

УДК 622.277:621.927

Безкорвайный Павел Геннадьевич¹, ст. преп., **Шестаков Виктор Степанович**², проф., канд. техн. наук

¹Карагандинский государственный технический университет, 100027 Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56.

²Уральский государственный горный университет, 620144 Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ НАГРУЗОК НА РАБОЧЕМ ОБОРУДОВАНИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ КОПАНИИ КРАЙНИМ ЗУБОМ

Аннотация: *Актуальность работы обусловлена потребностью конструкторских отделов, занимающихся проектированием гидравлических экскаваторов в методиках, позволяющих снизить массы экскаваторов при обеспечении в то же время надежности и требуемых технологических возможностей.*

Цель работы: *разработка математического описания для расчета усилий в элементах рабочего оборудования при копании одной стороной ковша.*

Результаты. *Для гидравлического экскаватора с рабочим оборудованием «прямая лопата» разработана математическая модель расчета усилий при копании одной стороной ковша (все усилие на крайний зуб), алгоритм и программа на алгоритмическом языке, позволяющие определять возможные усилия в элементах рабочего оборудования. Значения усилий могут быть использованы для расчета напряженно-состояния рабочего оборудования и подбора рациональных сечений элементов рабочего оборудования.*

Выводы. *Составленное математическое описание позволяет учитывать изменение усилий при копании одной стороной ковша по сравнению с усилиями при копании всеми зубьями.*

Ключевые слова: *система технического обслуживания и ремонта, экскаватор, планово-предупредительный ремонт, эффективность.*

Информация о статье: принята 12 октября 2020 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-3-8

Решение задач исследования

Совершенствованию конструкций и исследованию рабочего процесса гидравлических экскаваторов посвящено большое количество исследований [1-10], но в них рассматривалось копание всей режущей кромкой ковша, при котором на ковш действует симметричная нагрузка. Для такого варианта составлена математическая модель расчета усилий [11].

При копании в карьерах возможны случаи, когда при встрече не взорванного массива горной породы, усилие от гидроцилиндров рабочего оборудования передается через один зуб ковша – это наиболее неблагоприятный случай для нагрузки рабочего оборудования. На ковше, рукояти и стреле от внецентренного приложения усилия возникает крутящий момент. Таким образом, к действующим изгибающим моментам от усилий гидроцилиндров добавляются крутящие моменты от несимметричного нагружения ковша, что должно учитываться при расчетах на прочность и при подборе сечений элементов.

На рис. 1 приведена схема к составлению математической модели при передаче усилий на массив породы через один крайний зуб.

Возможное усилие на зубе ковша зависит от максимальных усилий на штоках гидроцилиндров рабочего оборудования, от масс, линейных размеров и координат положения элементов рабочего оборудования, а также от положения в забое вершины зуба ковша, через который передается усилие на горную породу. Поэтому в методике расчета усилий должны присутствовать выражения для расчета координат зубьев ковша в забое и координат всех шарниров рабочего оборудования.

Особенностью рабочего процесса гидравлического экскаватора по сравнению с канатными является то, что возможное усилие на зубьях ковша определяется не одним гидроцилиндром (или двумя, если механизм включает два параллельных гидроцилиндра), а работой всех гидроцилиндров рабочего оборудования с учетом еще и устойчивости экскаватора. Копание возможно поворотом ковша, поворотом рукояти и

