

Исследование устойчивости карьерного экскаватора с изменяемым положением кабины

Владимир Семенович ВЕЛИКАНОВ*,
Ольга Рашидовна ПАНФИЛОВА

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, Магнитогорск

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения визуальной информативности машиниста карьерного экскаватора при выполнении операций экскаваторного цикла за счет внедрения перспективного технического решения по изменению пространственного положения кабины относительно рабочего оборудования. Поворотная платформа карьерного экскаватора приводится в уравновешенное положение за счет выбора массы противовеса и компоновки на платформе всех механизмов. Реализация технического решения по изменению положением кабины определяет необходимость в оценке на устойчивость.

Цель работы: оценка устойчивости карьерного экскаватора с изменяемым положением кабины.

Методология исследования. Использован системный подход, включающий статический метод расчета одноковшовых карьерных экскаваторов, а также классических положений теоретической механики.

Результаты и их применение. Теоретически установлены расчетные значения коэффициента устойчивости для разных моделей карьерных экскаваторов. Произведены расчет массы противовеса, оценка уравновешенности поворотной платформы и устойчивости карьерного экскаватора ЭКГ-10.

Выводы. Доказана полная обоснованность принятого оригинального технического решения, так как полученные значения коэффициента устойчивости соответствуют нормативным требованиям, а именно, коэффициент устойчивости должен быть не менее 1,4, ПАО «Уралмашзавод». С использованием стандартных средств MS Excel получены расчетные значения коэффициента устойчивости для разных моделей карьерных экскаваторов, которые находятся в диапазоне 1,38–1,42. Представленное конструктивное решение позволит добиться увеличения фактической производительности экскаваторов на 10–15 %.

Ключевые слова: экскаватор, устойчивость, кабина, методика, эффективность.

Введение
Обзорность как один из наиболее важных показателей эргономичности оказывает значительное влияние на управляемость карьерного экскаватора. Подготовка оператора к принятию решений и его информационная поддержка напрямую находятся в непосредственной зависимости от значения показателя обзорности. В связи с этим несомненна актуальность исследований, посвященных совершенствованию карьерных экскаваторов в области улучшения обзорности и освещенности рабочего пространства, а также компоновки рабочего места оператора, поскольку эти факторы оказывают непосредственное влияние на управляемость машины [1, 2].

Качество обзора с рабочего места машиниста карьерного экскаватора зависит от ряда конструктивных характеристик модульной кабины, а именно:

- расположение кабины относительно кузова и стрелы экскаватора;
- размеры стекол;
- площадь остекления;
- количество и ширина перемычек между стеклами.

Показатели конструктивного совершенства, которые определяют условия работы оператора экскаватора, рассмотрены в ряде работ [1-6]. Доказано, что визуальная информативность производственной зоны и рабочего пространства оператора является весьма важной характеристикой. Установлен коэффициент обзора K_i , принимающий значения от 0 до 1 и являющийся мерой обзорности. Этот коэффициент устанавливается для каждого объекта наблюдения. Размер объекта наблюдения может характеризоваться его площадью для поверхностей или длиной для линий, а также может быть представлен в виде углового размера. Коэффициент обзора определяется как соотношение размеров видимой и полной (необходимой для обзора) поверхности или линии, принадлежащей заданному объекту наблюдения. Размеры некоторых объектов наблюдения весьма малы, в таком случае объект считается точечным. Коэффициент обзора для него равен единице при нахождении объекта в поле зрения оператора. При расположении точечного объекта вне поля зрения оператора коэффициент обзора равен нулю [1].


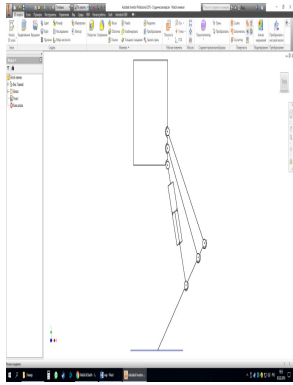

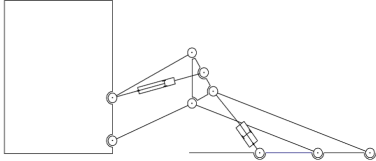

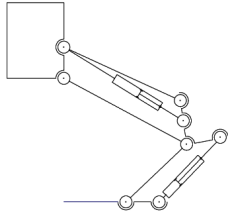
- Применительно к карьерным экскаваторам все объекты наблюдения можно разделить на две группы:
- объекты преимущественного наблюдения – забой, транспорт, ковш, рукоять и стрела экскаватора;
 - объекты периодического наблюдения – верхняя кромка забоя, пульт управления, гусеницы экскаватора.

