

УДК 621.879

**Комиссаров А.П.<sup>1,2</sup>**, профессор, **Лагунова Ю.А.<sup>1,2</sup>**, профессор, **Шестаков В.С.<sup>1</sup>**, профессор,  
**Лукашук О.А.<sup>2</sup>**, заведующий кафедрой

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет,  
620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

<sup>2</sup> Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: yu.lagunova@mail.ru

## **ОЦЕНКА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЭКСКАВАТОРА «ГОРНЫЙ»**

---

**Аннотация:** Актуальность работы определяется темой исследования, заключающейся в определении основных параметров рычажного рабочего оборудования карьерного экскаватора – принципиально новой конструкции рабочего оборудования типа прямая лопата, защищенной патентом РФ. На основе математической модели передаточного механизма, образующегося в процессе экскавации горных пород при совместном действии главных копающих механизмов и соединяющего главные механизмы с ковшом, установлены зависимости между энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке ковша, и режимными параметрами главных механизмов. Составлена программа расчета на ЭВМ режимных параметров главных механизмов при отработке экскаваторного забоя. Результаты работы: Разработанная имитационная модель процесса экскавации позволит создать адаптивную систему управления рабочим процессом и повысить эффективность функционирования карьерного экскаватора.

**Ключевые слова:** карьерный экскаватор; рычажное рабочее оборудование; режимные параметры главных механизмов; имитационная модель процесса экскавации.

**Информация о статье:** принята 01 августа 2019 г.  
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-3-3-8

### **Введение**

В современных условиях конкурентного развития экономики особое значение приобретает проблема повышения технического уровня карьерных экскаваторов и создания высокопроизводительного и ресурсосберегающего оборудования.

Основным базовым элементом карьерного экскаватора является рабочее оборудование, определяющее тип экскаватора, его конструктивную схему, а также количественные и качественные показатели функционирования экскаватора.

Разработка принципиально новой схемы рабочего оборудования типа прямая лопата – рычажного рабочего оборудования – обуславливает необходимость проведения специального исследования, направленного на обоснование параметров рычажного рабочего оборудования и на выявление взаимосвязей между параметрами новой схемы рабочего оборудования и параметрами других базовых элементов карьерного экскаватора, особенно главных копающих механизмов.

### **Цели и задачи работы**

Цель исследования – оценка выемочно-погрузочного потенциала карьерного экскаватора с рычажным рабочим оборудованием.

Задачи работы:

- определение зависимостей между энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке ковша, и режимными параметрами главных механизмов;
- разработка методики идентификации положения ковша в экскаваторном забое;
- составление программы расчета режимных параметров главных механизмов при отработке экскаваторного забоя.

Объектом исследования является принципиально новая схема рабочего оборудования типа прямая лопата – рычажное рабочее оборудование.

Предмет исследования – исследование процесса экскавации горных пород рычажным рабочим оборудованием и определение режимных параметров главных копающих механизмов.

Методы исследования – математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Таблица 1. Режимные параметры главных механизмов экскаватора с рычажным рабочим оборудованием