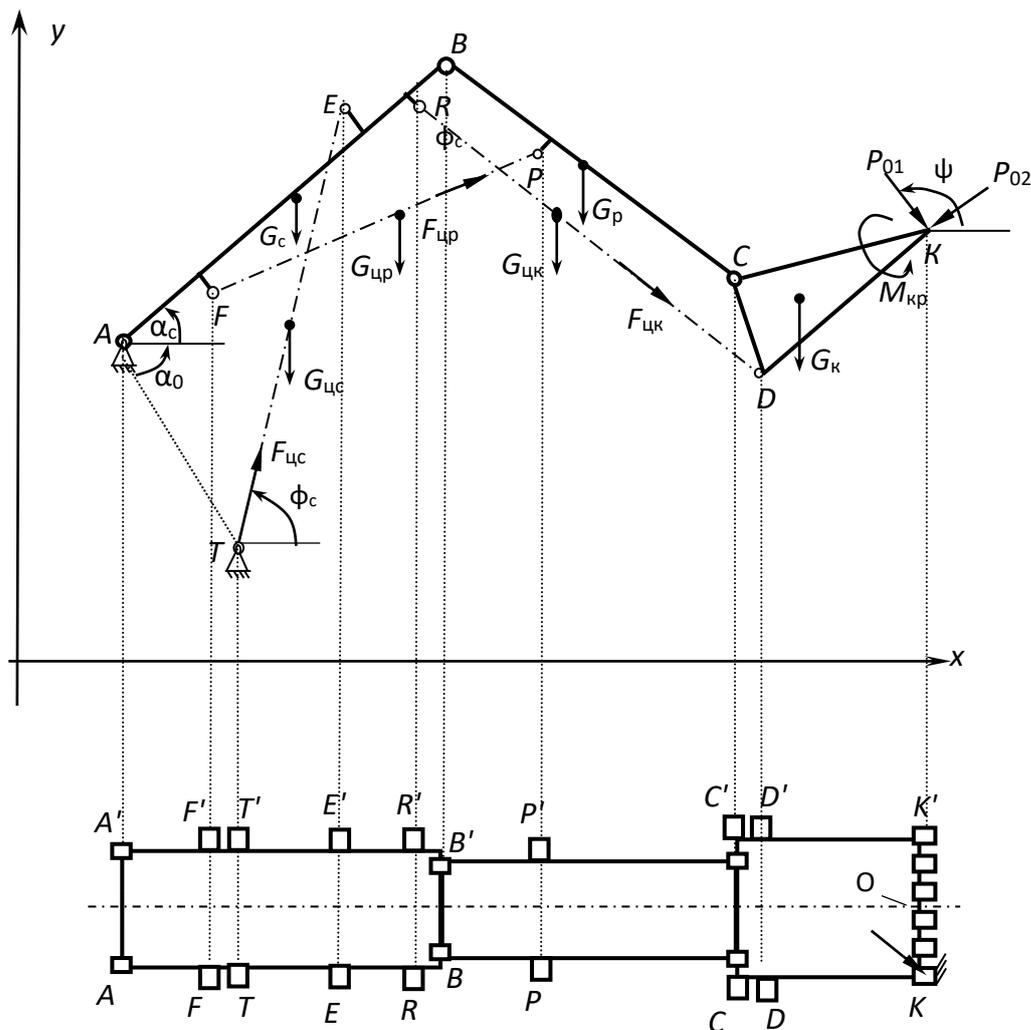


Рис. 1. Схема рабочего оборудования:

A, T, E, F, P, R, B, C, D – шарниры; K – вершина зуба ковша; KCD – схема профиля ковша; CB – рукоять; AB – стрела; TE, FP, RD – гидроцилиндры поворота стрелы, руко-яти и ковша; $G_c, G_r, G_k, G_{цс}, G_{цр}, G_{цк}$ – силы тяжести стрелы, рукояти, ковша, гидроци-линдров стрелы, рукояти, ковша стрелы, рукояти, ковша; $\alpha_c, \alpha_0, \phi_c, \psi$ – углы

поворотом стрелы соответствующими гидроцилиндрами, а также сочетанием этих способов. Но даже если реализуется только один из указанных способов, например, поворотом ковша, все равно при расчете усилий на ковше необходимо рассматривать работу всех гидроцилиндров, а также устойчивость экскаватора.

При копании поворотом ковша рукоять и стрела должны быть неподвижны и удерживаться соответствующими гидроцилиндрами. Неподвижность стрелы и рукояти обеспечивается, если возможное максимальное реактивное усилие на штоках гидроцилиндров, которое определяются рабочей площадью и давлением настройки предохранительных клапанов, превышает значение реакции на этом гидроцилиндре от усилия на зубьях ковша [11].

Если же максимальное реактивное усилие гидроцилиндра будет недостаточным для удержания стрелы или рукояти, то произойдет «просадка» штоков соответствующих

гидроцилиндров и усилие на зубьях ковша снизится. Такое же произойдет при других вариантах копания.