Коэффициент обзора может быть увеличен с помощью изменения положения кабины относительно поворотной платформы экскаватора. Данное техническое решение в настоящее время применяется в конструкциях строительных экскаваторов малого класса с массой кабины до 0,5 т. Например, подвижными кабинами оснащены машины моделей МН3049, МН3059, 330D МН компании Caterpillar, модели EC480D с функцией Step Safe Cab концерна Volvo, перегружатели на базе пневмоколесных гидравлических строительных экскаваторов. Вопрос улучшения обзорности кабины карьерного экскаватора рассмотрен в публикации [1], в которой предложено оснащение машины подвижной кабиной. За счет конструкции, обеспечивающей вертикальное и горизонтальное перемещение кабины, обеспечивается более эффективное использование карьерного экскаватора. Элементы механизма перемещения кабины

*rizhik_00@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-558-2733>

Таблица 1. Известные механизмы подъема кабин.
Table 1. Known cab lifting mechanisms.

Тип оборудования	Общий вид	Кинематическая схема механизма изменения положения кабины
Hitachi ZX240LC-5G		
Volvo EC480D		
Caterpillar MH3049		

воспринимают нагрузки, обусловленные их собственным весом и весом кабины. Эти силы учтены при моделировании механизма, также модель предусматривает возможность варьирования массы и скорости подъема кабины.

Механизм изменения положения кабины карьерного экскаватора, состоит из опорного основания и подъемной платформы. На основании параллельно установлены два ножничных механизма. На подъемной платформе устанавливается модульная кабина. Ножничные механизмы представляют собой перекрещивающиеся рычаги и приводятся в движение гидроцилиндрами, установленными на подъемной платформе. Смонтированный в кабине выносной пульт управления позволяет осуществлять перемещение.

Использование в конструкции карьерного экскаватора механизма для горизонтального и вертикального перемещения кабины определяет необходимость в оценке уравновешенности и устойчивости машины.

Методология

Определение уравновешенности поворотной платформы и устойчивости экскаватора является целью статического расчета одноковшовых карьерных экскаваторов. Поворотная платформа уравновешивается за счет выбора противовеса необходимой массы и рационального расположения всех механизмов на ней [7-12].

Для расчета массы противовеса, устанавливаемого на карьерном экскаваторе, оборудованном прямой лопатой, рассматривают два расчетных положения:

1. Ковш находится на опорной поверхности (момент от веса рукояти и ковша отсутствует);
2. Ковш заполнен грузом и выдвинут на 2/3 вылета рукояти.

Первое расчетное положение в большинстве случаев обеспечивает устойчивость экскаватора. Для второго расчетного положения массу противовеса определяют из уравнения моментов относительно точки В (рис. 1) [13] по формуле:

$$m_{np} = \frac{G_c(r_c - R_0) + G_p r_p + G_{k+п} r_k - G_{II}(r_{II} + R_0)}{g(r_{np} + R_0)}$$

Уравновешенность поворотной части карьерных экскаваторов ПАО «Уралмашзавод» определяется из условия невыхода равнодействующей вертикальных сил при грузе в ковше, находящемся на максимальном вылете, за пределы роликового круга с запасом 8–10 %, именно при этих условиях определяется масса закладного противовеса.