№№ пп	Исходные данные			Расчетные данные			
	$X_{к,м}$	$Y_{к,м}$	$G_{к+п,кН}$	$V_{НБ,м/с}$	$V_{н,м/с}$	$F_{НБ,кН}$	$F_{н,кН}$
Начальная траектория ( $X_{ко} = 9 м$ )							
1	9,0	0	400	-0,21	-0,87	1140	-690
2	10,1	2,0	435	-0,32	-0,82	935	-676
3	11,3	3,9	469	-0,47	-0,76	805	-633
4	12,4	5,9	504	-0,68	-0,66	692	-534
5	13,5	7,8	537	-0,96	-0,52	584	-337
6	14,6	9,8	572	-1,15	-0,31	495	-7
7	15,8	11,7	606	-0,94	-0,04	461	392
8	17,3	14,3	652	-0,31	0,32	553	803
9	18,8	17,0	700	0,0	0,58	782	1070
Средняя траектория ( $X_{ко} = 12 м$ )							
10	12,0	0	400	-0,27	-0,76	1620	-456
11	13,5	2,6	446	-0,34	-0,72	1410	-447
12	14,3	3,9	469	-0,48	-0,60	1150	-371
13	15,0	5,2	492	-0,55	-0,51	1070	-299
14	16,5	7,8	537	-0,66	-0,30	950	-69
15	17,3	9,1	560	-0,66	-0,17	923	87
16	18,8	11,7	606	-0,51	0,11	954	443
17	20,3	14,3	652	-0,27	0,37	1100	807
18	21,8	17,0	700	-0,06	0,56	1350	1170
Конечная траектория ( $X_{ко} = 15 м$ )							
19	15,2	0	400	-0,30	-0,63	2160	-134
20	16,7	2,6	446	-0,39	-0,50	1740	-95
21	17,5	3,9	469	-0,43	-0,42	1620	-38
22	18,2	5,2	492	-0,45	-0,33	1030	41
23	19,7	7,8	537	-0,46	-0,13	1470	265
24	20,5	9,1	560	-0,43	-0,02	1480	406
25	22,0	11,7	606	-0,31	0,20	1570	733
26	23,5	14,3	652	-0,15	0,40	1760	1110
27	25,0	17,0	700	0,02	0,55	2050	1560

В Уральском горном университете разработан новый тип рабочего оборудования карьерного экскаватора [1]. Рабочее оборудование (рис.1) включает рукоять, жестко соединенную с ковшом и установленную в седловом подшипнике, несущую балку, установленную в седловом подшипнике и соединенную с рукоятью посредством рамы и тяги. Седловые подшипники и главные механизмы (напорный механизм и механизм перемещения несущей балки) размещены на поворотной платформе.

Новизна технического решения рычажного рабочего оборудования заключается в следующем [2,3]:

- использование в качестве основного опорного элемента рабочего оборудования вместо стрелы несущей балки, опирающейся на раму, установленную на поворотной платформе;
- замена подъемного механизма зубчато-реечным механизмом перемещения несущей балки;
- установка главных механизмов (механизма напора и механизма перемещения несущей балки) на поворотной платформе.

Существенные особенности компоновочно-конструктивной схемы рычажного рабочего оборудования обуславливают и особенности кинематики рабочего оборудования.

Установлено [4,5], что в процессе экскавации горных пород рабочим оборудованием прямая лопата при совместном действии главных копающих

механизмов ввиду наличия кинематических связей между звеньями главных механизмов и элементами рабочего оборудования образуется передаточный механизм, соединяющий главные механизмы с ковшом.

Передаточный механизм (рис.2) состоит из выходных звеньев главных механизмов (кремальерных шестерен и седловых подшипников) и элементов рабочего оборудования.

Число степеней свободы механизма составит

$$S = 3n - 2P_5 - P_4 = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 4 - 2 = 2,$$

где  $n = 4$  – число подвижных звеньев;  $P_5 = 4$  – число кинематических пар пятого класса (одноподвижных);  $P_4 = 2$  – число кинематических пар четвертого класса (двух подвижных – вращательное и поступательное движения).

Следовательно, число обобщенных координат (независимых координат, определяющих положение всех звеньев механизма) равно двум.

В механизме с двумя обобщенными координатами в качестве обобщенных координат могут быть приняты координаты двух звеньев или одного звена, если оно образует со стойкой двухподвижную пару [6].

Так, если звено «рукоять-ковш» (а именно ковш) совершает основное рабочее движение, то в качестве обобщенных координат механизма рабочего оборудования следует принять координаты звена

