

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23

Шестаков Виктор Степанович¹, Телиман Ирина Викторовна²,
Безкоровайный Павел Геннадьевич^{1,2}¹ Уральский государственный горный университет² Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова

*E-mail: Shestakov.v.s@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА****Информация о статье**

Поступила:

01 февраля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к печати:

01 марта 2024 г.

Опубликована:

04 апреля 2024 г.

Ключевые слова:гидравлический экскаватор,
стрела, рукоять, ковш, напорная штанга, гидроцилиндр,
усилие**Аннотация.**

Актуальность работы определена необходимостью повышения эффективности гидравлических экскаваторов, от которых существенным образом зависит себестоимость добычи полезных ископаемых. Цель работы – совершенствование рабочего оборудования гидравлического экскаватора и разработка методики определения рациональных параметров, обеспечивающих снижение его массы. Предложена схема рабочего оборудования с исключением гидроцилиндров поворота стрелы по сравнению с традиционной схемой и с расположенным на надстройке на оси вращения напорным механизмом с напорной штангой. Такая схема дает возможность увеличения вместимости ковша и тем самым производительности экскаватора. Приведена методика определения конструктивных параметров экскаватора, обеспечивающая определение сечений стрелы и рукояти без «излишних» запасов прочности и тем самым получение минимальной массы. При этом, если оставить опрокидывающий момент таким же, как у базовой модели, то можно будет увеличить вместимость ковша и производительность экскаватора. За базовый объект, используемый для сравнения с предлагаемой конструкцией, принят гидравлический экскаватор ЭГ-110. Результатами исследований показана возможность снижения массы рабочего оборудования на 5 т и увеличения производительности на 6%.

Для цитирования: Шестаков В.С., Телиман И.В., Безкоровайный П.Г. Исследование нагруженности рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 1 (171). С. 18-23. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23, EDN: SOHHNJ

Анализ существующих схем и определению параметров рабочего оборудования посвящено большое число исследований. Авторами в [1-6] приведено описание и порядок определения параметров для гидравлических экскаваторов по нескольким рабочим положениям ковша, в [7] показаны исследования определения рабочей зоны с возможными усилиями копания, работы [8-11] посвящены разработке моделей для исследования и управления рабочим процессом. Все указанные исследования рассматривают традиционные схемы рабочего оборудования, включающие гидроцилиндры поворота стрелы, рукояти и ковша.

В [12, 13] приведено новое конструктивное исполнение рабочего оборудования и методика определения параметров.

В отличие от известных моделей экскаваторов в предлагаемой схеме рабочего оборудования удержание и перемещение стрелы обеспечивается напорной штангой, гидроцилиндры поворота стрелы исключаются.

Рабочее оборудование экскаватора (Рис. 1) включает стрелу 1, рукоять 2, напорную штангу 3, установленную в седловом подшипнике 4 на двуподковой стойке и шарнирно соединенную с верхней частью стрелы 1, ковш 5, гидроцилиндры поворота рукояти 6 и поворота ковша 7. Решено было применить напорную штангу, а не гидроцилиндр ввиду

значительного расстояния между головой стрелы и надстройкой. Гидроцилиндр такого размера будет

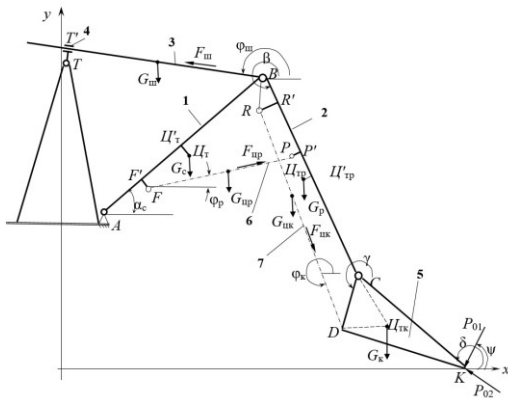


Рис. 1. Схема рабочего оборудования с напорной штангой
Fig. 1. Scheme of working equipment with pressure rod

