

Комиссаров Анатолий Павлович, проф., доктор техн. наук, **Шестаков Виктор Степанович**, проф., канд. техн. наук, **Набиуллин Рустем Шафкатович**, доцент, канд. техн. наук, **Хорошавин Сергей Александрович**, доцент, канд. техн. наук

Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

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

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА «ОБРАТНАЯ ЛОПАТА»



Информация о статье

Поступила:

13 ноября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

03 декабря 2021 г.

Ключевые слова:

гидравлический экскаватор, рабочее оборудование, стрела, рукоять, ковш, гидроцилиндр, копание, транспортирование, усилие.

Аннотация.

Рассмотрена возможность за счет выбора рациональных параметров повысить эффективности эксплуатации гидравлических экскаваторов, от которых существенным образом зависит себестоимость добычи полезных ископаемых. При проектировании экскаваторов параметры рабочего оборудования, такие как размеры сечений стрелы, рукояти и ковша, определяются по условиям прочности, в которых выполняются расчеты напряжений по усилиям. Необоснованно заданные значения усилий при таких расчетах приводят в ряде случаев к увеличению массы рабочего оборудования или к разрушению элементов при эксплуатации. Значения усилий при совершении рабочего процесса меняются в широких пределах в зависимости от положения ковша в рабочей области, в зависимости от сопротивления на зубьях ковша. С определением точных значений усилий появится возможность задавать сечения элементов без излишних запасов прочности и за счет этого уменьшить массу стрелы и рукояти. При снижении массы стрелы и рукояти рабочего оборудования появится возможность увеличения вместимости ковша и тем самым производительности экскаватора. Цель работы: разработка методики определения нагрузок на рабочем оборудовании при совершении рабочих операций. Результаты исследований. Для гидравлического экскаватора с рабочим оборудованием «обратная лопата» разработана математическая модель расчета усилий при копании и транспортировании ковша, 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 и при транспортировании. Значения усилий используются при последующем расчете на прочность.

Для цитирования: Комиссаров А.П., Шестаков В.С., Набиуллин Р.Ш., Хорошавин С.А. Исследование нагрузки рабочего оборудования гидравлического экскаватора «обратная лопата» // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 6 (158). – С. 15-20 – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-15-20

Введение

Большое влияние на производительность и стоимость экскаватора оказывает рабочее оборудование [1-6]. Снижение массы оборудования существенно снижает массу экскаватора, момента инерции его поворотной части. Резерв снижения массы элементов рабочего оборудования (стрелы, рукояти, ковша и др.) – в выборе оптимальных сечений этих элементов, в рациональном размещении гидроцилиндров [5, 7]. Для поиска рациональных значений необходимы значения действующих усилий.

Цель и задачи работы

В настоящее время при проектировании новых моделей экскаваторов используется методика, при

которой прорабатывается первый вариант конструкции рабочего оборудования, принимая параметры по подобию с существующими моделями [2, 3], для него по требуемым усилиям копания определяются усилия в шарнирах, кронштейнах, опорах стрелы, а затем выполняются расчеты напряжений для проверки прочности. Для элементов, не обеспечивающих условие прочности, вносятся конструктивные изменения, и повторяется расчет напряжений.

Разработке методик расчета усилий для гидравлических экскаваторов при копании посвящено большое число публикаций [1-6, 8-12]. Расчет в этих методиках выполняется по заданным усилиям на штоках гидроцилиндров поворота ковша, рукояти и стрелы. В [6] приведена математическая модель и