Таблица 2. Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А

№№ пп	Исходные данные			Расчетные данные			
	$X_{к,м}$	$Y_{к,м}$	$G_{к+п,кН}$	$V_{п,м/с}$	$V_{н,м/с}$	$F_{п,кН}$	$F_{н,кН}$
Начальная траектория ( $X_{ко} = 9 м$ )							
1	9,0	0	400	0,95	-0,87	290	-630
2	10,15	2	435	0,92	-0,81	350	-620
3	11,30	4	470	0,84	-0,70	420	-605
4	12,45	6	506	0,70	-0,51	520	-580
5	13,60	8	541	0,52	-0,19	700	-555
6	14,75	10	576	0,50	0,19	975	-590
7	15,90	12	611	0,66	0,50	1270	-700
8	17,05	14	646	0,80	0,70	1560	-850
9	18,20	16	682	0,89	0,81	1810	-1005
10	18,80	17	700	0,91	0,84	1910	-1060
Средняя траектория ( $X_{ко} = 12 м$ )							
11	12,0	0	400	0,90	-0,72	517	-411
12	13,15	2	435	0,85	-0,61	560	-402
13	14,3	4	470	0,78	-0,45	595	-395
14	15,45	6	506	0,78	-0,45	595	-395
15	16,6	8	541	0,65	0,04	755	-294
16	17,75	10	576	0,66	0,29	838	-217
17	18,9	12	611	0,69	0,50	886	-95
18	20,05	14	646	0,68	0,65	896	115
19	21,20	16	682	0,49	0,75	890	497
20	21,8	17	700	0,25	0,78	960	806
Конечная траектория ( $X_{ко} = 15 м$ )							
21	15,2	0	400	0,85	-0,55	690	-207
22	16,35	2	443	0,80	-0,42	722	-187
23	17,55	4	486	0,74	-0,24	754	-152
24	18,7	6	529	0,69	-0,04	791	-91
25	19,9	8	572	0,64	0,16	835	9
26	21,05	10	615	0,60	0,35	885	156
27	22,25	12	658	0,51	0,50	937	372
28	23,4	14	700	0,32	0,62	1010	685
29	24,8	17*	700	-0,12	0,74	1350	1420

\* - вариант расчетный, не реализуется из-за конструктивных ограничений

«рукоять-ковш» – координаты точки К (вершины режущей кромки ковша)  $X_K$  и  $Y_K$ .

Таким образом, положения и движения звеньев передаточного механизма и звеньев главных механизмов определяются положением и законом движения звена «рукоять-ковш» и, соответственно, режимные параметры главных механизмов определяются энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке ковша, т.е. при экскавации горных пород происходит «обратимость» главных механизмов [7].

В результате кинематического и силового анализа передаточного механизма [8] определены кинематические передаточные функции механизма, т. е. соотношения между скоростями рабочих движений (напора и подъема) и скоростью копания.

В общем виде кинематические передаточные функции составят

$$ПФ_H = \frac{V_{HI}}{V_K} = f_1(X_{KI}, Y_{KI}, \psi, l_j);$$

$$ПФ_{HB} = \frac{V_{HBI}}{V_K} = f_2(X_{KI}, Y_{KI}, \psi, l_j),$$

где  $V_{HI}$ ,  $V_{HBI}$  – текущие значения скоростей напора и перемещения несущей балки;  $V_K$ ,  $\psi$  – заданные значения скорости копания и угла наклона касательной к траектории перемещения ковша в

характерных точках траектории по схеме отработки экскаваторного забоя;  $X_{KI}$ ,  $Y_{KI}$  – текущие значения координат точки К;  $l_j$  – геометрические размеры (длины) звеньев механизма рабочего оборудования.

На основе кинематических передаточных функций составлена программа расчета режимных параметров главных механизмов на ЭВМ, учитывающая кинематические свойства передаточного механизма.

Выполнен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов при экскавации рычажным рабочим оборудованием.

С целью сопоставительного анализа режимных параметров основные параметры «расчетного» экскаватора приняты равными параметрам экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод».

В табл. 1 и 2 приведены результаты вычислительных экспериментов по расчету режимных параметров главных механизмов экскаватора с рычажным рабочим оборудованием и экскаватора ЭКГ-20А при следующих значениях исходных данных (в скобках приведены значения данных экскаватора ЭКГ-20А):

- вместимость ковша  $E = 20 м^3$ ;

