

**Безкорвайный Павел Геннадьевич**<sup>1,2</sup>, ст. преп., аспирант, **Шестаков Виктор Степанович**<sup>2</sup>, проф., канд. техн. наук, **Нестеров Валерий Иванович**<sup>3</sup>, доктор техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Карагандинский государственный технический университет, 299000, Казахстан, г. Караганда, ул. Курчатова, 7

<sup>2</sup>Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

<sup>3</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

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

---

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА**

---



### **Информация о статье**

Поступила:

13 ноября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

03 декабря 2021 г.

### **Ключевые слова:**

гидравлический экскаватор, копанье, рабочее оборудование, стрела, рукоять, ковш, гидроцилиндр, усилие, модель, напряжение, оптимизация

### **Аннотация.**

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности гидравлических экскаваторов, от которых существенным образом зависит себестоимость добычи полезных ископаемых. При снижении массы стрелы и рукояти рабочего оборудования появится возможность увеличения вместимости ковша и тем самым производительности экскаватора. Цель работы: разработка методики определения рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора по критерию массы с учетом ограничений по прочности металлоконструкций в заданных условиях эксплуатации. Результаты. Для гидравлического экскаватора с рабочим оборудованием «прямая лопата» разработана математическая модель расчета усилий при копании, алгоритм и программа на алгоритмическом языке, позволяющие определять возможные усилия в элементах рабочего оборудования в пределах рабочей зоны. Математическое описание позволяет определять значения усилий на штоках гидроцилиндров для обеспечения необходимого усилия копания. Значения усилий используются при проведении оптимизации по критерию массы для подбора сечений стрелы и рукояти, для размещения гидроцилиндров. Выводы. Применение критерия массы и ограничения в виде реализации требуемых технологических параметров при эксплуатации в заданных горно-технологических условиях позволит подобрать рациональные сечения элементов стрелы и рукояти.

---

**Для цитирования:** Безкорвайный П.Г., Шестаков В.С., Нестеров В.И. Оптимизация рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 6 (158). – С. 3-8 – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-3-8

---

Рабочее оборудование гидравлического экскаватора включает стрелу, рукоять, ковш и гидроцилиндры поворота ковша, рукояти и стрелы [1]. Стрела и гидроцилиндры поворота стрелы шарнирно соединены с поворотной платформой. Поиск оптимального варианта осложняется наличием большого числа переменных оптимизации, сложностью их взаимосвязей, разнообразием горно-технологических условий эксплуатации экскаваторов.

К переменным оптимизации относятся размеры стрелы, рукояти и гидроцилиндров, расположения гидроцилиндров, усилия гидроцилиндров. Размеры

стрелы и рукояти определяются по задаваемым технологами размерам рабочей зоны [2-4], причем считается, что копанье возможно во всех точках этой зоны. Но это не всегда реализуется, так как усилие, передаваемое на ковш от гидроцилиндров, меняется в зависимости от углов и в некоторых точках усилия недостаточно для заполнения ковша [5]. Точки крепления гидроцилиндров к рабочему оборудованию меняют передачу усилий на ковш и нагруженность стрелы и рукояти. При смещении ближе к шарнирам нагрузка на стрелу и рукоять уменьшается, но при этом, так как увеличивается длина гидроцилиндров,

увеличивается и их масса. Рациональное размещение гидроцилиндров может быть определено только при оптимизации, для которой необходимо использование усилий.

Усилия при копании на зубья ковша передаются от гидроцилиндров, причем все они одновременно участвуют в работе. Составить выражения для решения прямой задачи – по максимальным усилиям в гидроцилиндрах определить нагрузки на зубьях и в шарнирах рабочего оборудования – не удалось. Это связано с тем, что усилия зависят от положения ковша, геометрических параметров рабочего оборудования и точек крепления гидроцилиндров. Также не могут одновременно на штоках всех гидроцилиндров развиваться максимальные усилия. Рабочий процесс гидравлических экскаваторов и нагруженность рабочего оборудования рассматривались многими исследователями [6-12], но полного математического описания, которое можно использовать при оптимизации, в них не приведено.

