

Взаимодействие главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород

Анатолий Павлович КОМИССАРОВ¹,
Юлия Андреевна ЛАГУНОВА^{1*},
Никита Сергеевич ПЛОТНИКОВ¹,
Ольга Анатольевна ЛУКАШУК^{2,**},
Виль Ирхужеевич САИТОВ¹

¹Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы определяется темой исследования – изучение режимов работы и степени взаимодействия главных механизмов (подъемного и напорного) карьерного экскаватора в процессе экскавации горной массы. Развитие конструкций карьерных экскаваторов (мехлопат), представляющих собой уникальные технические объекты, характеризуется проявлением критического несоответствия между техническим совершенством конструкций и сложностью управления рабочим процессом копания. В технической литературе отсутствуют сведения о режимах совместной работы главных механизмов карьерных экскаваторов в процессе экскавации горной массы, разрабатываемые алгоритмы управления рабочим процессом основываются на абстрактных моделях (методах нечеткой логики, мультиагентного подхода и т. п.). В работе на основе имитационной модели процесса экскавации впервые выполнено алгоритмическое описание процесса и определены режимы работы главных механизмов, обеспечивающие перемещение ковша (вершины режущей кромки) по заданной траектории. Показано, что при совместной работе главных механизмов преобразование режимных параметров механизмов в энергосиловые параметры, реализуемые на ковше, происходит в зависимости от кинематических свойств двухкривошипно-рычажного механизма рабочего оборудования, соединяющего главные механизмы с ковшом. В результате вычислительного эксперимента определены диапазоны изменения скоростей и усилий подъема и напора при перемещении ковша в пределах рабочей зоны экскаватора.

Результаты и их применение. Разработанный метод определения режимных параметров главных механизмов позволит создать автоматизированную систему цифрового управления процессом экскавации, адаптированную к конкретным горнотехническим условиям эксплуатации и параметрам рабочего забоя, что в конечном счете обеспечит повышение эффективности функционирования карьерного экскаватора.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, режимные параметры главных механизмов, двухкривошипно-рычажный механизм рабочего оборудования, энергосиловые параметры.

Введение

Карьерные одноковшовые экскаваторы являются основным средством механизации выемочно-погрузочных операций на открытых горных работах.

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

Решение этой важнейшей проблемы основывается на комплексном использовании результатов научных исследований как в области машиноведения, так и связанных с изучением рабочих процессов технологических машин.

Основными направлениями исследований по данной проблеме, отраженными в последних публикациях, являются: – моделирование рабочего процесса с целью обоснования рациональных значений конструктивных и режимных параметров главных механизмов [1–7];

– оценка технического уровня (технических и технологических показателей функционирования) карьерных экскаваторов [8–16].

Вместе с тем вопросы, связанные с изучением режимов работы главных исполнительных механизмов карьерных экскаваторов (подъемного и напорного), в известных публикациях рассматриваются недостаточно полно. В частности, не изучен вопрос взаимодействия главных механизмов при их совместной работе в процессе экскавации горных пород в различных областях рабочей зоны экскаватора (нижней, верхней и т. п.).

Анализ характера взаимодействия главных исполнительных механизмов при их совместной работе в процессе экскавации горных пород в конкретных горнотехнических условиях отработки экскаваторного забоя позволит повысить эффективность функционирования экскаватора.

Цель и задачи работы

Цель работы – повышение эффективности управления процессом копания за счет согласования режимных параметров (скоростей и усилий подъема и напора) главных механизмов карьерного экскаватора.

Задачи работы:

– установление взаимозависимостей между режимными параметрами (скоростями и усилиями) главных механизмов; – согласование режимных параметров и определение рациональных значений параметров для конкретных условий работы.

Объектом исследования является рабочий процесс экскавации горной массы, заключающийся в перемещении ковша (вершины режущей кромки) по эквидистантным траекториям с одновременным отделением слоя («стружки») горной массы постоянной толщины.