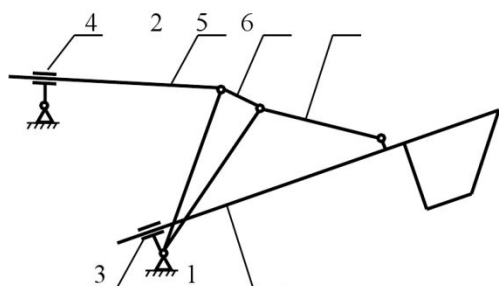


Рис. 1. Схема рычажного рабочего оборудования экскаватора «Горный»:  
1 – рукоять, жестко соединенная с ковшом;  
2 – несущая балка; 3, 4 – седловой подшипник; 5 – рама; 6 – тяга

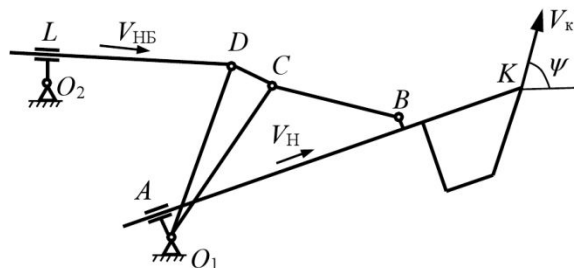


Рис. 2. Схема передаточного механизма, соединяющие главные механизмы с ковшом:  
 $V_K$ ,  $V_{HБ}$ ,  $V_H$  – скорости копания, перемещения несущей балки и напора;  $\psi$  – угол наклона касательной к траектории перемещения ковша

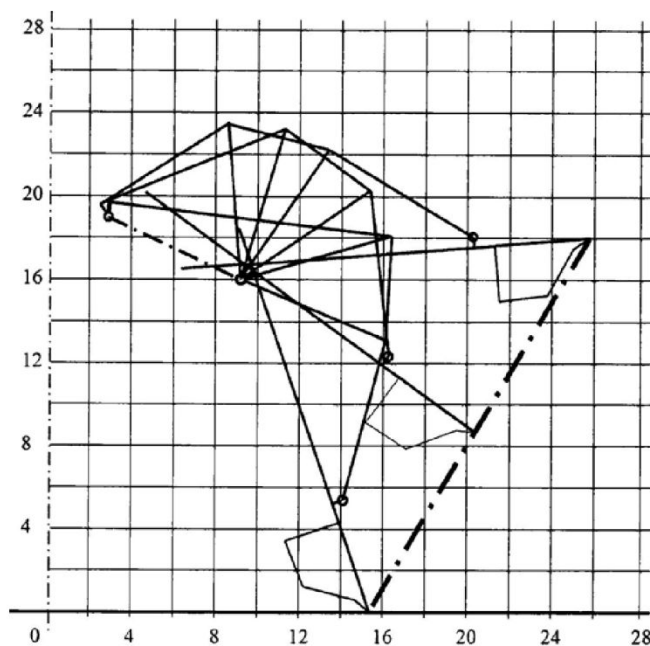


Рис. 3. Положения элементов рабочего оборудования экскаватора «Горный» при перемещении ковша по конечной траектории

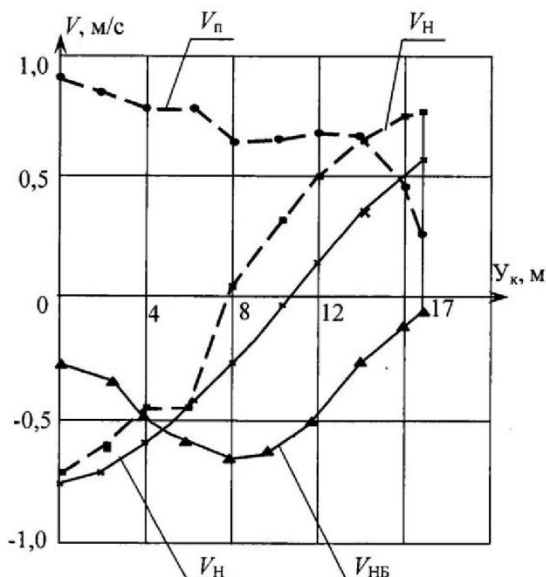


Рис. 4. Графики скоростей рабочих движений при рычажном и традиционном рабочем оборудовании