очень массивным, он будет увеличивать опрокидывающий момент, действующий на поворотную часть, и момент инерции поворотной части. Все это снизит эффективность предлагаемой схемы рабочего оборудования. Штанга работает от рабочих нагрузок только на растяжение-сжатие, сечение будет сравнительно небольшим, масса значительно меньше массы гидроцилиндра. Штанга может перемещаться напорным механизмом зубчато-реечным, канатным, или гидроцилиндром. Располагается механизм на надстройке на оси вращения, поэтому опрокидывающий момент от напорного механизма и момент инерции поворотной части будут значительно меньшими по сравнению с базовой моделью, включающей гидроцилиндр стрелы, вынесенный на большое расстояние от оси вращения. Конструкции таких зубчато-реечных и канатных напорных механизмов применяются на канатных карьерных экскаваторах, они надежны и не усложняют кинематическую схему. Уменьшение опрокидывающего момента позволяет увеличить вместимость ковша при сохранении такого же, как на базовой модели, коэффициента устойчивости.

В этой методике при расчете усилий на верхний пояс не учитывается действие силы тяжести стрелы. При расчетах усилий рассматривается положение ковша на границе зоны растяжки, а усилия в подъемных и тяговых канатах считают равными стопорным (максимальным) значениям [13-15].

Нами составлена методика определения усилий в тяговых F_T и подъемных F_n канатах, которые определяются по силе тяжести груженого или порожнего ковша G_k и углам наклона канатов (β_n, β_T) по уравнениям равновесия (Рис. 1).

На схеме обозначено: $A, T, E, F, P, R, B, C, D$ – шарниры; K – вершина зуба ковша; KCD – схема профиля ковша; CB – рукоять; AB – стрела; TE – расстояние от оси седлового подшипника до оси шарнира «стрела-рукоять»; FP, RD – гидроцилиндры поворота рукояти и ковша; $G_c, G_p, G_k, G_{np}, G_{ck}, G_{ш}$ – силы тяжести стрелы, рукояти, ковша, гидроцилиндров рукояти, ковша, напорной штанги; I_{mp}, I_{mk}

I_{mp}, I_{mk} – центр тяжести стрелы, рукояти и ковша; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varphi_r, \varphi_k, \varphi_{ш}$ – углы наклона к горизонтали стрелы, рукояти, ковша, цилиндров рукояти, ковша, напорной штанги; ψ – угол наклона траектории копания к горизонту

Для предлагаемой конструкции рабочего оборудования проведены исследования по повышению эффективности применения экскаватора с применением системы *APM WinMachine*. Критерием оптимизации принята масса рабочего оборудования при ограничении – обеспечение прочности и долговечности.

Наиболее явный путь повышения эффективности – это снижение масс стрелы и рукояти по сравнению с базовой моделью и за счет этого увеличение вместимости ковша при условии сохранения неизменным опрокидывающего момента относительно ходового оборудования. Увеличение вместимости ковша приведет к увеличению произво-

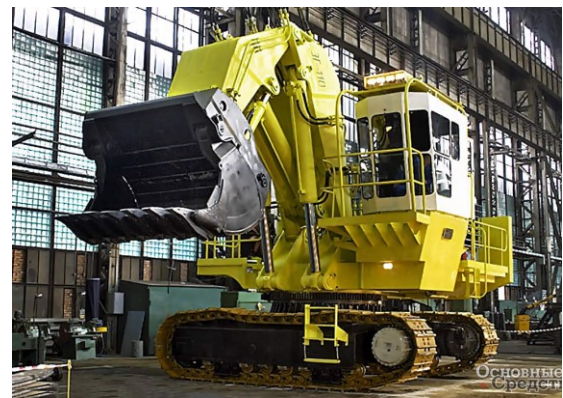


Рис. 2. Экскаватор ЭГ-110
Fig. 2. Excavator EG-110

дительности при сохранении неизменным расхода энергии на совершение рабочего процесса.

Исследования по поиску оптимального решения выполнялись при тех же нагрузках, что и базовой модели экскаватора ЭГ-110, при усилии на зубьях ковша 400 кН.