Наиболее просто нагрузки можно определить, решая обратную задачу – задавать усилия копания на зубьях ковша и по ним определять усилия на штоках и в шарнирах. Усилия на зубьях заранее неизвестны, поэтому можно использовать алгоритм поиска возможных усилий на зубьях по задаваемым

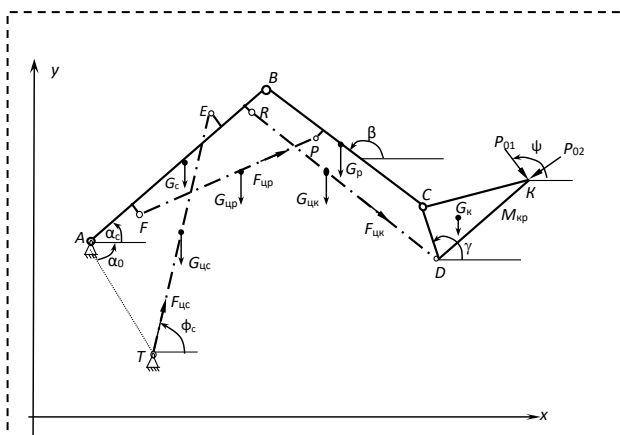


Рис. 1. Схема рабочего оборудования:

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, рукояти и ковша;  $G_c$ ,  $G_p$ ,  $G_k$ ,  $G_{цс}$ ,  $G_{цр}$ ,  $G_{цк}$  – силы тяжести стрелы, рукояти, ковша, гидроцилиндров стрелы, рукояти, ковша;  $\alpha_c$ ,  $\alpha_o$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\psi$  – углы

Fig. 1. Working equipment diagram:

A, T, E, F, P, R, B, C, D – hinges; K – the top of the bucket tooth; KCD – ladle profile diagram; CB – handle; AB – arrows; TE, FP, RD – hydraulic cylinders for turning the boom, stick and bucket;  $G_c$ ,  $G_p$ ,  $G_k$ ,  $G_{цс}$ ,  $G_{цр}$ ,  $G_{цк}$  – gravity forces of the boom, stick, bucket, boom, stick, bucket hydraulic cylinders;  $\alpha_c$ ,  $\alpha_o$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\psi$  – angles

максимальным активным и реактивным усилиям гидроцилиндров. Алгоритм должен учитывать особенности рабочего процесса: копание может быть поворотом ковша, поворотом рукояти и стрелы или сочетаниями этих движений. Но даже при копании,

например, поворотом ковша остальные гидроцилиндры участвуют в работе – они фиксируют от поворота стрелу и рукоять. Если в одном из гидроцилиндров реактивное усилие, определяемое настройкой предохранительных клапанов, превысит максимальное, то произойдет смещение элемента и это снизит усилие на зубьях ковша.

Исходя из этой особенности, поиск допустимого решения выполняется следующим образом. На зубьях ковша задается заведомо большее возможное усилие копания, по нему определяется усилие в гидроцилиндрах поворота ковша и, если оно окажется больше максимально возможного усилия этих гидроцилиндров, то уменьшается усилие на зубьях. Расчеты повторяются до тех пор, пока усилие в гидроцилиндре поворота ковша не будет допустимым. Аналогично выполняются проверки для гидроцилиндров поворота рукояти и стрелы.

Выражения для расчета усилий составлены по расчетной схеме (рис. 1). Для обозначений в выражениях углов используется знак  $\angle$  и точки концов отрезков, образующих угол.

Исходными данными для расчетов служат линейные размеры и массы элементов рабочего оборудования. Алгоритм вычислений в пределах рабочей зоны организован циклами. Во внешнем цикле с равным шагом меняется длина цилиндра стрелы (отрезок TE по рис. 1) от минимального до максимального значения. Для каждого значения длины цилиндра стрелы во втором цикле также от минимального до максимального значения меняется длина цилиндра рукояти (отрезок FP). При каждом значении цилиндра рукояти в третьем (внутреннем) цикле меняется с равным шагом от минимального до максимального значения длина цилиндра ковша (отрезок RD). По меняющимся в циклах длинам цилиндров рассчитываются координаты вершины зуба ковша, координаты всех звеньев рабочего оборудования, а по ним определяются усилия.