*Komissarov_a_p@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4320-8111>

**  yu.lagunova@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3828-434X>

***oldim96@mail.ru

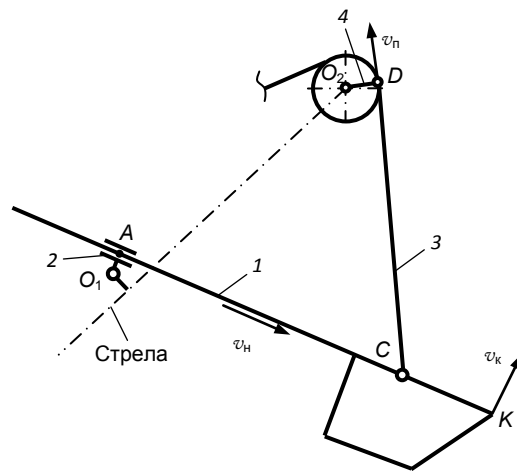


Схема механизма рабочего оборудования. 1 – звено «рукоять–ковш»; 2 – седловой подшипник; 3 – подъемный канат; 4 – головной блок; v_n , v_n , v_k – скорости напора, подъема и копания.

The diagram of the mechanism of work equipment. 1 – element “lift-arm-bucket”; 2 – saddle bearing; 3 – hoist rope; 4 – fairlead sheave; v_n , v_n , v_k – speed of pressure, hauling-up and excavation.

Предмет исследования заключается в выявлении взаимосвязей между режимными параметрами главных механизмов и энергосиловыми параметрами, реализуемыми на режущей кромке зубьев ковша при копании, для конкретных условий эксплуатации.

В качестве метода исследований принят вычислительный эксперимент, выполняемый на основе имитационной модели процесса экскавации грунта рабочим оборудованием *прямая лопата* [8, 10]. Для алгоритмических моделей экспериментирование с помощью модели тождественно нахождению значений выходных характеристик при заданных значениях входных переменных и постоянных аргументов, т. е. подстановке в алгоритм конкретных чисел и расчету по формулам. Перебор вариантов решений производится с заданным шагом варьирования. В ходе просчета и калибровки математической модели накапливается информация о функциональных возможностях различных структурных схем рабочего оборудования. Таким образом, имитационное моделирование состоит в многократном воспроизведении функционирования (поведения) исследуемой системы на основе математической модели. Результаты имитационного моделирования представляют собой набор величин, характеризующих исследуемый процесс.

В процессе экскавации горной массы при совместной работе главных исполнительных механизмов (механизмов подъема и напора) образуется механизм рабочего оборудования, связывающий главные механизмы с ковшом.

Двухкривошипно-рычажный механизм рабочего оборудования (рисунок) включает четыре подвижных звена: звено 1 в виде жестко соединенных рукояти и ковша (в дальнейшем звено – «рукоять–ковш»), образующее со стойкой O_1 двухподвижную пару (поступательную и вращательную) посредством седлового подшипника – звена 2; звено 3 – подъемный канат и звено 4 – головной блок стрелы. Звенья 3 и 4 кинематически эквивалентны стержням, образующим вращательные пары между собой, со звеном 1 и стойкой O_2 . Звенья 2 и 4 представляют собой выходные звенья главных механизмов напора и подъема. При этом скорость точки А звена 1 равна скорости напора v_n , а скорость точки D равна скорости подъема v_n .

При управлении рабочим процессом экскавации, т. е. формирования заданной траектории перемещения ковша, ковш становится ведущим (и начальным) звеном общего передаточного механизма (механизма рабочего оборудования и главных механизмов). В этом случае положения звеньев и режимные параметры главных механизмов определяются в зависимости от положения ковша в рабочей зоне, а также от кинематических свойств механизма рабочего оборудования.

Режимные параметры главных механизмов определены на основе вычислительного эксперимента, выполненного для экскаватора ЭКГ-20А производства ПАО «Уралмашзавод».

Исходные данные для расчета:

- размеры рабочей зоны экскаватора – высота оси напорного вала $H_n = 12$ м, максимальная высота копания $H_{k \max} = 17$ м, минимальный и максимальный радиусы копания на уровне стояния экскаватора $R_{k, y. c \min} = 9$ м и $R_{k, y. c \max} = 18$ м, максимальный радиус копания $R_{k \max} = 23,4$ м;
- геометрические (линейные и угловые) размеры элементов рабочего оборудования;
- массы элементов рабочего оборудования – рукояти $M_p = 30$ т; ковша $M_k = 40$ т и груженого ковша $M_{k+n} = 70$ т;
- сила сопротивления породы копанию (касательная составляющая): при расчетной высоте копания $H_{расч} = H_n F_{cl}^t = 325$ кН и при максимальной высоте копания $F_{c2}^t = 230$ кН.