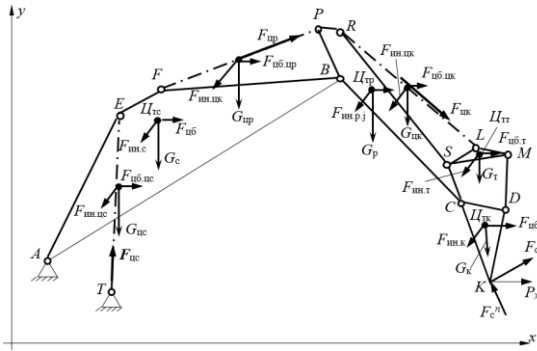


Рис. 1. Схема к расчету параметров усилий: $A, T, E, F, P, R, B, C, D, L, M, S$ – шарниры; K – вершина зуба ковша; KCD – схема профиля ковша; $CBPRS$ – рукоять; $AEFB$ – стрела; TE, FP, RL – гидроцилиндры поворота стрелы, рукояти и ковша; $G_c, G_p, G_k, G_{tm}, G_{цс}, G_{цр}, G_{цк}$ – силы тяжести стрелы, рукояти, ковша, траверсы, гидроцилиндров стрелы, рукояти, ковша; $Ц_{тс}, Ц_{тр}, Ц_{тк}, Ц_{тм}$ – центр тяжести стрелы, рукояти, ковша, траверсы; $F_{ин.с}, F_{цб.с}, F_{ин.р}, F_{цб.р}, F_{ин.к}, F_{цб.к}, F_{ин.цт}, F_{цб.т}, F_{ин.цс}, F_{цб.цс}, F_{ин.цр}, F_{цб.цр}, F_{ин.цк}, F_{цб.цк}$ – инерционные и центробежные силы стрелы, рукояти, ковша, траверсы, гидроцилиндров стрелы, рукояти и ковша

Fig. 1. Scheme for calculating the parameters of efforts:

$A, T, E, F, P, R, B, C, D, L, M, S$ – hinges; K – the top of the bucket tooth; KCD – diagram of the bucket profile; $CBPRS$ – handle; $AEFB$ – arrows; TE, FP, RL – hydraulic cylinders for boom, stick and bucket swing; $G_c, G_p, G_k, G_{tm}, G_{цс}, G_{цр}, G_{цк}$ – gravity forces of boom, stick, bucket, traverse, hydraulic cylinder-firewood of boom, stick, bucket; $Ц_{тс}, Ц_{тр}, Ц_{тк}, Ц_{тм}$ – center of gravity of boom, stick, bucket, traverse; $F_{ин.с}, F_{ин.р}, F_{ин.к}, F_{ин.цт}, F_{ин.цс}, F_{ин.цр}, F_{ин.цк}$ – inertial and centrifugal forces of the boom, stick, bucket, traverse, boom, stick and bucket cylinders

алгоритм расчета усилий для экскаватора «прямая лопата» при копании в различных точках рабочей зоны. Методик же для расчета усилий при копании и транспортировании с учетом поворотного движения платформы для «обратной лопаты» нет, а потребность учета влияния поворотного движения на рабочее оборудование существует.

Целью выполненных исследований являлась разработка методики расчета усилий на элементы рабочего оборудования при копании и при переносе ковша.

Решение задач исследований

Расчетная схема для составления выражений расчета усилий при копании и транспортировании ковша приведена на рис. 1. Модель для расчета усилий может быть универсальной. Для расчета копания в ней необходимо обнулять инерционные и центробежные силы, для расчета транспортирования принимать усилия копания равными нулю.

При повороте платформы экскаватора с угловыми ускорениями ε_i , угловой скоростью ω_i на рабочее оборудование начинают действовать силы инерции $F_{ин.j,i}$ и центробежные силы $F_{цб.j,i}$. Инерционные силы действуют перпендикулярно плоскости, проходящей по осям стрелы и рукояти, на схеме к расчету по рис. 1 они показаны под углом к осям xOy . Центробежные силы действуют горизонтально. При копании этих усилий нет.

Обозначения в формулах: для линейных размеров используются обозначения точек по краям отрезков, для углов – знак \angle с индексом из обозначений точек угла, для координат – символы x и y с индексами точки.

Одновременно с усилиями, возникающими от поворотного движения платформы, действуют силы тяжести элементов. Причем центробежные силы действуют в одной вертикальной плоскости с силами тяжести, инерционные же силы перпендикулярны этой плоскости.

Усилия на элементы рабочего оборудования от сил тяжести и центробежных сил определяются по условиям равновесия относительно шарниров [6, 8].

Усилие на штоках гидроцилиндров стрелы относительно шарнира A :

$$F_{цс} = \frac{G_c(x_{цтс} - x_A) + G_p(x_{цтр} - x_A) + G_k(x_{цтк} - x_A) +$$

$$+ G_{цс} \left(\frac{x_T + x_E}{2} - x_A \right) + G_{цр} \left(\frac{x_F + x_P}{2} - x_A \right) +$$

$$+ G_{цк} \left(\frac{x_R + x_D}{2} - x_A \right) + G_t(x_{цтт} - x_A) +$$

$$\frac{F_{цб.с}(y_{цтс} - y_A) + F_{цб.р}(y_{цтр} - y_A) + F_{цб.к}(y_{цтк} - y_A) +$$

$$+ F_{цб.цс} \left(\frac{y_E + y_T}{2} - y_A \right) + F_{цб.цр} \left(\frac{y_F + y_P}{2} - y_A \right) +$$

$$+ F_{цб.цк} \left(\frac{y_D + y_R}{2} - y_A \right) + P_x(y_K - y_A) - P_y(x_K - x_A) \Bigg/ AEs \sin(\varphi_c - \alpha - \angle BAE),$$