Координаты точек стрелы определяются по следующим выражениям:

$$\angle_{BAE} = \arccos \frac{AB^2 + AE^2 - BE^2}{2 \cdot AB \cdot AE};$$

$$\angle_{BAF} = \arccos \frac{AB^2 + AF^2 - BF^2}{2 \cdot AB \cdot AF};$$

$$\angle_{EAT} = \arccos \frac{AE^2 + AT^2 - TE^2}{2 \cdot AE \cdot AT};$$

$$\alpha_c = \angle_{EAT} - \angle_{BAE} - \alpha_o;$$

$$x_B = x_A + AB \cdot \cos \alpha_c;$$

$$y_B = y_A + AB \cdot \sin \alpha_c;$$

$$x_E = x_A + AE \cdot \cos(\alpha_c + \angle_{BAE});$$

$$y_E = y_A + AE \cdot \sin(\alpha_c + \angle_{BAE});$$

$$x_F = x_A + AF \cdot \cos(\alpha_c - \angle_{BAF});$$

$$y_F = y_A + AF \cdot \sin(\alpha - \angle_{BAF});$$

$$x_{\text{Цтс}} = x_A + A\text{Ц}_{\text{тс}} \cdot \cos(\alpha + \alpha_3);$$

$$y_{\text{Цтс}} = y_A + A\text{Ц}_{\text{тс}} \cdot \sin(\alpha + \alpha_3).$$

Координаты точек рукоятки:

$$\angle_{PBP'} = \text{artg} \frac{PP'}{BP'};$$

$$\angle_{RBR'} = \text{artg} \frac{RR'}{BR'};$$

$$\angle_{RCR'} = \text{artg} \frac{RR'}{BC - BR'};$$

$$\angle_{\text{Цтп}B\text{Цтп}'} = \text{artg} \frac{\text{Ц}_{\text{тп}}\text{Ц}_{\text{тп}}'}{B\text{Ц}_{\text{тп}}'};$$

$$\angle_{FBP} = \arccos \frac{BF^2 + BP^2 - FP^2}{2 \cdot BF \cdot BP};$$

$$\angle_{FPB} = \arccos \frac{L_{\text{уп}}^2 + BP^2 - BF^2}{2 \cdot FP \cdot BP};$$

$$\beta = \pi + \alpha_c - \angle_{BFF'} - \angle_{FBP} - \angle_{PBP'};$$

$$x_C = x_B + BC \cdot \cos \beta;$$

$$y_C = y_B + BC \cdot \sin \beta;$$

$$x_{R'} = x_B + BR' \cdot \cos \beta;$$

$$y_{R'} = y_B + BR' \cdot \sin \beta;$$

$$x_{P'} = x_B + BP' \cdot \cos \beta;$$

$$y_{P'} = y_B + BP' \cdot \sin \beta;$$

$$x_R = x_B + BR \cdot \cos(\beta + \angle_{RBR'});$$

$$y_R = y_B + BR \cdot \sin(\beta + \angle_{RBR'});$$

$$x_P = x_B + BP \cdot \cos(\beta + \angle_{PBP'});$$

$$y_P = y_B + BP \cdot \sin(\beta + \angle_{PBP'});$$

$$x_{\text{Цтп}} = x_B + B\text{Ц}_{\text{тп}} \cdot \cos(\beta + \angle_{\text{Цтп}B\text{Цтп}'});$$

$$y_{\text{Цтп}} = y_B + B\text{Ц}_{\text{тп}} \cdot \sin(\beta + \angle_{\text{Цтп}B\text{Цтп}'}).$$

Координаты точек ковша:

$$\angle_{DCK} = \arccos \frac{CD^2 + CK^2 - KD^2}{2 \cdot CD \cdot CK};$$

$$\angle_{DC\text{Цтк}} = \arccos \frac{CD^2 + \text{Ц}_{\text{тк}}^2 - D\text{Ц}_{\text{тк}}^2}{2 \cdot CD \cdot \text{Ц}_{\text{тк}}};$$

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

$$\angle_{RDC} = \arccos \frac{CD^2 + RD^2 - CR^2}{2 \cdot CD \cdot RD};$$

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

$$\angle_{DCK} = \arccos \frac{BC^2 + BP^2 - CP^2}{2 \cdot BC \cdot BP};$$

$$\angle_{CBP} = \arccos \frac{BC^2 + BR^2 - CR^2}{2 \cdot BC \cdot BR};$$

$$\angle_{PBR} = \angle_{CBP} - \angle_{CBR};$$

$$x_D = x_C + CD \cdot \cos \gamma;$$

$$y_D = y_C + CD \cdot \sin \gamma;$$

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

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

$$x_{\text{Цт}} = x_C + \text{Ц}_{\text{тк}} \cdot \cos(\gamma + \angle_{DC\text{Цтк}});$$

$$y_{\text{Цт}} = y_C + \text{Ц}_{\text{тк}} \cdot \sin(\gamma + \angle_{DC\text{Цтк}}).$$