Проведение исследований напряженно-деформированного состояния конструкций и оптимизации параметров на их основе выполняется в следующей последовательности:

- 1) создание модели конструкции с заданием сечений стержневым элементам и толщин пластинам;
- 2) нагружение элементов модели конструкции действующими рабочими нагрузками;
- 3) задание материала;

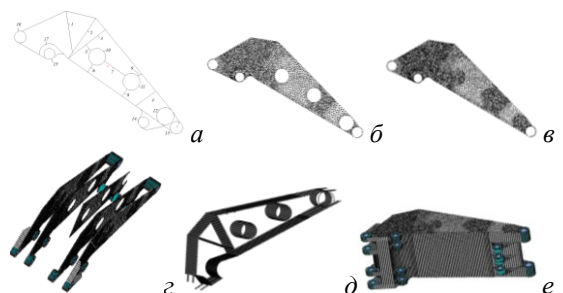


Рис. 3. Модель конструкции стрелы
Fig. 3. Boom design model

- 4) задание опор, закрепляющих конструкцию от перемещений;
- 5) проведение расчета напряжений;
- 6) выполнение анализа полученных результатов: при выявлении элементов с «излишним» запасом прочности задание по возможности меньших сечений, а для элементов с недостаточным запасом – увеличение;
- 7) пункты 5, 6 повторяются до тех пор, пока не будут подобраны сечения, не имеющие излишних запасов прочности и в то же время обеспечивающие требуемый запас прочности.

Листовые элементы стрелы и рукояти реализованы пластинчатой конструкцией, втулки, используемые для соединений элементов между собой, объемными элементами, а оси – стержневыми.

Расчетная модель конструкции стрелы составлена по чертежам принятой для исследований базовой модели экскаватора ЭГ-110 (Рис. 2).

Модель конструкции стрелы выполнена следующим образом. В модуле *Structure 3D* системы *APM WinMachine* на виде «Спереди» поставлены узлы контура стрелы по размерам чертежа, узлы соединены отрезками – получен контур, приведен-

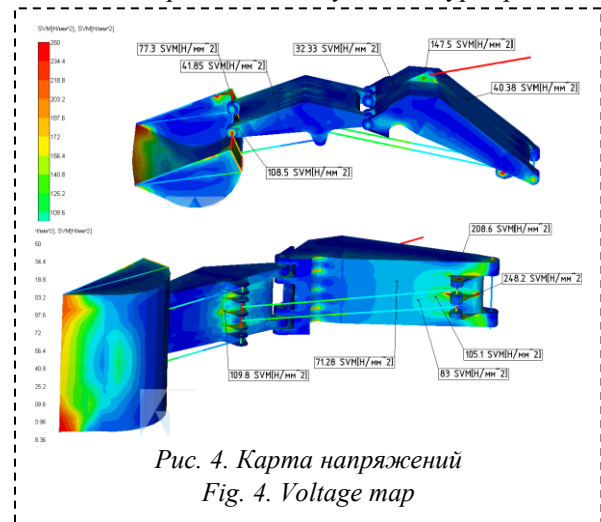


Рис. 4. Карта напряжений
Fig. 4. Voltage map

ный на Рис. 3,а. Контур заполнен конечными элементами в виде треугольных пластин (Рис. 3,б) для внутренних перегородок, а на Рис. 3,в – для наружных вертикальных поверхностей. Полученные элементы скопированы и размещены на нужном расстоянии (Рис. 3,з). Из выделенных наружных и внутренних контуров выдавливанием получены наружные и внутренние горизонтальные поверхности (Рис. 3,д). К полученным элементам добавлены объемные элементы – втулки (Рис. 3,е).

Аналогично составлена модель рукояти и ковша, выполнена их сборка соединением втулок стержневыми элементами.

В модель нагружения входят внешние нагрузки на объект исследования и внутренние силы тяжести, инерционные и центробежные силы, вызванные рабочими инерциями. Внешними нагрузками на стрелу служат усилия копания на зубьях ковша. Внутренние нагрузки, такие как силы тяжести, определяются системой по параметрам модели конструкции (размерам элементов, плотности материала), приложенными в узлах.