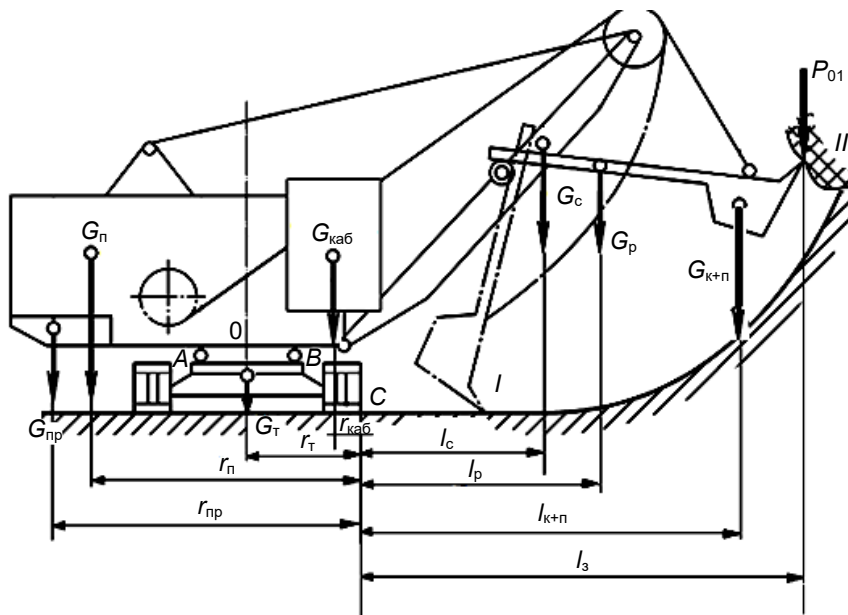


Рисунок 1. Схема для расчета устойчивости карьерного экскаватора с изменяемым положением кабины (крайние положения ковша). I-крайнее нижнее положение ковша; II-крайнее верхнее положение ковша.
Figure 1. Scheme for calculating the stability of a mine excavator with a variable cab position (extreme positions of the bucket). I- the lowest position of the bucket; II- the highest position of the bucket.

Способность опорной части карьерного экскаватора не опрокидываться и не сдвигаться относительно грунтового основания под действием внешних нагрузок, включающих силы тяжести составных частей экскаватора и груза в ковше, сопротивление копанию, силы инерции, характеризуется устойчивостью [7-14].

Коэффициент устойчивости служит численным выражением устойчивости карьерного экскаватора:

$$k_y = \frac{\sum M_y}{\sum M_{\text{опр}}} > 1,$$

где M_y – суммарный момент восстанавливающих (удерживающих) сил относительно ребра опрокидывания, Н × м; $M_{\text{опр}}$ – суммарный момент опрокидывающих сил относительно ребра опрокидывания, Н × м.

В современных методиках оценки устойчивости экскаваторов имеются существенные различия в подходах к учету видов усилий, которые влияют на величину восстанавливающих и опрокидывающих моментов.

1. Методика Правил Ростехнадзора предусматривает расчет устойчивости машины как в рабочем, так и в нерабочем состоянии.

2. Методика Ковровского экскаваторного завода предусматривает расчет коэффициента статической устойчивости только на основании моментов, создаваемых силой тяжести элементов конструкции экскаватора и груза в ковше.

3. Методика, предложенная ВНИИстройдормашем, дополнительно учитывает центробежные силы, действующие на элементы конструкции экскаватора при повороте платформы.

4. Методика Карасева–Живейнова заключается в проверке выполнения условия устойчивости для всех возможных положений экскаватора и его рабочего оборудования с опасным сочетанием нагрузок [7-12].

Как правило, для оценки устойчивости карьерного экскаватора с прямой лопатой рассматриваются четыре варианта нагружения [7-12]:

1. Отрыв препятствия, например, негабарита. Экскаватор установлен на горизонтальной поверхности, рабочее оборудование расположено перпендикулярно ходовому устройству, ковш без груза, на зубья ковша, расположенные на высоте напорного вала, действует максимальное усилие, стрела расположена под углом 45° к горизонту, подъемные канаты занимают вертикальное положение.

2. Стандартная работа экскаватора. Экскаватор установлен на горизонтальной поверхности, рабочее оборудование расположено перпендикулярно ходовому устройству, рукоять расположена горизонтально и максимально выдвинута, угол наклона стрелы к горизонту составляет 45°, ковш заполнен грузом, в подъемных канатах действует рабочее усилие, напорное усилие направлено к забою и составляет половину рабочего. Опрокидывающий и удерживающий моменты рассчитывают по формуле:

$$k_y = \frac{\sum M_y}{\sum M_{\text{опр}}} = \frac{G_{r_т} + G_{\text{пр}} r_{\text{пр}} + G_n r_n}{P_{01} l_з + G_{\text{к+п}} l_к + G_p l_p + G_c l_c},$$

где $G_{r_т}$, $G_{\text{пр}}$, G_n , $G_{\text{к+п}}$, G_p , G_c – вес ходовой тележки, противовеса, поворотной платформы, ковша с породой, рукояти, стрелы, кН, соответственно; P_{01} – расчетная сила сопротивления пород копанию, кН; $r_{r_т}$, $r_{\text{пр}}$, r_n , $l_з$, $l_к$, l_p , l_c – плечи действия сил, м, соответственно.

$$P_{01} = k_f E \times 10^3 (H_b k_p)^{-1},$$

где k_f – коэффициент сопротивления горных пород копанию, МПа; E – вместимость ковша экскаватора м³; H_b – высота напорного вала, м; k_p – коэффициент разрыхления горных пород.