Неподвижность стрелы и рукояти должны также обеспечиваться и неподвижностью платформы экскаватора, т. е. устойчивостью экскаватора. Если при определенном значении усилия на зубьях ковша начнется поворот платформы экскаватора вместе с ходовой тележкой относительно поверхности грунта, то это приведет так же к снижению усилия копания.

В алгоритме расчета усилий такая особенность рабочего процесса должна быть реализована.

В приведенных ниже формулах математической модели линейные размеры указываются точками схемы (рис. 1), углы - знаком угла и тремя символами обозначения отрезков расчетной схемы, координаты то-чек – символами x и y с обозначениями точки, для расстояния между осями шарниров гидроцилиндров введено обозначение L с

символами «цс», «цр», «цк» соответственно для стрелы, рукоятки и ковша.

Угол наклона линии AB к горизонту по расстоянию между шарнирами цилиндра стрелы $L_{цс}$

$$\alpha_c = \arccos \frac{AE^2 + AT^2 - L_{цс}^2}{2 \cdot AE \cdot AT} - \angle_{BAE} - \alpha_0.$$

Координаты оси шарнира "стрела-рукоять" (точка B)

$$x_B = x_A + AB \cdot \cos \alpha_c; \quad y_B = y_A + AB \cdot \sin \alpha_c.$$

Координаты точек рукоятки определяются относительно точки B по углу, определенному по длине гидроцилиндра рукоятки $L_{цр}$ (отрезок FP на рис. 1):

$$\beta = \pi + \alpha_c - r \cos \frac{BF^2 + BP^2 - L_{цр}^2}{2 \cdot BF \cdot BP} - \angle_{BFF} - \angle_{PBP}$$

$$x_C = x_B + BC \cdot \cos \beta; \quad y_C = y_B + BC \cdot \sin \beta.$$

Координаты вершины зуба ковша по длине гидроцилиндра ковша $L_{цк}$ ковша:

$$\gamma = \beta - \pi - \angle_{RCR'} + \angle_{DCR};$$

$$\angle_{DCR} = \arccos \frac{CD^2 + CR^2 - L_{цк}^2}{2 \cdot CD \cdot CR};$$

$$x_K = x_C + CK \cdot \cos(\gamma + \angle_{DCK});$$

$$y_K = y_C + CK \cdot \sin(\gamma + \angle_{DCK}).$$

При расчете возможных усилий копания на зубьях ковша учитываются силы тяжести элементов.

Для расчета усилий на штоках гидроцилиндров используются условия равновесия относительно шарниров C , B и A .

$$F_{цс} = \frac{G_c(x_{цс} - x_A) + G_p(x_{цр} - x_A) + G_k(x_{цк} - x_A) + G_{цс} \left(\frac{x_r + x_e}{2} - x_A \right) + G_{цр} \left(\frac{x_r + x_p}{2} - x_A \right) + G_{цк} \left(\frac{x_r + x_d}{2} - x_A \right) + P_y(x_k - x_A) + P_x(y_k - y_A)}{L_{AT} \sin(\pi - \alpha_0 - \varphi_c)};$$

$$F_{цр} = \frac{G_p(x_{цр} - x_B) + G_c(x_{цс} - x_B) + G_{цк} \left(\frac{x_r + x_d}{2} - x_B \right) + P_y(x_k - x_B) + P_x(y_k - y_B) + 0,5G_{цр}(x_p - x_B)}{L_{BP} \sin \angle FPB};$$

$$F_{цк} = \frac{G_k(x_{цк} - x_C) + P_y(x_k - x_C) + P_x(y_k - y_C) - 0,5G_{цк}(x_d - x_C)}{L_{CD} \sin \angle RDC},$$

где $F_{цс}$, $F_{цр}$, $F_{цк}$ – усилия на штоках гидроцилиндров стрелы, рукоятки и ковша;

$$P_x = -P_{01} \cos \psi - P_{02} \sin \psi,$$

$P_y = -P_{01} \sin \psi + P_{02} \cos \psi$ – проекции усилия сопротивления копанию; P_{01} , P_{02} – нормальная и касательная составляющие усилия сопротивления копанию на зубьях ковша.