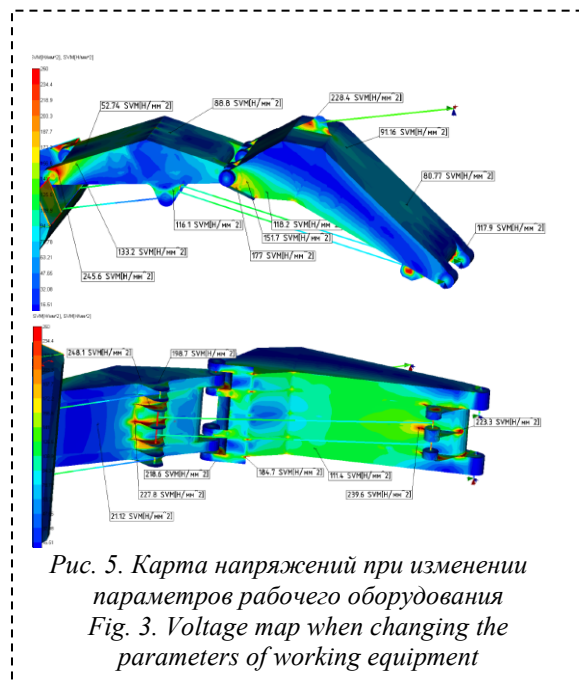


Рис. 5. Карта напряжений при изменении параметров рабочего оборудования
Fig. 5. Voltage map when changing the parameters of working equipment

Модель закреплена, что обеспечивает требование к статическому расчету, реализуется заданием опор. На пяту стрелы заданы опоры с полным запретом перемещений и с разрешением всех поворотов. Разрешение поворотов реализует конструкцию с использованием оси для крепления пяты в опорах. Подвеска стрелы к надстройке выполнена элементом стержень, конец которого закреплен опорой с запретом перемещений.

Результат расчета напряжений для базовой модели приведен на Рис. 4.

Анализ напряжений показывает, что верхние и вертикальные листы стрелы и рукояти толщиной 20 мм имеют «излишние» запасы прочности, напряжение в них не превышает 40 МПа. Решено было заменить листы базовой конструкции на варианты меньшей толщины.

Рассмотрен вариант с параметрами рабочего оборудования. Стрела: нижние и верхние листы 10 мм (базовая 20), средние вертикальные продольные листы 40 мм (базовая 60), поперечные листы и трубы (за исключением передней трубы) 10 мм (базовая 20), передняя труба 25 (базовая 20). Рукоять: нижние, верхние листы, продольные вертикальные листы (за исключением средних) 10 мм (базовая 20), участки среднего продольного листа 40 (базовая 80) и 20 мм, поперечные листы и трубы 10 мм (базовая 20). Результат расчета напряжений при указанных параметрах приведены на Рис. 5.

При таких параметрах напряжение в верхних листах увеличилось до 90 МПа, что также значительно ниже допустимого напряжения для стали 09Г2С.

Суммарная масса стрелы, рукояти, гидроцилиндров и напорной штанги 7291 кг, у базовой конструкции 12463 кг.

Таким образом, в предлагаемой конструкции рабочего оборудования при задании указанных сечений элементов произойдет уменьшение массы на 5 т. При таком уменьшении можно уменьшить массу противовеса, что за счет снижения момента

инерции поворотной части позволить сократить время цикла или, оставив массу противовеса неизменной, увеличить вместимость ковша до величины, чтобы опрокидывающий момент стал равным опрокидывающему моменту базовой модели.

Расчетами получено, что вместимость ковша с 5,5 м³ базовой модели может быть увеличена до 5,84 м³, т.е. на 6%, соответственно, на столько же увеличится производительность экскаватора.

Заключение.