Таблица 2. Массы узлов механической части карьерного экскаватора ЭКГ-10.
Table 2. Weight of nodes of the mechanical part of the EKG-10 mining excavator.

Наименование узла	Масса, т
Конструктивная масса машины без противовеса	350,0
Противовес	50,0
Поворотная платформа с оборудованием	154,0
Стрела в сборе	27,4
Рукоять	11,5
Ковш	16,2
Нижняя и гусеничная рамы	105,0
Кабина машиниста	5,3
Максимальная масса горной породы в ковше	25,0

Таблица 3. Координаты центров масс узлов экскаватора ЭКГ-10 относительно ребра опрокидывания.
Table 3. Coordinates of the centers of nodes weight of the ECG-10 excavator relative to the tipping edge.

Наименование элемента	Обозначение	Значение, м	Обозначение	Значение, м
Противовес	$X_{пр} (r_{пр})$	-10,3	$Y_{пр}$	0,5
Поворотная платформа с оборудованием	$X_{п} (r_{п})$	-5,5	$Y_{п.пл}$	3,1
Стрела в сборе	$X_{стр} (l_c)$	7,7	$Y_{стр}$	6,6
Рукоять	$X_{рук\ max} (l_p)$	9,2	$Y_{рук\ max}$	-
Ковш	$X_{гр\ max} (l_{к+п})$	12,2	$Y_{гр\ max}$	-
Нижняя и гусеничная рамы	$X_{т} (r_t)$	-3,5	$Y_{т}$	-
Кабина машиниста	$X_{каб} (r_{каб})$	-0,6	$Y_{каб}$	-
Горная порода в ковше	$X_{гр\ max} (l_{к+п})$	12,2	$Y_{гр\ max}$	-

3. Экскаватор движется вверх по уклону (транспортное положение). Рукоять полностью выдвинута, ковш находится у поверхности земли, стрела с канатно-блочным управлением располагается под минимальным (около 30°) углом к опорной поверхности.

4. Экскаватор движется по уклону вверх (транспортное положение). Рукоять расположена вертикально, стрела с канатно-блочным управлением располагается под максимальным углом к опорной поверхности.

Общая устойчивость карьерного экскаватора проверяется из условия невыхода равнодействующей вертикальных сил, включая усилия на зубьях ковша при копании, массу ходовой тележки и массу закладного противовеса, рассчитанного на уравновешенность поворотной части, за пределы опорного контура ходовой тележки. Как правило, коэффициент устойчивости составляет не менее 1,4, этого вполне достаточно.

Результаты

Расчет массы противовеса, оценка уравновешенности поворотной платформы и устойчивости карьерного экскаватора с изменяемым положением кабины произведены по известной методике, представленной в справочной литературе [8], с использованием стандартных средств «MS Excel». Исходные данные, а именно массы узлов механической системы карьерного экскаватора ЭКГ-10 (рис. 1, табл. 2), а также расположение центров масс основных элементов относительно ребра опрокидывания указаны в табл. 3 [13]. При необходимости линейные размеры L_i , м, элементов конструкции определяются в зависимости от массы карьерного экскаватора m_3 , т, и коэффициента пропорциональности k_i (принимается из справочной литературы) по эмпирическому выражению:

$$L_i = k_i \sqrt[3]{m_3}.$$

Использование стандартных средств «MS Excel» позволило получить следующие результаты для некоторых образцов карьерных экскаваторов.

Расчетные значения коэффициента устойчивости k_y : ЭКГ-5А – 1,38; ЭКГ-10 – 1,41; ЭКГ-12,5 – 1,43; ЭКГ-20А – 1,42.