где α, φ_c – углы наклона линии AB и гидроцилиндра стрелы к горизонту; P_x, P_y – проекции усилия копания на оси координат

$$P_x = -F_C^t \cos \psi + F_C^n \sin \psi;$$

$$P_y = -F_C^t \sin \psi - F_C^n \cos \psi,$$

ψ – угол наклона траектории движения зуба ковша в текущий момент времени к горизонту,

F_C^t, F_C^n – касательная и нормальная составляющие силы сопротивления копанию.

Усилие в тяге DM :

$$R_{DM} = \frac{P_x(y_C - y_K) + P_y(x_K - x_C) - G_K(x_{цтк} - x_C) - 0,5G_{DM}(x_D - x_C) + F_{цб.к}(y_{цтк} - y_C)}{CD \sin(\varphi_c - \alpha - \angle BAE)}$$

Реакция в шарнире С:

$$R_{Cx} = R_{DM} \cos \theta - P_x + F_{цб.к};$$

$$R_{Cy} = R_{DM} \sin \theta + G_K + 0,5G_{DM} - P_y,$$

где θ – угол наклона линии MD к горизонту.

На шарнир S кроме усилия в штоке действует также половина силы тяжести и центробежной силы гидроцилиндра ковша:

$$F_{цк} = \frac{R_{DM} SM \sin(\theta - \tau + \tau_L) + 0,5G_{цк} \left(\frac{x_L + x_R}{2} - x_S \right) - G_T(x_{цтг} - x_S) - 0,5F_{цб.цк} \left(\frac{y_L + y_R}{2} - y_S \right) - F_{цб.т}(y_{цтг} - y_S)}{SL \sin(\tau - \varphi_K)}$$

где φ_K, τ – угол наклона гидроцилиндра ковша и тяги SL к горизонту.

Усилие в шарнире S:

$$R_{Sx} = -F_{цк} \cos \varphi_K - R_{DM} \cos \theta + 0,5F_{цб.цк} + F_{цб.т};$$

$$R_{Sy} = G_{цк} / 2 - R_{DM} \sin \theta + G_{DM} / 2 + G_T - F_{цк} \sin \varphi_K$$

На шарнир B, кроме усилия в штоке, действует также половина силы тяжести и сил инерции гидроцилиндра рукоятки:

$$F_{цр} = \frac{-P_x(y_K - y_B) + P_y(x_K - x_B) + G_p(x_{цтг} - x_B) + G_K(x_{цтк} - x_B) + G_{цк} \left(\frac{x_R + x_L}{2} - x_B \right) - 0,5G_{цр} \times \left(\frac{x_P + x_E}{2} - x_B \right) - F_{цб.р}(y_B - y_{цтг}) - F_{цб.к}(y_B - y_{цтк}) - F_{цб.цк} \left(y_B - \frac{y_R + y_D}{2} \right) + 0,5F_{цб.цр} \left(y_B - \frac{y_F + y_P}{2} \right)}{BP \sin \angle FPB}$$

$$G_K(x_{цтк} - x_B) + G_{цк} \left(\frac{x_R + x_L}{2} - x_B \right) - 0,5G_{цр} \times$$

$$\times \left(\frac{x_P + x_E}{2} - x_B \right) - F_{цб.р}(y_B - y_{цтг}) - F_{цб.к}(y_B - y_{цтк}) -$$

$$- F_{цб.цк} \left(y_B - \frac{y_R + y_D}{2} \right) + 0,5F_{цб.цр} \left(y_B - \frac{y_F + y_P}{2} \right)$$

Реакции в шарнире от сил тяжести и инерционных сил «пяты стрелы – платформа» (точка A):

$$R_{Ax} = -F_{цс} \cos \alpha_c - F_{цб.с} - F_{цб.р} - F_{цб.к} - F_{цб.цр} - F_{цб.цк} - 0,5F_{цб.цс} - P_x;$$

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

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

$$R_{Bx} = -F_{цр} \cos \varphi_p - P_x - F_{цб.р} - F_{цб.к} - 0,5F_{цб.цр} - F_{цб.цк};$$

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

Центробежная сила, действующая на j -й элемент рабочего оборудования:

$$F_{цб.j} = m_j \cdot R_j \cdot \omega_j^2.$$

где m_j – масса j -го элемента, для которого определяется усилие; R_j – расстояние по горизонтали от оси вращения платформы до j -й элемента.