В таблице приведены результаты расчета режимных параметров главных механизмов (скорости подъема v_n и напора v_n , усилия подъема F_n и напора F_n) при перемещении ковша в пределах рабочей зоны по начальной, средней (т. е. в центре рабочей зоны экскаватора) и конечной траекториям с углом наклона, соответствующим углу откоса уступа.

Из приведенных данных видно, что режимные параметры главных механизмов (скорости и усилия подъема и напора) изменяются в пределах рабочей зоны экскаватора в широком диапазоне и зависят как от высоты копания (координаты Y_k вершины режущей кромки ковша), так и от радиуса копания (координаты X_k) или удаления траектории перемещения ковша от экскаватора.

**Режимные параметры главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А.
The standard parameters of propulsion machinery of the EKG-20A excavator.**

Номер позиции	Исходные данные				Расчетные данные		
	X_k , м	Y_k , м	$G_{к+п}$, кН	$v_{п}$, м/с	$v_{н}$, м/с	$F_{п}$, кН	$F_{н}$, кН
<i>Начальная траектория ($X_{к0} = 9$ м)</i>							
1	9,00	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	500	0,70	-0,51	520	-580
5	13,60	8	540	0,52	-0,19	700	-555
6	14,75	10	575	0,50	0,19	975	-590
7	15,90	12	610	0,66	0,50	1270	-700
8	17,05	14	650	0,80	0,70	1560	-850
9	18,20	16	680	0,89	0,81	1810	-1005
10	18,80	17	700	0,91	0,84	1910	-1060
<i>Средняя траектория ($X_{к0} = 13,5$ м)</i>							
11	13,50	0	400	0,88	-0,64	610	-310
12	14,65	2	435	0,83	-0,51	640	-300
13	15,80	4	470	0,76	-0,34	680	-280
14	16,95	6	500	0,70	-0,12	710	-230
15	18,10	8	540	0,66	0,11	780	-155
16	19,25	10	575	0,65	0,32	830	-40
17	20,40	12	610	0,62	0,50	885	140
18	21,55	14	650	0,50	0,63	930	420
19	22,70	16	680	0,22	0,72	105	845
20	23,30	17	700	0,02	0,76	1125	1130
<i>Конечная траектория ($X_{к0} = 18$ м)</i>							
21	18,00	0	400	0,79	-0,39	1020	110
22	19,15	2	450	0,73	-0,25	1060	150
23	20,30	4	500	0,68	-0,09	1100	210
24	21,45	6	550	0,61	0,07	1150	320
25	22,60	8	600	0,53	0,23	1210	480
26	23,75	10	650	0,42	0,38	1290	710
27	24,90	12	700	0,27	0,50	1420	1030

Расчеты показывают, что в рабочей зоне экскаватора имеются критические участки, в которых режимные параметры принимают экстремальные значения.

Так, при перемещении ковша по начальной траектории усилие подъема значительно возрастает с ростом высоты копания ввиду уменьшения плеча усилия подъема относительно точки O_1 (оси напорного вала) и при максимальной высоте копания усилие подъема достигает предельного значения, соответствующего стопорному моменту на валу двигателя подъемного механизма. При этом соответственно возрастает и усилие напора, которое направлено в сторону оси напорного вала (усилие напора имеет знак «минус») и уравновешивает усилие подъема.

При перемещении ковша по средней траектории скорость подъема уменьшается и при максимальной высоте копания имеет практически нулевое значение, т. е. двигатель подъемного механизма работает в режиме тормоза. В этом случае (при копании в верхней части забоя) перемещение ковша осуществляется в основном за счет напорного механизма.

В процессе копания при перемещении ковша по крайней траектории двигатели обоих механизмов (подъемного и напорного) работают в форсированных режимах, причем с ростом высоты копания двигатель подъемного механизма «сдает позиции».

Таким образом, при совместном действии главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород происходит преобразование режимных параметров подъемного и напорного механизмов в соответствии с кинематическими свойствами рычажного механизма рабочего оборудования.

В результате изменяются режимы работы двигателей главных механизмов и значения скоростей и усилий подъема и напора, что затрудняет ведение процесса экскавации пород.

Оценка фактических значений режимных параметров подъемного и напорного механизма при конкретной технологической схеме отработки забоя позволит повысить качество управления рабочим процессом.