- масса порожнего и груженого ковша соответственно  $M_K = 40$  т и  $M_{K+П} = 70$  т;
- длина и масса рукояти  $L_{рук} = 13,6$  (12) м и  $M_{рук} = 34$  (30) т;
- максимальный радиус копания  $R_{кmax} = 25$  (23,4);
- максимальная и расчетная высота копания  $H_{кmax} = 17$  м и  $H_{к.расч.} = 12$  м;
- минимальный и максимальный радиусы копания на уровне стояния экскаватора  $R_{ус.min} = 9$  м и  $R_{ус.max} = 15,2$  м;
- скорость копания  $V_K = 1$  м/с;
- сила сопротивления копанию при максимальной высоте копания  $F_{c1} = 230$  кН и при расчетной высоте (равной высоте оси напорного вала)  $F_{c2} = 325$  кН;
- траектории перемещения ковша (вершины режущей кромки – точки К) проходят по границам и середине рабочей зоны экскаватора под углом  $60^\circ$ .

На рис. 3 показаны положения элементов рабочего оборудования экскаватора «Горный» при перемещении ковша по конечной траектории.

Получены следующие расчетные данные:

Экскаватор с рычажным рабочим оборудованием:

- скорость перемещения несущей балки  $V_{HБ}$ ;
- усилие, действующее на несущую балку,  $F_{HБ}$ ;
- скорость напора  $V_H$ ;
- усилие напора  $F_H$ .

Экскаватор ЭКГ-20А:

- скорости подъема  $V_П$  и напора  $V_H$ ;
- усилия подъема  $F_П$  и напора  $F_H$ .

Из приведенных расчетных данных следует, что режимные параметры главных механизмов зависят от положения ковша в забое и изменяются в широком диапазоне.

На рис. 4 приведены графики скоростей рабочих движений при перемещении ковша по средней траектории для экскаваторов «Горный» и ЭКГ-20. Как видно из графиков, координация рабочих движений и степень согласования скоростей существенно отличаются. Так, скорости рабочих движений экскаватора «Горный» при перемещении ковша практически пропорционально возрастают, что обуславливается наличием кинематической связи рукояти и несущей балки.

Схема компоновки рычажного рабочего оборудования обеспечивает перемещение ковша по траекториям, параллельным откосу уступа. При этом исключаются нависающие козырьки и уменьшается вероятность обрушения пород.

Применение рычажного рабочего оборудования, отличающегося пониженной металлоемкостью ввиду отсутствия стрелы, позволит увеличить размеры рабочей зоны при постоянстве массы экскаватора, а также высоту и радиус разгрузки, т.е. размеры погрузочной зоны.

## ВЫВОДЫ

В процессе экскавации горных пород рычажным рабочим оборудованием обеспечивается координация и повышение степени согласованности скоростей рабочих движений, что позволит значительно облегчить управление рабочим процессом.

В целом применение рычажного рабочего оборудования позволит повысить выемочно-погрузочные возможности экскаватора за счет увеличения выработки горной массы с одного места стояния экскаватора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на полезную модель «Экскаватор «Горный» № 178976; опублик. 24.04.2018. Бюл. № 12.
2. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Лукашук О.А., Плотников Н.С. Новый тип рабочего

оборудования карьерного экскаватора. Уголь, 2018. № 12 (1113) с. 27-29.

3. Комиссаров А.П., Лукашук О.А., Плотников Н.С. Технические и технологические особенности карьерного экскаватора «Горный» // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромышленного оборудования: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. «Горная и нефтяная электро-механика – 2018». Пермь, 15-18 октября 2018 г. Изд. ПНИПУ. 2018. С 82-85.

4. Гафурьянов Р.Г., Комиссаров А.П. Моделирование рабочего процесса карьерных экскаваторов. Горное оборудование и электромеханика, 2009. № 6. С. 40-45.

5. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Лукашук О. Плотников Н.С., Сайтов В.И. Взаимодействие главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород. Известия УГГУ. 2018. Вып. 4(52). С 93-97.

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

7. Комиссаров А.П., Плотников Н.С., Летнев К.Ю., Лукашук О.А. «Обратимость» главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сб. трудов XVI Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Екатеринбург, 12-13 апреля 2018 г. Изд. УГГУ. 2018. С. 48-50.