Инерционная сила, действующая на j -й элемент рабочего оборудования:

$$F_{ин.j} = m_j \cdot R_j \cdot \varepsilon_i,$$

По инерционным силам определяются изгибающие моменты относительно шарниров, которые используются в расчетах на прочность.

В выражении расчета усилий входят координаты точек элементов рабочего оборудования. Они определяются по геометрическим размерам элементов и по размерам гидроцилиндров. Алгоритм просчета в точках внутри рабочей области включает три цикла. В первом меняется расстояние между шарнирами гидроцилиндров стрелы (имитируется выдвигание штока) от минимального до максимального значения, во втором для каждого положения штока стрелы имитируется выдвигание штока гидроцилиндра рукоятки, а в третьем – выдвигание штока гидроцилиндра ковша.

Имеются некоторые сложности определения усилий копания на зубьях ковша. Это связано с рабочим процессом экскавации. Процесс копания гидравлического экскаватора определяется одновременной работой гидроцилиндров поворота ковша, рукоятки и стрелы. Наименьшее энергопотребление достигается копанием поворотом ковша относительно шарниров «ковш-рукоять» (т. С, см. рис. 1), при этом гидроцилиндры поворота стрелы и рукоятки работают в тормозном режиме, удерживая стрелу и рукоять от перемещений. При превышении в гидроцилиндрах величины давления настройки предохранительных клапанов начинается перемещение их штоков и поворот стрелы или рукоятки. Таким образом, наибольшее усилие копания, которое может быть реализовано на зубьях ковша, определяется работой гидроцилиндров стрелы, рукоятки и ковша.

Для расчета наибольшего возможного усилия копания использован алгоритм поиска. Вначале задается начальное значение касательной составляющей усилия сопротивления копанию, заведомо большего усилия копания рассматриваемого экскаватора. По этому усилию копания определяют активное усилие на штоках гидроцилиндров ковша $F_{цк}$. Если вычисленное усилие больше максимального усилия на штоке, которое определяется по давлению и площади гидроцилиндра $F_{цк.макс}$, то снижается усилие копания и повторяется расчет $F_{цк}$. Усилие на зубьях уменьшается до тех пор, пока $F_{цк}$ не достигнет $F_{цк.макс}$. Вторым этапом выполняется проверка удержания гидроцилиндрами рукоятки. Для этой проверки расчетное усилие $F_{цр}$ сравнивается с возможным реактивным усилием гидроцилиндра рукоятки $F_{цр.макс}$, определяется в зависимости от действующих усилий при удержании рукоятки или по площади поршня, или по площади штоковой полости. При

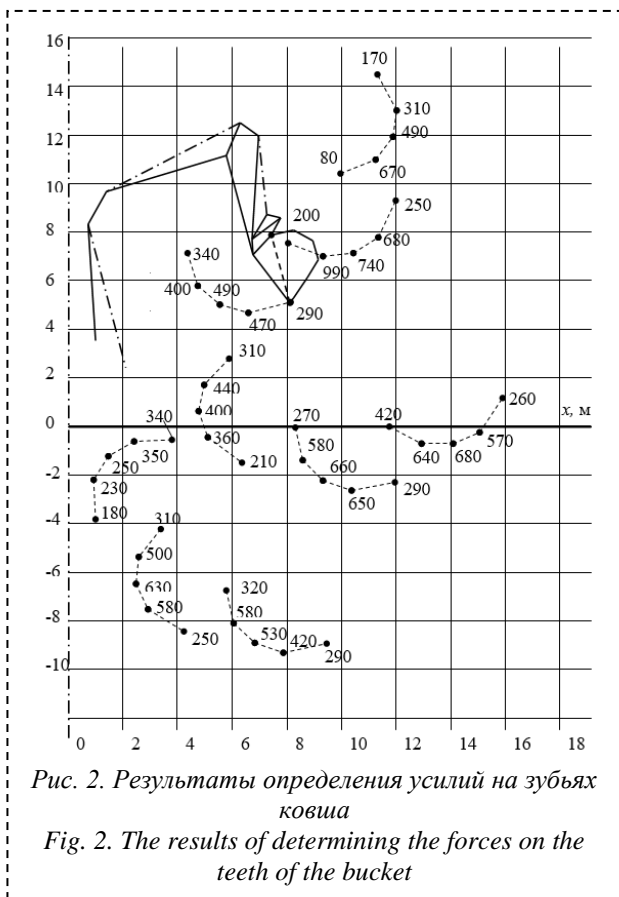


Рис. 2. Результаты определения усилий на зубьях ковша
 Fig. 2. The results of determining the forces on the teeth of the bucket