Исследованиями выявлены «излишние» запасы прочности у базовой модели и предложен вариант с уменьшением сечений элементов стрелы и рукоятки, за счет чего производительность по сравнению с базовой моделью экскаватором ЭГ-110 увеличится на 6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С. Проектирование карьерных экскаваторов. М. : Инновационное машиностроение, 2017. 228 с.
2. Побегайло П. А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. М. : ЛЕНАНД, 2014. 296 с.
3. Побегайло П. А. Создание методологии автоматизированного проектирования горных и строительных роботов-манипуляторов (на примере одноковшовых гидравлических экскаваторов) // Аналитическая механика, устойчивость и управление: труды XI Международной Четаевской конференции. Т. 4. Секция 4. Компьютерные технологии в науке, образовании, управлении производством. Казань, 13–17 июня 2017 г. Казань : КНИТУ-КАИ, 2017. С. 168–177.
4. Lukashuk O. A., Komissarov A. P., Letnev K. Y. Increasing power efficiency of open-pit excavators IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 709 (2). Статья № 022083.
5. Shestakov V., Bezkorovainyy P. and Franz T. Determination of the working area of a hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade” (UMD 2020). Ekaterinburg, Russia, April 2-11, 2020. Apakashev R., Simis-inov D. and Glebov A. (Eds.). 2020. Vol. 177. P. 100–104.
6. Le Q. H., Yang S.-Y. Study on the architecture of the remote control system for hydraulic excavator // Proc. on 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do. Korea (South), 26–29 Oct., 2011. P. 941–945.
7. Koivo A. J. [et al.] Modeling and Control of Excavator Dynamics During Digging Operation // Journal of Aerospace Engineering. 1996. Vol. 9. P. 10–18.
8. Frimpong S. [et al.] Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials // International Journal of Geomechanics. 2009. Vol. 8(1). P. 20–29.
9. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, 2007. 6 p.
10. Bradley D. A. [et al.] Artificial intelligence in the control and operation of construction plantthe autonomous robot excavator // Automation in Construction. 1993. Vol. 2(3). P. 217–228.
11. Gruening G. T., Kunze G., Katterfeld A. Simulating the working process construction machines // In: Bulk Solids Europe 2010. Glasgow, Scotland, 2010. 10 p.
12. Безкоровайный П. Г. Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Рабочее оборудование экскаватора // Патент на изобретение № RU 2 772 037 С1 E02F 3/30 (2006.01) // Патентообладатель: ФГБОУ «Уральский государственный горный университет». Заявка № 2021122144, дата регистрации в Государственном реестре изобретений РФ 16.05.2021, опубл. 16.05.2022. Бюл. № 14.
13. Безкоровайный П. Г., Шестаков В. С. Определение рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора с напорным звеном // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 1. С. 25–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35. EDN HMXSFD.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Шестаков Виктор Степанович, кандидат техн. наук, профессор, кафедра горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), Shestakov.v.s@mail.ru

Телиман Ирина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация», НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», (100027, Казахстан, г. Караганда, проспект Н. Назарбаева, 56).

Безкоровайный Павел Геннадьевич, аспирант ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), старший преподаватель, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», (100027, Казахстан, г. Караганда, проспект Н. Назарбаева, 56).

Заявленный вклад авторов:

Шестаков Виктор Степанович – постановка задачи оптимизации конструкции рабочего оборудования; разработка модели конструкции; анализ результатов.

Телиман Ирина Викторовна – постановка исследовательской задачи; написание текста.

Безкорвайный Павел Геннадьевич – постановка исследовательской задачи; обзор соответствующей литературы; выполнение расчетов, анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23

Viktor S. Shestakov ¹, Irina V. Teliman ², Pavel G. Bezkorovayny ^{1,2}

¹Ural State Mining University

²NAO Karaganda Technical University

*E-mail: Shestakov.v.s@mail.ru

INVESTIGATION OF THE LOADING OF HYDRAULIC EXCAVATOR WORKING EQUIPMENT



Article info

Received:

01 February 2024

Accepted for publication:

15 February 2024

Accepted:

01 March 2024

Published:

04 April 2024

Keywords: hydraulic excavator, boom, handle, bucket, pressure rod, hydraulic cylinder, force

Abstract.

The relevance of the work is determined by the need to increase the efficiency of hydraulic excavators, on which the cost of mining significantly depends. The purpose of the work is to improve the working equipment of a hydraulic excavator and develop a methodology for determining rational parameters that ensure a reduction in its weight. A scheme of working equipment is proposed with the exception of hydraulic cylinders for turning the boom in comparison with the traditional scheme and with a pressure mechanism with a pressure rod located on the superstructure on the axis of rotation. This scheme makes it possible to increase the capacity of the bucket and thereby the productivity of the excavator. A method for determining the design parameters of an excavator is presented, which ensures that the sections of the boom and arm are determined without “excessive” safety margins and thereby obtaining a minimum mass. At the same time, if you leave the tipping moment the same as that of the base model, then it will be possible to increase the capacity of the bucket and the productivity of the excavator. The EG-110 hydraulic excavator was taken as the base object used for comparison with the proposed design. The research results show the possibility of reducing the weight of working equipment by 5 tons and increasing productivity by 6%.

For citation: Shestakov V.S., Teliman I.V., Bezkorovayny P.G. Investigation of the loading of hydraulic excavator working equipment. Mining Equipment and Electromechanics, 2024; 1(171):18-23 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23, EDN: SOHHHJ

REFERENCES

1. Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. *Proyektirovaniye kar'yernykh ekskavatorov*. M.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye; 2017. 228 s.