Анализ степени взаимодействия приводов главных механизмов карьерного экскаватора при экскавации горных пород в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации позволит обосновать адаптивную систему управления рабочим процессом.

В целом эффективное управление процессом копания и достижение требуемого закона движения ковша возможно при практически непрерывном контроле положения ковша в забое и постоянном регулировании скоростей рабочих движений.

ЛИТЕРАТУРА

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), Singapore, IEEE, Dec. 10–12, 2014. P. 187–192. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064302>
2. Schmidt D., Proetzsch M., Berns K. Simulation and control of an autonomous bucket excavator for landscaping tasks // Proceedings of the IEEE ICRA, Anchorage, Alaska, USA, May 3–8, 2010. P. 5108–5113. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509546>
3. Frimpong S., Hu Y., Chang Z. Performance simulation of shovel excavators for earthmoving operations // Proceedings Summer Computer Simulation Conference (SCSC/03), Cherry Hill, New Jersey, USA, 2003. P. 133–138.
4. Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang S. Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic // Journal of Drive and Control. 2013. Vol. 10, issue 1. P. 29–36. <https://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2013.10.1.029>
5. Liu J. Integrated mechanical and electrohydraulic system modeling and virtual reality simulation technology of a virtual robotic excavator // Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design // IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. Wenzhou, China, 2009. P. 797–802. <http://dx.doi.org/10.1109/CAIDCD.2009.5375156>
6. Перепелкин М. А. Применение математических моделей при разработке строительно-дорожных, горных машин и оборудования // Горная промышленность. 2017. № 4 (134). С. 82–85.
7. Савченко А. Я. Совершенствование методологии оценки качества высокопроизводительного экскавационного оборудования большой единичной мощности на этапе эксплуатации // Горные машины и автоматика. 2001. № 1. С. 4–6.
8. Воронов Ю. Е., Зыков П. А. Решение задачи оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. № 8. С. 12–15.
9. Ганин А. Р., Самолазов А. В., Донченко Т. В. Внедрение экскаваторов нового модельного ряда производства ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова» на горных предприятиях России // Уголь. 2012. № 8. С. 60–62.
10. Интенсификация процессов экскавации горных пород / И. Ю. Иванов [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 3. С. 94–99.
11. Кузнецов А. Л., Анистратов К. Ю. Карьерные экскаваторы ПАО «Уралмашзавод» – настоящее и будущее российской горнодобывающей промышленности // Уголь. 2016. № 8. С. 77–81.
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. Автоматизированное управление мощными одноковшовыми экскаваторами. М.: Горное дело, 2014. 396 с.
14. Повышение качества управления одноковшовыми экскаваторами на основе мультиагентного подхода / А. В. Дружинин [и др.] // Новые огнеупоры. 2016. № 3. С. 11–12.
15. Рехтман А. П., Крагель А. А. Комплексные испытания экскаватора ЭКГ-12 // Механизация строительства. 2001. № 1. С. 24–26.
16. 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.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

Interaction of the main mechanisms of a mine excavator while shovelling rocks

Anatoliy Pavlovich KOMISSAROV^{1,*},
Yuliya Andreevna LAGUNOVA^{1,**},
Nikita Sergeevich PLOTNIKOV^{1,***},
Olga Anatol'evna LUKASHUK^{2,****},
Vil' Irkhuzheevich SAITOV¹

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Relevance of the work is determined by the research topic – the study of modes of operation and the degree of interaction of the main mechanisms (lifting and pressure) of a mine excavator in the process of shovelling the rock mass. The development of designs for mine excavators (shovels), which are unique technical objects, is characterized by critical discrepancy between the technical perfection of the structures and the complexity of control of the shovelling process. In the technical literature, there is no information about the modes of joint operation of the main mechanisms of mine excavators in the process of shovelling; developed control algorithms for operating processes are based on abstract models (methods of fuzzy logic, multiagent technologies, etc.). For the first time, an algorithmic description of the process was carried out and the operating modes of the main mechanisms were determined to ensure the movement of a bucket (tooth tip of a cutting edge) in a predetermined path. It is shown that with the joint operation of the main mechanisms, the conversion of the operating parameters of the mechanisms into energy-power parameters in a bucket occurs depending on the kinematic properties of the double crank mechanism of the working equipment connecting the main mechanisms with the bucket. As a result of simulation experiments, variation range in the speed and lifting force when the bucket is moved within the working area of the excavator are determined.