$F_{цр} > F_{цр.max}$ снова уменьшается усилие копания до тех пор, пока не будет выполняться условие $F_{цр} \leq F_{цр.max}$. После выполнения условий по усилиям в гидроцилиндрах ковша и рукояти выполняется третья проверка для гидроцилиндров стрелы и также при превышении $F_{цс}$ максимального усилия гидроцилиндров $F_{цс.max}$ уменьшается усилие копания. По этим трем проверкам и определяется усилие на зубья ковша при копании.

Математическая модель реализована программой для ЭВМ на алгоритмическом языке *Visual Basic for Application*. Объем программы ~3000 строк. Алгоритм программы позволяет изменять от минимального до максимального значения выдвигание штоков гидроцилиндров поворота стрелы, рукояти и ковша, определять координаты точек элементов рабочего оборудования, усилия копания, а также усилия при копании и транспортировании ковша в элементах рабочего оборудования. Вывод результатов предусмотрен в таблицах и в виде рисунка рабочей зоны экскаватора (рис. 2).

Данные по рис. 2 показывают, что усилия в процессе работы меняются в широких пределах. Численные значения параметров при расчетах использованы для экскаватора с ковшом вместимостью 4 м³. Табличные результаты можно отобразить диаграммами, по которым сразу можно выявить лимитирующие гидроцилиндры для зон, в которых не реализуются требуемые усилия копания. Если для копания усилий на зубьях будет недостаточно для заполнения ковша, то увеличивают давление в лимитирующих гидроцилиндрах.

Выводы.

1. Разработанная математическая модель и программа для ЭВМ позволяют определять усилия на штоках гидроцилиндров, в шарнирах при копании и транспортировании ковша.

2. Для экскаватора с ковшом 4 м³ проведены расчеты усилий копания и усилий при транспортировании, выявлено, что реакции в пяте стрелы и шарнире «рукоять-стрела» от усилий при транспортировании при некоторых значениях угловой скорости и угловом ускорении на 5-30% превышают реакции от усилий при копании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

3. Подэрни Р.Ю., Петер Б. Эффективность применения мощных гидравлических экскаваторов – результат повышения их надежности // Горная промышленность. 2015. № 1 (119). С. 46.

4. Иванов И.Ю., Комиссаров А.П., Телиман И.В., Лукашук О.А. Анализ рычажно-гидравлических механизмов рабочего оборудования гидравлических экскаваторов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. – 410 с., С. 51-54.

5. Зыков П.А. Методика оптимального выбора модели карьерного одноковшового гидравлического экскаватора под заданные горно-геологические и технические условия // Горное оборудование и электромеханика. - № 1. – 2014, С. 37-42.

6. Бабенков П.Ю., Шестаков В.С. Моделирование рабочего процесса гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. – № 1. – 2018, С. 10-14.

7. Лукашук О.А., Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А. Разработка цифровой системы управления главными приводами карьерного экскаватора как важнейшее направление повышения эффективности работы экскаватора. (2020) Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия, 709 (2), статья № 022117, [https:// www.scopus.com](https://www.scopus.com) DOI: 10.1088 / 1757-899X / 709/2/022117

8. Комиссаров А.П., Шестаков В.С. Имитационная модель функционирования рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. – № 8. – 2013, С. 20-24.

9. Побегайло П.А. Математическая модель определения нагруженности одноковшового гидравлического экскаватора обратного копания // Интерстроймех – 2002. С. 179-181.

10. Victor Shestakov, Pavel Bezkorovainyy 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.

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. Frimpong S., Li Y. Virtual Prototype Simulation of Hydraulic Shovel Kinematics for Spatial Characterization in Surface Mining Operation // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2005, Vol. 19, № 4, pp. 238-250.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-15-20

Anatoly P. Komissarov, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Viktor S. Shestakov**, C. Sc. in Engineering, Professor, **Rustem Sh. Nabiullin**, Associate Professor, C. Sc. in Engineering, **Sergey A. Horoshavin** Associate Professor, C. Sc. in Engineering

Ural state mining University, 20144, Russia, Yekaterinburg, Str. Kuybysheva, 30

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

RESEARCH OF LOADING OF WORKING EQUIPMENT OF HYDRAULIC EXCAVATOR «BACK SHOVEL»

Abstract.