В известных методиках [12] P_{02} определяется по коэффициенту $k_{тр}$ ($k_{тр} = 0, 1, 0, 2$)

$$P_{02} = k_{тр} P_{01}$$

Усилие копания P_0

$$P_0 = (P_{01}^2 + P_{02}^2)^{0,5}$$

Подбор рациональных сечений элементов рабочего оборудования по условию прочности выполняются обычно с использованием специальных компьютерных систем отдельно для стрелы, рукоятки и ковша. Для этих элементов составляется модель конструкции, к которой прикладываются действующие нагрузки. Наряду с усилиями от гидроцилиндров будут действовать реакции в шарнирах.

Реакции в шарнире "пята стрелы – платформа" (точка A) при копании всеми зубьями ковша

$$R_{Ax} = -F_{цс} \cos \alpha_c - P_x$$

$$R_{Ay} = -F_{цс} \sin \alpha_c - P_y + G_k + G_p + G_c + G_{цк} + G_{цр} + 0,5G_{цк}$$

Реакции в шарнире "стрела – рукоять" (точка B) при копании

$$R_{Bx} = -F_{цр} \cos \varphi_p - P_x$$

$$R_{By} = -F_{цр} \sin \varphi_p - P_y + G_k + G_p + G_{цк} + 0,5G_{цр}$$

Реакции в шарнире "рукоять – ковш" (точка C) при копании

$$R_{Cx} = -F_{цк} \cos \varphi_k - P_x \quad (7)$$

$$R_{Cy} = -F_{цк} \sin \varphi_k - P_y + G_k + 0,5G_{цк}$$

В математической модели приведены выражения расчета усилий и реакций при действии равномерно распределенных по всем зубьям рабочих усилий

При варианте копания одной стороной ковша вся нагрузка приходится на крайний зуб при этом дополнительно появляется крутящий момент. Для расчета дополнительного крутящего момента воспользуемся теоремой о параллельном переносе силы (лемма Пуансо), в которой сила от крайнего зуба перемещается в точку на оси симметрии (на расстояние KO по рис. 1) и добавляется крутящий момент. Крутящий момент на ковше при перемещении усилия копания P_0 на ось симметрии

$$M_{кр} = P_0 \times KO$$

где KO – половина ширины ковша по зубьям.

Этот крутящий момент воспринимается парой сил в шарнирах крепления ковша к рукоятки CC' . Восприятие крутящего момента парами гидроцилиндров можно не учитывать ввиду податливостью шарниров гидроцилиндров в плоскости действия крутящего момента.