Results and their application. The developed method for determining the operating parameters of the main mechanisms will allow the creation of an automated digital control system for the excavation process, adapted to the specific mining conditions of operation and the parameters of the working place, which ultimately will increase the efficiency of a mine excavator.

Keywords: mine excavator, standard parameters of propulsion machinery, double crank mechanism and implement linkage, power parameters.

REFERENCES

- Bender F. A., Sawodny O. A. 2014, Predictive Driver Model for the Virtual Excavator. *The 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Singapore, IEEE, Dec. 10–12. pp. 187–192. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2014.7064302>
- Schmidt D., Proetzsch M., Berns K. 2010, Simulation and control of an autonomous bucket excavator for landscaping tasks. *Proceedings of the IEEE ICRA*, Anchorage, Alaska, USA, May 3–8, pp. 5108–5113. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509546>
- Frimpong S., Hu Y., Chang Z. 2003, Performance simulation of shovel excavators for earthmoving operations. Summer in computer simulation conference (SCSC/03). Cherry Hill, New Jersey, USA, pp. 133–138.
- Le Q. H., Jeong Y. M., Nguyen C. T., Yang S. Y. 2013, Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic. *Journal of Drive and Control*, vol. 10, issue 1, pp. 29–36. <https://dx.doi.org/10.7839/kscf.2013.10.1.029>
- Liu J. 2009, Integrated mechanical and electrohydraulic system modeling and virtual reality simulation technology of a virtual robotic excavator. Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. *IEEE 10th International Conference*. Wenzhou, China, pp. 797–802. <http://dx.doi.org/10.1109/CAIDCD.2009.5375156>
- Perpelkin M. A. 2017, The use of mathematical models in the development of road construction, mining machinery and equipment. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], no. 4 (134), pp. 82–85. (In Russ.)
- Savchenko A. Ya. 2001, Improving the methodology for assessing the quality of high-performance and heavy-duty excavation equipment at the operational stage. *Gornyye mashiny i avtomatika* [Mining equipment and electromechanics], no. 1, pp. 4–6. (In Russ.)
- Voronov Yu. E., Zykov P. A. 2012, A solution to the optimization of parameters of career shovel excavators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi Zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 8, pp. 12–15. (In Russ.)
- Ganin A. R., Samolazov A. V., Donchenko T. V. 2012, Introduction of new model line of excavators produced by IZ-KARTEX named after P. G. Korobkov at the mining enterprises of Russia. *Ugol'* [Russian coal journal], No 8, pp. 60–62. (In Russ.)
- Ivanov I. Yu., Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Shestakov V. S. 2015, Intensification of processes of excavation of rocks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi Zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 3, pp. 94–100. (In Russ.)
- Kuznetsov A. L., Anistratov K. Yu. Yu. 2016, Mining excavators of PAO Uralmashzavod – today and tomorrow in the Russian mining industry. *Ugol'* [Russian coal Journal. Ugol'], no. 8, pp. 77–81. (In Russ.)
- Pevzner L. D., Babakov S. E. 2012, Managing the operation of digging with a mining power shovel using fuzzy logic. *Ugol'* [Russian coal journal], no. 8, pp. 64–65. (In Russ.)
- Pevzner L. D. 2014, *Avtomatizirovannoye upravleniye moshchnymi odnokovshovymi ekskavatorami* [Automated management of powerful shovel excavators]. Moscow, 396 p.
- Druzhinin A. V., Volkova E. A., Nagatkin E. Yu., Poluzadov V. N. 2016, Improving the quality of control of shovel excavators based on the multi-agent approach. *Novye ognepory* [New refractories], no. 3, pp. 11–12. (In Russ.)
- Rekhtman A. P., Kragel A. A. 2001, Overall tests of the EKG-12 excavator. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of construction], no. 1, pp. 24–26. (In Russ.)
- Samolazov A. V., Donchenko T. V., Shibanov D. A. 2013, Practical results of the introduction of EKG-18R and EKG-32R excavators manufactured by IZ-KARTEX named after P.G.Korobkov at coal-mining enterprises of Russia. *Ugol'* [Russian coal journal], no. 4, pp. 36–38. (In Russ.)

The article was received on March 16, 2018

*Komissarov_a_p@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4320-8111>

**yu.lagunova@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3828-434X>

***oldim96@mail.ru