Выводы

Исследование устойчивости карьерного экскаватора с изменяемым положением кабины позволило доказать полную обоснованность принятого технического решения, так как полученные расчетные значения коэффициента устойчивости соответствуют требованиям (коэффициент устойчивости должен быть не менее 1,4, ПАО «Уралмашзавод»). Подъемник кабины расширяет технологические возможности использования экскаваторов, что обуславливает практическую значимость предложенного технического решения. Улучшение показателей обзорности за счет внедрения предложенного устройства обеспечивает более полное использование эксплуатационных возможностей машины, что повышает эффективность выполнения технологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Velikanov V. S., Kozyr A. V., Dyorina N. V. Engineering implementation of view objectives in mine excavator design // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1592–1596. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.683>
2. Шабанов А. А., Великанов В. С. Оценка одиночных и групповых эргономических показателей горнотранспортного оборудования на основе нечетких моделей // ГИАБ. 2011. Отд. вып. № 5. Горный инженер-2. Перспективы развития горнотранспортного оборудования. С. 326–332.
3. Ayane N., Gudadhe M. Review study on improvement of overall equipment effectiveness in construction equipments // Int. J. Eng. Dev. Res. 2015. Vol. 3, issue 2. P. 487–490. <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1502091.pdf>
4. Chen J., Yu S., Wang S., Lin Z., Liu G., Deng L. Aircraft cockpit ergonomic layout evaluation based on uncertain linguistic multiattribute decision making // Advances in Mechanical Engineering. 2014. <https://doaj.org/article/1af0395a59cb4577a477c26cad313a85>
doi: 10.1155/2014/698159
5. Le Q. H., Lee J. W., Yang S. Y. Remote control of excavator using head tracking and flexible monitoring method // Automation in Construction. 2017. Vol. 81. P. 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.015>
6. Ayane N., Gudadhe M. Review study on improvement of overall equipment effectiveness in construction equipments // Int. J. Eng. Dev. Res. 2015. Vol. 3, issue 2. P. 487–490. <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1502091.pdf>
7. Казаченко Г. В., Басалай Г. А. Способ оценки устойчивости одноковшовых экскаваторов // ГИАБ. 2014. № 3. С. 89–96.
8. Буряк Е. С. Горные машины и оборудование: методические указания к расчетно-практическим занятиям. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2015. 53 с.
9. Холявко А. А., Капралов П. А., Буева А. А. Устойчивость экскаватора // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилей. всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию образования Красноярского края. Красноярск, 2014. С. 208–209.
10. Семенов А. В., Вахрушев С. И. Исследование устойчивости одноковшовых экскаваторов // Master's Journal. 2016. № 2. С. 424–434.
11. Гуров М. Ю., Смирнова О. Г. Использование анкеров для крепления опор деррик-кранов // Сб. науч. тр., посвящ. 75-летию со дня рождения первого заведующего кафедрой «Строительно-дорожные машины» д. т. н., профессора Янцена И. А. Караганда: Болашак-Баспа, 2010. С. 140–145.
12. Liu L., Zhou Y., Mi Y., Lu D., Chen Y. Performance parameter optimization of excavator cab shock absorbers based on Kriging method // Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition). 2015. Vol. 36(5). P. 497–503. <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1671-7775.2015.05.001>
13. И3-Картекс им. П. Г. Коробкова. Брошюры с техническими характеристиками. <http://iz-kartex.com/karemyie-ekskavatory>
14. Тураев Х. Т., Урунбаев Э. Автоматизация исследования устойчивости движения колесно-транспортных машин: программа. Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 001100305. Ташкент: ГКНТ Республики Узбекистан, Государственное патентное ведомство.
15. Прокопенко В. С., Решетов А. В. Совершенствование одноковшового экскаватора // Международная научно-практическая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. 2015. С. 846–849.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2019 года

Study of the stability of a mine excavator with a variable cab position

Vladimir Semenovich VELIKANOV*,
Olga Rashidovna PANFILOVA

Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Russia, Magnitogorsk

Relevance of the work is due to the need to increase the visual informativeness of the mine excavator driver during the excavation cycle operations with the help of a promising technical solution for changing the spatial position of the cab relative to the working equipment. The revolving platform of the mine excavator is brought into a balanced position due to the choice of the mass of the counterweight and the arrangement of all mechanisms on the platform. The implementation of a technical solution for changing the position of the cab determines the need for stability assessment.

Purpose of the work: stability assessment of a mine excavator with a variable cab position.

Methodology of research. The systems approach was used, including the static method for calculating single-bucket mine excavators, as well as the classical principles of the theoretical mechanics.