Дополнительные от крутящего момента реакции в шарнире C

$$F_{с.Мкр} = M_{кр}/CC'$$

Дополнительные от крутящего момента реакции в шарнире B

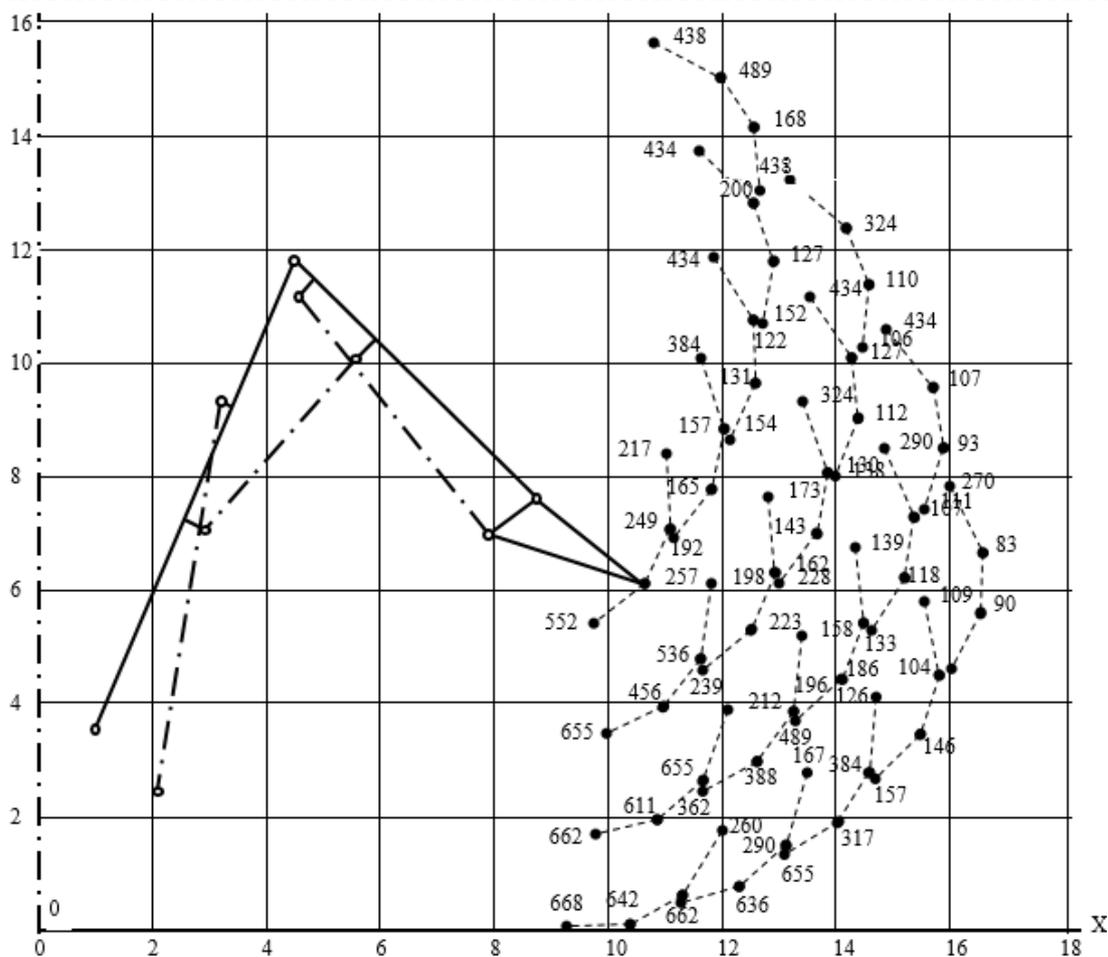


Рис. 2. Результаты расчета усилий.

$$F_{В.Мкр} = M_{кр}/BB'$$

Дополнительные от крутящего момента реакции в шарнире А

$$F_{В.Мкр} = M_{кр}/BB'$$

Дополнительные реакции действуют в плоскости параллельной плоскости действия крутящего момента, реакции же при режиме копания определены в глобальной системе координат экскаватора, поэтому такую особенность необходимо учитывать при расчетах напряжений в элементах рабочего оборудования. Направление действий и разложение крутящего момента необходимо учитывать при расчете проушин.

Рассмотренная выше особенность взаимодействия механизмов при копании приводит к сложностям при расчетах – нельзя задавать максимальные усилия всем гидроцилиндрам и по ним определять действующие усилия во всех элементах рабочего оборудования. Для расчета усилий нами составлен алгоритм поиска допустимых решений.

Для получения значений усилий во всех возможных точках рабочей зоны составлена имитационная модель рабочего процесса, которая реализована в виде программы для ЭВМ на алгоритмическом языке.

Расчет копания во всех точках рабочей зоны реализован тремя циклами. В первом цикле обеспечено

дискретное выдвигание штоков гидроцилиндров стрелы от минимального до максимального значения, что обеспечивает поворот стрелы относительно пяты и перемещение оси «стрела-рукоять». Во втором цикле для каждого положения стрелы первого цикла реализовано дискретное выдвигание штоков гидроцилиндров рукояти, что обеспечивает поворот рукояти и перемещение ковша в точку копания. Во внутреннем цикле для каждого положения рукояти реализовано дискретное выдвигание штоков гидроцилиндров ковша и за счет этого копание поворотом ковша.

Для расчета возможных усилий в каждой точке рабочей зоны забоя на зубьях ковша и на штоках всех гидроцилиндров в алгоритме первоначально задается усилие на зубьях ковша P_0 заведомо большее возможного для рассматриваемого экскаватора. По этому усилию определяется усилие на штоках гидроцилиндров ковша, рукояти и стрелы, а также выполняется проверка на устойчивость. Если хотя бы одно из усилий на штоках окажется больше максимального усилия соответствующего гидроцилиндра, или нарушится устойчивость экскаватора, то уменьшается усилие на зубьях ковша и повторяется расчет. Таким последовательным уменьшением усилий на зубьях определяется возможное усилие копания в каждой точке рабочей зоны с учетом ограничений

по усилиям гидроцилиндров и устойчивости экскаватора.