Усилие на штоках гидроцилиндров стрелы определяется по условию равновесия относительно шарнира А:

$$F_{\text{цс}} = \frac{G_c(x_{\text{цтс}} - x_A) + G_p(x_{\text{цтп}} - x_A) + G_k(x_{\text{цтк}} - x_A) + G_{\text{цс}} \left( \frac{x_T + x_E}{2} - x_A \right) + G_{\text{цп}} \left( \frac{x_F + x_P}{2} - x_A \right) + G_{\text{цк}} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_A \right) + P_y(x_k - x_A) + P_x(y_k - y_A)}{AT \sin(\pi - \alpha_0 - \varphi_c)},$$

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

$P_y = -P_{01} \sin \psi + P_{02} \cos \psi$  – проекции на оси  $x$  и  $y$  касательной ( $P_{01}$ ) и нормальной ( $P_{02}$ ) составляющих усилия сопротивления копанью.

Усилие на штоках гидроцилиндров рукоятки определяется по условию равновесия относительно шарнира В. На шарнир В кроме усилия в штоке действует также половина силы тяжести гидроцилиндра рукоятки

$$F_{\text{цр}} = \frac{G_p(x_{\text{цтп}} - x_B) + G_k(x_{\text{цтк}} - x_B) + G_{\text{цк}} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_B \right) + P_y(x_k - x_B) + P_x(y_k - y_B) + 0,5G_{\text{цр}}(x_P - x_B)}{BP \sin \angle_{FBP}}$$

Усилие на штоках гидроцилиндров ковша определяется по условию равновесия относительно шар-

мира С. На шарнир С кроме усилия в штоке действует также половина силы тяжести гидроцилиндра ковша

$$F_{\text{шк}} = \frac{G_k(x_{\text{шк}} - x_c) + P_y(x_k - x_c) + P_x(y_k - y_c) -$$

$$\frac{-0,5 \cdot G_{\text{шк}}(x_D - x_c)}{CD \sin \angle RDC}$$

Реакции в шарнире «пята стрелы – платформа»

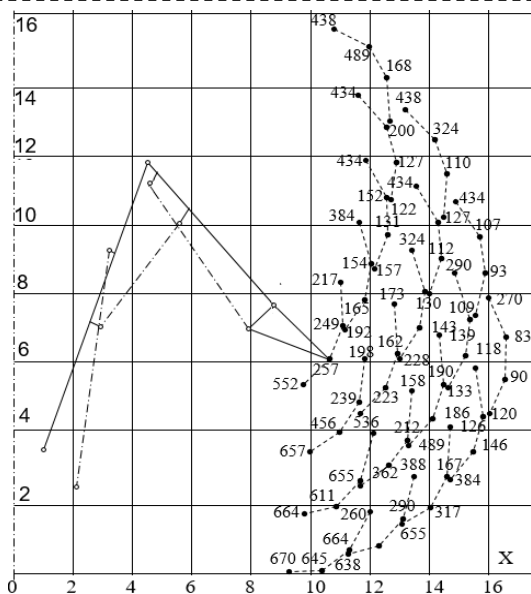


Рис. 2. Результаты определения рабочей зоны и усилий на зубьях ковша

Fig. 2. Results of determining the working area and forces on the bucket teeth

(точка А):

$$R_{Ax} = -F_{\text{шк}} \cos \alpha_c - P_x;$$

$$R_{Ay} = -F_{\text{шк}} \sin \alpha_c - P_y + G_k + G_p + G_c +$$

$$+G_{\text{шк}} + G_{\text{шр}} + 0,5G_{\text{шк}}.$$

Реакции в шарнире «стрела – рукоять» (точка В):

$$R_{Bx} = -F_{\text{шр}} \cos \varphi_p - P_x;$$

$$R_{By} = -F_{\text{шр}} \sin \varphi_p - P_y + G_k + G_p + G_{\text{шк}} + 0,5G_{\text{шр}}.$$

Реакции в шарнире «рукоять – ковш» (точка С):

$$R_{Cx} = -F_{\text{шк}} \cos \varphi_k - P_x;$$

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

По представленным выражениям на алгоритмическом языке составлена программа и проведены расчеты координат и усилий. На рис. 2 приведены значения усилий копания в кН, пунктиром показана траектория движения зуба ковша. Диаграммы усилий на штоках и реакции в шарнирах показаны на рис. 3 (в диаграммах приведены только варианты, показанные на рис. 2).