2. Pobegaylo P.A. *Moshchnyye odnokovshovyye gidravlicheskiye ekskavatory: Vybor osnovnykh geometricheskikh parametrov rabocheho oborudovaniya na rannikh stadiyakh proyektirovaniya*. M.: LE-NAND; 2014. 296 s.

3. Pobegaylo P.A. *Sozdaniye metodologii avtomatizirovannogo proyektirovaniya gornykh i stroitel'nykh robotov-manipulyatorov (na primere odnokovshovykh gidravlicheskiykh ekskavatorov)*. *Analiticheskaya mek-*

hanika, ustoychivost' i upravleniye: trudy XI Mezhdunarodnoy Chetayevskoy konferentsii. T. 4. Sekciya 4. Komp'yuternye tekhnologii v nauke, obrazovanii, upravlenii proizvodstvom. Kazan', 13–17 iyunya 2017 g. Kazan': KNITU-KAI; 2017. S. 168–177.

4. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Letnev K.Y. Increasing power efficiency of open-pit excavators IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 709(2):022083.

5. Shestakov V., Bezkorovayny P. and Franz T. Determination of the working area of a hydraulic excavator. *E3S Web of Conferences. XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade”* (UMD 2020). Ekaterinburg,

Russia, April 2–11, 2020. Apakashev R., Simisinov D. and Glebov A. (Eds.). 2020; 177:100–104.

6. Le Q.H., Yang S.-Y. Study on the architecture of the remotecontrol system for hydraulic excavator. *Proc. on 11th International Conference on Control, Automation and Systems*. Gyeonggi-do, Korea (South). 26–29 Oct., 2011. P. 941–945.

7. Koivo A.J. [et al.] Modeling and Control of Excavator Dynamics During Digging Operation. *Journal of Aerospace Engineering*. 1996; 9:10–18.

8. Frimpong S. [et al.] Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials. *International Journal of Geomechanics*. 2009; 8(1):20–29.

9. Geu Flores F., Kecskemethy A., Pottker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers. *12th IFToMM World Congress*. Besancon, June 18-21, 2007. 6 p.

10. Bradley D.A. [et al.] Artificial intelligence in the control and operation of construction plantthe au-

tonomous robot excavator. *Automation in Construction*. 1993; 2(3):217–228.

11. Gruening G.T., Kunze G., Katterfeld A. Simulating the working process construction machines. *In: Bulk Solids Europe 2010*. Glasgow, Scotland, 2010. 10 p.

12. Bezkorovaynyy P.G. Komissarov A.P., Shestakov V.S. Rabocheye oborudovaniye ekskavatora. Patent na izobreteniyе № RU 2 772 037 S1 Ye02F 3/30 (2006.01). Patentoobladatel': FGBOU «Ural'skiy gosudarstvennyy gornyy universitet». Zayavka № 2021122144, data registratsii v Gosudarstvennom reyestre izobreteniy RF 16.05.2021, opubl. 16.05.2022 Byul. № 14.

13. Bezkorovaynyy P.G., Shestakov V.S. Opredeleniye ratsio-nal'nykh parametrov rabochego oborudovaniya gid-ravlicheskogo ekskavatora s napornym zvenom. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2023; 1:25–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35. EDN HMXSFD.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Viktor S. Shestakov, C. Sc. in Engineering. sciences, professor, ¹Ural State Mining University, (620144, Ekaterinburg, st. Kuibysheva, 30), e-mail: Shestakov.v.s@mail.ru

Irina V. Teliman, C. Sc. in Engineering, Department of "Technological equipment, mechanical engineering and standardization", NAO Karaganda Technical University, (100027, Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Ave., 56)

Pavel G. Bezkorovaynyy, Senior Lecturer, Department of Theoretical Mechanics, Ural State Mining University, (620144, Ekaterinburg, st. Kuibysheva, 30), NAO Karaganda Technical University, (100027, Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Ave., 56)

Contribution of the authors:

Viktor S. Shestakov – formulation of the task of optimizing the design of working equipment; development of a design model; analysis of the results.

Irina V. Teliman – setting a research task; writing a text.

Pavel G. Bezkorovaynyy – setting a research task; reviewing relevant literature; performing calculations, analyzing the results.

Author have read and approved the final manuscript.