В составленной на алгоритмическом языке программе результаты выводятся в табличной и графической форме. Варианты расчетов для гидравлического экскаватора с ковшом вместимостью 4 м³ при копании всеми зубьями ковша на рис. 2. Программа обеспечивает поиск максимальных усилий в шарнирах и на штоках гидроцилиндров, которые необходимы при расчетах максимальных напряжений для стрелы, рукоятки и ковша.

По сравнению с вариантом копания всеми зубьями ковша при варианте копания одной стороной ковша происходит увеличение усилий в шарнирах А в некоторых точках копания на 36 %, в шарнире В – на 24 %, в шарнире 34 %. Это увеличение зависит от ширины ковша, расстояний между шарнирами стрелы, рукоятки и ковша.

Таким образом, доля от крутящего момента при копании одной стороной ковша достаточно значима, такой вариант нагружения необходимо учитывать при расчетах на прочность.

Заключение.

1. Составленное математическое описание процесса копания и алгоритм расчета возможного усилия на зубьях ковша позволяют определять усилия во всех звеньях рабочего оборудования как при копании всей режущей кромкой ковша, та и при копании одной стороной ковша.

2. Дополнительные нагрузки при копании одним крайним зубом должны учитываться при расчете напряжений в элементах рабочего оборудования, которые используются при подборе сечений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Побегайло П.А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. – М.: ЛЕ-НАНД,– 296 с. (2014).

2. Комиссаров А.П. и др. Обоснование рабочей характеристики карьерного экскаватора / Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Лукашук О.А., Телиман И.В. // Горное оборудование и электромеханика, 2017. № 2., С. 7-10.

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. Комиссаров А.П. и др. Соотношения активных и реактивных нагрузок в механизмах рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С., Телиман И.В. // Горное оборудование и электромеханика, 2018. № 1. С. 7-10

5. Le Q.H. Study on the architecture of the remote control system for hydraulic excavator / Le Quang Hoan, Yang Soon-Yong // Proc. on 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea (South), 26–29 Oct.,– P. 941–945. (2011)

6. Koivo A.J. Modeling and Control of Excavator Dynamics During Digging Operation / A.J. Koivo, M. Thoma, E. Kocaoglan, J. Andrade-Cetto // Journal of Aerospace Engineering.. – Vol. 9, P. 10–18 (1996).

7. Bradley D.A. Artificial intelligence in the control and operation of construction plantthe autonomous robot excavator / D.A. Bradley, D.W. Seward, J.E. Mann, M.R. Goodwin // Automation in Construction.– Vol. 2(3). – P. 217 - 228 (1993).

8. Frimpong S. Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials / S. Frimpong, Y. Hu, H. Inyang // International Journal of Geomechanics. – Vol. 8, 1. – P. 20–29 (2009).

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, 6 p. (2007)

10. Машины для земляных работ: Учеб. для вузов /Д.П. Волков, В.Я. Крикун, П.Я. Тотолин и др.; Под ред. Д.П. Волкова. – Машиностроение, 1992. – 448 с.

11. Victor Shestakov, Pavel Bezkorovainyy and Tatyana Franz. Determination of the working area of a hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. Vo. 177 (2020). XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade” (UMD 2020). Ekaterinburg, Russia, April 2-11, 2020, P. 100-104

12. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Проектирование карьерных экскаваторов. М.: Инновационное машиностроение, 2017 – 228 с.

Pavel G. Bezkorovainyy¹ senior lecturer, **Viktor S. Shestakov**² C. Sc. in Engineering, professor

¹Karaganda State Technical University, 100027 Kazakhstan, Karaganda, Nursultan Nazarbayev Ave., 56.