Анализ данных в диаграммах позволяет сделать вывод: максимальные усилия на зубьях ковша определяются значениями максимальных усилий на штоках гидроцилиндров, показанных пунктирными ли-

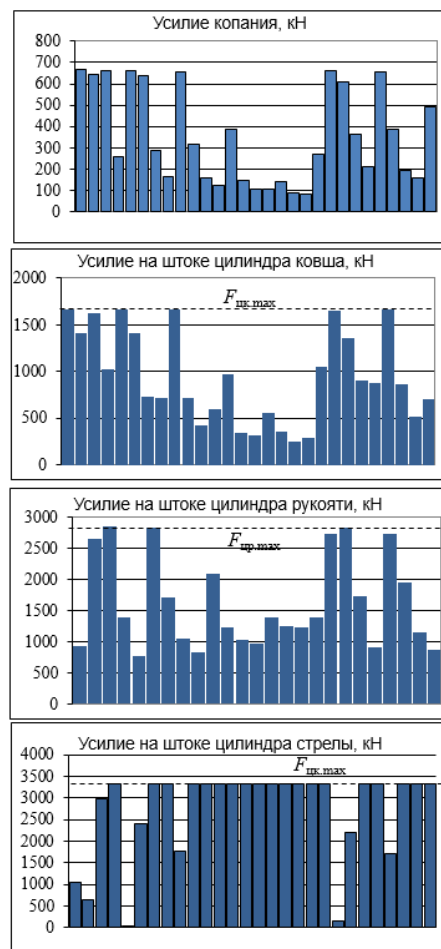


Рис. 3. Результаты расчета усилий копания и на штоках гидроцилиндров

Fig. 3. The results of calculating the efforts of digging and on the rods of hydraulic cylinders

ниями. Если окажется, что усилий на зубьях недостаточно для заполнения ковша, то по результатам вычислений определяется, в каких гидроцилиндрах необходимо увеличить максимальное усилие. Так, по графику усилий на штоках гидроцилиндров стрелы видно, что в 2/3 случаев усилия достигли максимальных значений и ограничили усилие копания, увеличение этого максимального усилия сразу приведет к увеличению усилия копания.

Этот алгоритм поиска усилий на штоках, по условию обеспечения требуемых для заполнения ковша усилий на зубьях, применяется при оптимизации точек крепления штоков к стреле и рукояти – для каждого варианта определяются усилия в штоках.

Оптимизацию рабочего оборудования предлагается проводить по критерию массы при ограничениях по прочности и по обеспечению рабочего процесса (усилие на зубьях должно обеспечивать копанье).

Для оптимизации на стадии эскизного проектирования расчет масс можно выполнять по приближенным формулам. Стрела и рукоять – это сварные конструкции коробчатого сечения. Толщина листов определяется по известным формулам по условиям прочности для балок, работающих на изгиб и сжатие по значениям усилий. Массы гидроцилиндров также можно определять по приближенным формулам по длине и усилию.

На этапах технического и рабочего проектирования с применением специальных систем, например, Российской системы АРМ WinMachine, выполняется проверка на прочность оптимального варианта и при необходимости уточняется сечение.

#### **Заключение.**

1. Составленное математическое описание и алгоритм расчета возможного усилия на зубьях ковша позволяют определять усилия во всех звеньях рабочего оборудования при копании.

2. Математическое описание позволяет определять значения усилий на штоках гидроцилиндров для обеспечения необходимого усилия копания.

Предложенный алгоритм позволяет проводить оптимизацию рабочего оборудования на этапе эскизного проектирования.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

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

2. Побегайлова П.А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. – М.: ЛЕНАНД, – 296 с. (2014)

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. 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.

5. 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.