Results and their application. Theoretically, the calculated values of the stability coefficient for different models of mine excavators are determined. The counter-weight mass was calculated, the balance of the revolving platform and the stability of the EKG-10 mining excavator were estimated.

Conclusions. The full validity of the original technical solution was proved, since the obtained values of the stability coefficient comply with regulatory requirements, namely, the stability coefficient must be at least 1.4, PAO Uralmashzavod. Using standard MS Excel tools, the calculated values of the stability coefficient for different models of mine excavators are obtained, which are in the range of 1.38-1.42. The presented constructive solution will allow increasing the actual productivity of excavators by 10-15%.

Keywords: excavator, stability, cab, technique, efficiency.

REFERENCES

1. Velikanov V. S., Kozyr A. V., Dyorina N. V. 2017, Engineering implementation of view objectives in mine excavator design. Procedia Engineering. Vol. 206. P. 1592-1596. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.683>
2. Shabanov A. A., Velikanov V. S. 2011, Evaluation of single and group ergonomic indicators of mining equipment based on fuzzy models. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining informational and analytical bulletin], Special issue No 5, Mining Engineer-2. Prospects of development of mining transport equipment. P. 326-332. (In Russ.)
3. Ayane N., Gudadhe M. 2015, Review study on improvement of overall equipment effectiveness in construction equipments. Int. J. Eng. Dev. Res. Vol. 3, issue 2. P. 487-490. <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1502091.pdf>
4. Chen J., Yu S., Wang S., Lin Z., Liu G., Deng L. 2014, Aircraft cockpit ergonomic layout evaluation based on uncertain linguistic multiattribute decision making. Advances in Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.amep.2014.07.005>
5. Le Q. H., Lee J. W., Yang S. Y. 2017, Remote control of excavator using head tracking and flexible monitoring method. Automation in Construction. Vol. 81. P. 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.015>
6. Ayane N., Gudadhe M. 2015, Review study on improvement of overall equipment effectiveness in construction equipments. Int. J. Eng. Dev. Res. Vol. 3, issue 2. P. 487-490. <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1502091.pdf>
7. Kazachenko G. V., Basalay G. A. 2014, Method of assessment of stability of single-bucket excavators. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining informational and analytical bulletin], No 3. Pp. 89-96. (In Russ.)
8. Buryak E. S. 2015, Gornyye mashiny i oborudovaniye [Mining machinery and equipment], guidelines for practical studies. Arkhangel'sk, 53 p.
9. Holyavko A. A., Kapralov P. A., Bueva A. A. 2014, Ustoychivost' ekskavatora [Excavator stability], Youth and Science: book of reports of the X Anniversary All-Russian scientific and technical conference dedicated to the 80th anniversary of the formation of the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk. P. 208-209.
10. Semenov A. V., Vakhrushev S. I. 2016, Research of stability of single-bucket excavators. Master's Journal. No 2. P. 424-434.
11. Gurov M. Yu., Smirnova O. G. 2010, Ispol'zovaniye ankerov dlya krepleniya opor derrick-kranov [The use of anchors for fastening derrick-crane supports]. Book of reports dedicated to the 75th anniversary of the first head of the department "Building and road machines", Doctor of Technical Sciences, Professor Yantsen I. A. Karaganda, Bolashak Baspa. P. 140-145.
12. Liu L., Zhou Y., Mi Y., Lu D., Chen Y. 2015, Performance parameter optimization of excavator cab shock absorbers based on Kriging method. Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition). Vol. 36(5). P. 497-503. <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1671-7775.2015.05.001>
13. Iz-Kartex named after P.G. Korobkov. Brochures with technical specifications. <http://iz-kartex.com/karernyye-ekskavatory>
14. Turaev Kh. T., Urumbaev E. Avtomatizatsiya issledovaniya ustoychivosti dvizheniya kolesno-transportnykh mashin [Automation of research of movement stability of wheeled transport vehicles], program. Certificatethe of official registration of the computer program No 001100305, State committee for science and technology of the Republic of Uzbekistan, State Patent Office.
15. Prokopenko V. S., Reshetov A. V. 2015, Sovershenstvovaniye odnokovshovogo ekskavatora [Improvement of one-bucket excavator]. International Scientific and Practical Conference of Young Scientists of BSTU named after. V. G. Shukhov. P. 846-849.

The article was received on October 10, 2019

✉ rizhik_00@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-558-2733>