²Ural State Mining University, 620144 Russian Federation, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

CHANGE OF LOADS ON WORKING EQUIPMENT HYDRAULIC EXCAVATOR WHEN DIGGING WITH THE EDGE TOOTH

Abstract: *The relevance of the work is due to the need of design departments engaged in the design of hydraulic ex-cavators in methods that allow to reduce the mass of excavators while ensuring at the same time reliability and the required technological capabilities.*

Purpose of the work: *development of a mathematical description for calculating the efforts in the elements of the working equipment when digging with one side of the bucket.*

Results. *For a hydraulic excavator with "front shovel" working equipment, a mathematical model has been developed for calculating the forces when digging with one side of the bucket (all the effort is on the extreme tooth), an algorithm and a program in algorithmic language that allow you to determine possible forces in the elements of the working equipment. The values of the efforts can be used to calculate the stress state of the working equipment and the selection of rational sections of the working equipment elements.*

Conclusions. *The compiled mathematical description allows you to take into account the change in the efforts when digging with one side of the bucket compared to the efforts when digging with all teeth.*

Keywords: *hydraulic excavator, digging, working equipment, boom, stick, bucket, hydraulic cylinder, force, model.*

Article info: received October 12, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-3-8

REFERENCES

1. Pobegaylo P.A. Moshchnyye odnokovshovyye gidravlicheskiye ekskavatory: Vybor osnovnykh geometricheskikh parametrov rabochego oborudovaniya na rannikh stadiyakh proyektirovaniya. – M.: LENAND,– 296 s. (2014).

2. Komissarov A.P. i dr. Obosnovaniye rabochey kharakteristiki kar'yernogo ekskavatora / Komissarov A.P., Lagunova YU.A., Lukashuk O.A., Teliman I.V. // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika, 2017. № 2., S. 7-10.

3. Pobegaylo P. A. Sozdaniye metodologii avtomatizirovannogo proyektirovaniya gornyykh i stroitel'nykh robotov-manipulyatorov (na primere odnokovshovykh gidravlicheskiy ekskavatorov) / Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost' i upravleniye: trudy XI Mezhdunarodnoy Chetayevskoy konferentsii. T. 4. Sektsiya 4. Komp'yuternyye tekhnologii v nauke, obrazovanii, upravlenii proizvodstvom. Kazan', 13—17 iyunya 2017 g. — Kazan': KNITUKAI, 2017. — S. 168—177.

4. Komissarov A.P. i dr. Sootnosheniya aktivnykh i reaktivnykh nagruzok v mekhanizmax rabochego oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora // Komissarov A.P., Lagunova YU.A., Shestakov V.S., Teliman I.V. // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika, 2018. № 1. S. 7-10

5. Le Q.H. Study on the architecture of the remote control system for hydraulic excavator / Le Quang Hoan, Yang Soon-Yong // Proc. on 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea (South), 26–29 Oct.,– P. 941–945. (2011)

6. Koivo A.J. Modeling and Control of Excavator Dynamics During Digging Operation / A.J. Koivo, M. Thoma, E. Kocaoglan, J. Andrade-Cetto // Journal of Aerospace Engineering.. – Vol. 9, P. 10–18 (1996).

7. Bradley D.A. Artificial intelligence in the control and operation of construction plantthe autonomous robot excavator / D.A. Bradley, D.W. Seward, J.E. Mann, M.R. Goodwin // Automation in Construction.– Vol. 2(3). – P. 217 - 228 (1993).

8. Frimpong S. Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials / S. Frimpong, Y. Hu, H. Inyang // International Journal of Geomechanics. – Vol. 8, 1. – P. 20–29 (2009).

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, 6 p. (2007)

10. Mashiny dlya zemlyanykh rabot: Ucheb. dlya vuzov /D.P. Volkov, V.YA. Krikun, P.YA. Totolin i dr.; Pod red. D.P. Volkova. – Mashinostroyeniye, 1992. – 448 s.

11. Victor Shestakov, Pavel Bezkorovainyy and Tatyana Franz. Determination of the working area of a hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. Vo. 177 (2020). XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade” (UMD 2020). Ekaterinburg, Russia, April 2-11, 2020, P. 100-104

12. Komissarov A.P., Lagunova YU.A., Shestakov V.S. Proyektirovaniye kar'yernyykh ekskavatorov. M.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2017 - 228 s..

Библиографическое описание статьи

Безкоровайн П.Г., Шестаков В.С. Изменение нагрузок на рабочем оборудовании гидравлического экскаватора при копании крайним зубом // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 5 (151). – С. 3-8.

Reference to article

Bezkorovainy P.G., Shestakov V.S. Change in loads on the working equipment of a hydraulic excavator when digging with an extreme tooth Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.5 (151), pp. 3-8.