8. Комиссаров А.П., Плотников Н.С. Математическая модель механизма рабочего оборудования карьерного экскаватора «Горный» // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сб. трудов XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Екатеринбург, 04-05 апреля 2019 г. Изд. УГГУ. 2019. С. 271-275.

**Komissarov A.P.<sup>1,2</sup>, Professor, Lagunova Yu.A.<sup>1,2</sup>, Professor, Shestakov V.S.<sup>1</sup>, Professor, Lukashuk O.A.<sup>2</sup>, Head of Department**

<sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Russia, Yekaterinburg, ul. Kuybysheva, 30

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Russia, Yekaterinburg, ul. Mira, 19

## EVALUATION OF STANDARD PARAMETERS OF THE MAIN MECHANISMS OF THE "GORNYI" EXCAVATOR

**Abstract:** The relevance of the work is determined by the research topic, which consists in determining the main parameters of the implement linkage of an open-pit excavator - a fundamentally new design of the implement such as a front shovel protected by the RF patent. Based on the mathematical model of the transmission mechanism, which is formed during the excavation of rocks under the combined action of the main digging mechanisms and the mechanism connecting the main mechanisms with the bucket, the relationships between the energy-power parameters implemented on the cutting edge of the bucket and the standard parameters of the main mechanisms are established. A computer calculation program has been developed for the standard parameters of the main mechanisms during mining of the face by the excavator. Results: The developed simulation model of the excavation process will create an adaptive workflow management system and increase the efficiency of the mining excavator.



**Keywords:** mining excavator; implement linkage; standard parameters of the main mechanisms; simulation model of the excavation process.

**Article info:** received August 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-3-3-8

#### REFERENCES

1. Patent na poleznuyu model' «Ekskavator «Gornyj» № 178976; opubl. 24.04.2018. Byul. № 12.
2. Komissarov A.P., Lagunova YU.A., Lukashuk O.A., Plotnikov N.S. Novyj tip rabocheho oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora. Ugol'. 2018 № 12 (1113) s. 27-29.
3. Komissarov A.P., Lukashuk O.A., Plotnikov N.S. Tekhnicheskie i tekhnologicheskie osobennosti kar'ernogo ekskavatora «Gornyj» // Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gorno-shahtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya: Materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Gornaya i neftyanaya elektromekhanika – 2018». Perm', 15-18 oktyabrya 2018 g. Izd. PNIPU. 2018. S 82-85.
4. Gafur'yanov R.G., Komissarov A.P. Modelirovanie rabocheho processa kar'ernyh ekskavatorov. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika, 2009. № 6. S. 40-45.
5. Komissarov A.P., Lagunova YU.A., Lukashuk O., Plotnikov N.S., Saitov V.I. Vzaimodejstvie glavnyh

mekhanizmov kar'ernogo ekskavatora pri ekskavatsii gornyh porod. Izvestiya UGGU. 2018. Vyp. 4(52). S 93-97.

6. Levitskij N.I. Teoriya mekhanizmov i mashin. M.: Nauka. 1979. 576 s.

7. Komissarov A.P., Plotnikov N.S., Letnev K.YU., Lukashuk O.A. «Obratimost'» glavnyh mekhanizmov kar'ernogo ekskavatora pri ekskavatsii gornyh porod // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: Sb. trudov XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «CHteniya pamyati V.R. Kubacheka». Ekaterinburg, 12-13 aprelya 2018 g. Izd. UGGU. 2018. S. 48-50.

8. Komissarov A.P., Plotnikov N.S. Matematicheskaya model' mekhanizma rabocheho oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora «Gornyj» // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti: Sb. trudov XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «CHteniya pamyati V.R. Kubacheka». Ekaterinburg, 04-05 aprelya 2019 g. Izd. UGGU. 2019. S. 271-275.

#### Библиографическое описание статьи

Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С., Лукашук О.А. Оценка режимных параметров главных механизмов экскаватора «ГОРНЫЙ» // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 3 (143). – С. 3-8.

#### Reference to article

Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S., Lukashuk O.A. Evaluation of standard parameters of the main mechanisms of the “GORNYI” excavator. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 3 (143), pp. 3-8.