6. 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. – Pp. 941-945 (2011).

7. 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, Pp. 10-18 (1996).

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

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

10. 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)

11. 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.

12. Victor Shestakov, Pavel Bezkorovainy and Tatyana Franz. Determination of the working area of a hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. Volume 177 (2020). XVIII Scientific Forum «Ural Mining Decade» (UMD 2020). Ekaterinburg, Russia, April 2-11, 2020. R. Apakashev, D. Simisinov and A. Glebov (Eds.), Pp. 100-104.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-3-8

**Pavel G. Bezkorovayny**<sup>1</sup>, Senior Lecturer, Postgraduate, **Viktor S. Shestakov**<sup>2</sup>, Professor, C. Sc. in Engineering, **Valeri I. Nesterov**<sup>3</sup>, Dr. Sc. in Engineering, Professor

<sup>1</sup> Karaganda State Technical University, 299000, Kazakhstan, Karaganda, st. Kurchatov, 7.

<sup>2</sup> Ural State Mining University, 620144, Russian Federation, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30.

<sup>3</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya street, 28

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

## **OPTIMIZATION OF WORK EQUIPMENT HYDRAULIC EXCAVATORS**



#### Article info

Received:

13 November 2021

Revised:

30 November 2021

Accepted:

03 December 2021

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

#### Abstract.

The relevance of the work is due to the need to improve the efficiency of hydraulic excavators, on which the cost of mining is significantly dependent. With a decrease in the weight of the boom and stick of the working equipment, it will be possible to increase the bucket capacity and thereby the excavator productivity. Purpose of the work: development of a methodology for determining the rational parameters of the working equipment of a hydraulic excavator according to the criterion of mass and limitations to ensure the strength of metal structures and the possibility of digging under specified conditions. Results. For a hydraulic excavator with "front shovel" working equipment, a mathematical model has been developed for calculating digging forces, an algorithm and a program in algorithmic language, which allow determining possible forces in the working equipment elements within the working area. The mathematical description allows you to determine the values of the forces on the rods of the hydraulic cylinders to ensure the necessary digging force. The force values are used when optimizing according to the mass criterion for the selection of the boom and stick sections, for the placement of hydraulic cylinders. Conclusions. The use of the mass criterion and the limitation in the form of the implementation of the required technological parameters during operation in the given mining and technological conditions will make it possible to select rational sections of the boom and stick elements.

**For citation** Bezkorovayny P.G., Shestakov V.S., Nesterov V.I. Optimization of work equipment hydraulic excavators. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.6 (158), pp. 3-8. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-3-8

#### REFERENCES

1. Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. *Proyektirovaniye kar'yernykh ekskavatorov*. M.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, – 228 s. (2017)
2. Pobegaylo P.A. *Moshchnyye odnokovshovyye gidravlicheskiye ekskavatory: Vybór osnovnykh geometricheskikh parametrov rabochego oborudovaniya na rannikh stadiyakh proyektirovaniya*. – M.: LENAND, – 296 s. (2014).
3. Pobegaylo P. A. *Sozdaniye metodologii avtomatizirovannogo proyektirovaniya gornyx 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': KNITU-KAI, 2017. – S. 168-177
4. 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.*
5. Komissarov A.P. i dr. *Sootnosheniya aktivnykh i reaktivnykh nagruzok v mekhanizmakh 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.*
6. 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. – Pp. 941-945. (2011)*
7. 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, Pp. 10-18 (1996).*
8. Bradley D.A. *Artificial intelligence in the control and operation of construction plant the autonomous robot excavator / D.A. Bradley, D.W. Seward, J.E. Mann, M.R. Goodwin // Automation in Construction. – Vol. 2(3). – Pp. 21 -228 (1993).*
9. Frimpong S. *Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials / S. Frimpong, Y. Hu, H. Inyang // International Journal of Geomechanics. – Vol. 8, 1. – Pp. 20-29 (2009).*
10. 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)*
11. *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.*
12. Victor Shestakov, Pavel Bezkorovainny and Tatyana Franz. *Determination of the working area of a hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. Volume 177 (2020). XVIII Scientific Forum «Ural Mining Decade» (UMD 2020). Ekaterinburg, Russia, April 2-11, 2020. R. Apakashev, D. Simisinov and A. Glebov (Eds.), Pp. 100-104.*