The article explores the possibility of increasing the efficiency of the operation of hydraulic excavators by choosing rational parameters, on which the cost of mining significantly depends. When designing excavators, the parameters of the working equipment: the dimensions of the sections of the boom, stick and bucket are determined according to the strength conditions in which the calculations of stresses are performed based on the design forces. Unreasonably set values of forces in such calculations lead in some cases to an increase in the mass of the working equipment, or to the destruction of elements during operation. The values of the efforts during the execution of the working process vary widely depending on the position of the bucket in the working area, depending on the resistance on the teeth of the bucket. Having determined the exact values of the forces, it will be possible to set the cross-sections of the elements without excessive safety margins and thereby reduce the weight of the boom and stick. With a decrease in the weight of the boom and handle of the working equipment, it will be possible to increase the bucket capacity and thereby the performance of the excavator. Purpose of the work: development of a methodology for determining the loads on the working equipment when performing work operations. Research results. For a hydraulic excavator with "backhoe" working equipment, a mathematical model has been developed for calculating forces when digging and transporting a bucket, an algorithm and a program in an algorithmic language that allow determining possible forces in the elements of working equipment 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 required digging force and during transportation. The force values are used in the subsequent strength analysis.



Article info

Received:

13 November 2021

Revised:

30 November 2021

Accepted:

03 December 2021

Keywords: hydraulic excavator, working equipment, boom, stick, bucket, hydraulic cylinder, digging, transportation

For citation Komissarov A.P., Shestakov V.S., Nabiullin R.S., Horoshavin S.A. Research of loading of working equipment of hydraulic excavator «Back shovel». Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.6 (158), pp. 15-20. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-15-20

REFERENCES

1. Pobegaylo P.A. Moshchnyye odnokovshovyye gid-ravlicheskiye ekskavatory: Vybor osnovnykh geometricheskikh parametrov rabochego oborudovaniya na rannikh stadiyakh proyektirovaniya. – M.: LE-NAND, 2014. – 296 s.

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

3. Poderni R.Yu., Peter B. Effektivnost' primeneniya moshchnykh gidravlicheskiy ekskavatorov – rezul'tat povysheniya ikh nadezhnosti //Gornaya promyshlennost'. 2015. № 1 (119). S. 46

4. Ivanov I.Yu., Komissarov A.P., Teliman I.V., Lukashuk O.A. Analiz rychno-gidravlicheskih mekhanizmov rabochego oborudovaniya gidravlicheskih ekskavatorov // Tekhnologicheskoye oborudovaniye dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. – Yekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy gornyy univer-sitet, 2017. – 410 s., S. 51-54

5. Zykov P.A. Metodika optimal'nogo vybora modeli kar'yernogo odnokovshovogo gidravlichesko-go ekskavatora pod zadannyye gorno-geologicheskiye i tekhnicheskkiye usloviya//Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika. - № 1. – 2014, S. 37-42.

6. Babenkov P.Yu., Shestakov V.S. Modelirovaniye rabochego protsessa gidravlicheskogo ekskavatora // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika. - № 1. – 2018, S. 10-14.

7. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Lagunova Yu.A. Razrabotka tsifrovoy sistemy upravleniya glavnymi privodami kar'yernogo ekskavatora kak vazhneysheye napravleniye povysheniya effektivnosti raboty ekskavatora. (2020) Seriya konferentsiy IOP: Materialovedeniye i inzheneriya, 709 (2), stat'ya №

022117, [https:// www.scopus.com](https://www.scopus.com) DOI: 10.1088 / 1757-899X / 709/2/022117

8. Komissarov A.P., Shestakov V.S. Imitatsi-onnaya model' funktsionirovaniya rabochego oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika. – № 8. – 2013, S. 20-24.

9. Pobegaylo P.A. Matematicheskaya model' opredeleniya nagruzhennosti odnokovshovogo gidravlicheskogo ekskavatora obratnogo kopaniya //Interstroymekh – 2002. S. 179-181.

10. Victor Shestakov, Pavel Bezkorovainyy 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. Apakshiev, D. Simisinov and A. Glebov (Eds.), Pp. 100-104.

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. Frimpong S., Li Y. Virtual Prototype Simulation of Hydraulic Shovel Kinematics for Spatial Characterization in Surface Mining Operation // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2005, Vol. 19, № 4, pp. 238-250.