simulation model was built for the process of rock excavation carried out by front-shovel excavators, which represents a set of calculated values for the operational parameters of the main mechanisms to realize the bucket movement along a specified path and provide specified energy-force parameters on the bucket. An optimizing algorithm was developed to control the working process of an open-pit excavator and achieve required values of the operation parameters to get the bucket moving at a specified excavating velocity within the work area of the excavator. It is shown that their joint action forms a kinematic chain which connects the main mechanisms and the bucket and includes driven links of those mechanisms and elements of the operational equipment. Operation parameters of the main mechanisms were found to be formed in accordance with kinematic properties of the transmission mechanism (with the kinematic chain as its part).*

Scope of results. *The results of the research could be used to develop a control system for the drives of the main mechanisms.*

Key words: *front-shovel operational equipment; process of rock excavation; main mechanisms; transmission mechanism; rational values of lifting and thrusting velocities.*

REFERENCES

1. Bender F. A., Sawodny O. A. Predictive driver model for the virtual excavator. In: *The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. 2014. P. 187–192.
2. Lee B., Kim H. J. Trajectory generation for an automated excavator. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Control, Automation and Systems (Iccas/14). Seoul*. 2014. P. 716–719.
3. Jud D., Hottiger G., Leemann P., Hutter M. Planning and control for autonomous excavation. In: *2017 IEEE Robotics and Automation Letters, 2(4), 7962150*. P. 2151–2158.
4. Bao H., Zhang R. Study on optimization of coal truck flow in open-pit mine. *Advances in Civil Engineering*. 2020. 8848140.
5. Malafeev S. I., Serebrennikov N. A. Improving the energy efficiency of mining excavators based on the modernization of electrical equipment and control systems. *Ugol. Russian Coal Journal*. 2018; 10: 30–34.
6. Awuah-Offei K. *Energy efficiency in the minerals industry: best practices and research directions*. Springer; 2017. 333 p.
7. Babakov S. E., Pevzner L. D. Control algorithm of quarry power shovel digging operation based on fuzzy logic. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2012; 9: 8–17. (In Russ.)
8. Koriukov A. A. The geometric model of the working equipment of career excavators for calculation of loads of electric drive and control of position of the bucket. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 3: 106–113. (In Russ.)
9. Malafeev S. I., Tikhonov Iu. V. Intellectualization of a career excavator. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 11: 107–115. (In Russ.)
10. Pevzner L. D. *Automated control over powerful single-bucket excavators*. Moscow: Gornoe delo Publishing; 2014. (In Russ.)
11. Pevzner L. D., Babakov S. E. Control algorithm of quarry power shovel digging operation based on fuzzy logic. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 1: 263–271. (In Russ.)
12. Komissarov A. P., Letnev K. Iu., Lukashuk O. A. Analysis of two point-linkage of the working equipment mining excavator. In: *Process equipment for mining and oil and gas industry. Readings in memory of V. R. Kubachek: Proceedings of the 14th International Sci. Tech. Conf., 20–21 April 2017. Ekaterinburg*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2017. P. 41–46. (In Russ.)
13. Levitskii N. I. *Theory of Machines and Mechanisms*. Moscow: Nauka Publishing; 1979. (In Russ.)
14. Poderni R. Iu. *Machinery for quarries*. Moscow: MSMU Publishing 2007. 680 c.

15. Lukashuk O. A., Letnev K. Iu., Komissarov A. P. The modes of operation determination of the main mechanisms engines of a power shovel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 5: 52–58. (In Russ.)

Received 28 October 2020

Information about authors:

Olga A. Lukashuk – PhD (Engineering), Head of Department, Assistant Professor, Department of Handling Machinery and Robots, Ural Federal University. E-mail: oldim96@mail.ru
Konstantin Iu. Letnev – senior lecturer, Department of Handling Machinery and Robots, Ural Federal University. E-mail: k.y.letnev@urfu.ru

Для цитирования: Лукашук О. А., Летнев К. Ю. Определение режимных параметров рычажного механизма карьерного экскаватора // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 2. С. 94–102. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-94-102
For citation: Lukashuk O. A., Letnev K. Iu. Determining operation parameters of the leverage mechanism in a mining excavator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 2: 94–102 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-94-102