

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА ОТКРЫВАНИЯ КОВША ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА НА УСЛОВИЯ РАЗГРУЗКИ

Васильев Д.А., Поспелов А.И., Щетинин В.С.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

Ключевые слова: гидравлический экскаватор, прямая лопата, ковш, механизм открывания ковша, инерционные силы, кинематический анализ, уравнения замкнутости, угловая скорость, угловое ускорение.

Аннотация. В статье рассмотрен механизм открывания ковша гидравлического экскаватора с рабочим оборудованием прямая лопата, в котором для интенсификации разгрузки введено дополнительное звено, обеспечивающее эксцентрическое движение козырька. Показано, что в начальной фазе открывания определяющим фактором является не только величина раскрытия ковша, но и быстрое снижение нормальной реакции грунта на поверхность козырька, приводящее к уменьшению сил трения и облегчению выхода материала. Сформулировано условие перехода к режиму отрыва прилегающего слоя грунта от козырька и выполнено его качественное обоснование. Для анализа работы механизма составлена расчётная кинематическая схема, записаны уравнения замкнутости контуров и получены соотношения для аналогов угловых скоростей и ускорений звеньев. На основе аналитического рассмотрения и моделирования проанализировано влияние геометрических параметров механизма, прежде всего соотношения длин плеч коромысла и расстояния между шарнирами выходного звена, на величины угловой скорости и ускорения козырька в начальной фазе раскрытия. Сформулирована задача подбора геометрических параметров механизма по критерию обеспечения режима отрыва при соблюдении геометрических, силовых, динамических и технологических ограничений.

INFLUENCE OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF A HYDRAULIC EXCAVATOR BUCKET OPENING MECHANISM ON DISCHARGE CONDITIONS

Vasiljev D.A., Pospelov A.I., Schetinin V.S.

Far Eastern state transport university, Khabarovsk

Keywords: hydraulic excavator, face shovel, bucket, bucket opening mechanism, inertial forces, kinematic analysis, loop-closure equations, angular velocity, angular acceleration.

Abstract. The paper considers a bucket opening mechanism for a hydraulic excavator equipped with a face shovel attachment, in which an additional link is introduced to intensify bucket discharge by providing eccentric motion of the visor. It is shown that, at the initial stage of opening, the governing factor is not only the bucket opening width but also the rapid reduction of the normal reaction exerted by the material on the visor surface, which leads to lower friction forces and facilitates material discharge. A criterion for transition to the detachment mode of the material layer adjacent to the visor is formulated and qualitatively substantiated. For analysis of the mechanism, a design kinematic scheme is developed, loop-closure equations are written, and relationships for the angular velocity and angular acceleration coefficients of the links are obtained. Based on the analytical study and simulation results, the influence of the mechanism geometric parameters, primarily the rocker arm ratio and the distance between the joints of the output link, on the visor angular velocity and angular acceleration at the initial opening stage is examined. A problem statement is formulated for selecting the mechanism geometric parameters according to the criterion of ensuring the detachment mode under geometric, force, dynamic, and technological constraints.

Введение

Парк одноковшовых гидравлических экскаваторов, занятых в открытых горных работах постоянно растёт за счёт постепенного замещения малых механических лопат. Статистические данные показывают рост доли этих машин от всех выемочно-погрузочных средств с 28% до 50% за последние тридцать лет (по данным Parker Bay Company, а также [1-3]).

Одноковшовые гидравлические экскаваторы являются основным технологическим оборудованием открытых горных работ и выполняют до 80% от общего объёма работ по выемке и перемещению полезных ископаемых [4]. Основным исполнительным органом этих машин является ковш. Повысить их производительность можно за счёт совершенствования трансмиссии и силового оборудования [4, 5].

Основными элементами конструкции ковша гидравлического экскаватора с оборудованием прямая лопата – это основание и поворотный козырёк с гидромеханизмом открывания. В настоящее время в конструкции ковша используется механизм с простым поворотом козырька относительно основания, что ведёт к повышенным усилиям на выполнение поворота, требующих увеличенных размеров гидроцилиндров, а также значительного времени на раскрытие ковша при разгрузке.

В работах [6-8] установлено, что снижение трения грунта о поверхность ковша при разгрузке и, тем самым, уменьшение усилия на открывание козырька достигается при условии потери контакта грунта с поверхностями козырька. Для достижения этого условия предлагается отводить козырёк от массы грунта в начале разгрузки, существуют конструкции ковшей с различными вариантами модифицированных механизмов раскрытия [9, 10].

Предлагается использовать ковш модифицированной конструкции (рис. 1), которая в отличие от конструкции ковшей традиционной схемы, обеспечивает эксцентрическое движение козырька в начальной фазе открывания и гидроцилиндр открывания установлен таким образом, что раскрытие происходит при выдвижении штока. Это позволяет использовать полную площадь поршня для преодоления сопротивлений открыванию и создавать условия для быстрого отвода козырька от прилегающего слоя грунта.

Цель работы – установить влияние геометрических параметров модифицированного механизма открывания ковша на кинематику козырька и условия реализации режима отрыва от грунта в начальной фазе разгрузки.

Объект и методы исследования

Принимая во внимание, что масса грунта инерционно задерживается в ковше и своё движение начинает под действием гравитационных сил с ускорением свободного падения, в этот момент необходимо отодвинуть козырёк от самого грунта с ускорением, что позволит снизить усилие прижима грунта или полностью его исключить. Реализовать это дополнительное движение можно введением в конструкцию механизма раскрытия дополнительного звена 4 (рис. 1). Принцип работы модифицированного механизма заключается в том, что дополнительное звено 4, связывающее основание 1 с козырьком 5 при незначительном усилии приводного гидроцилиндра 2, требующегося лишь на

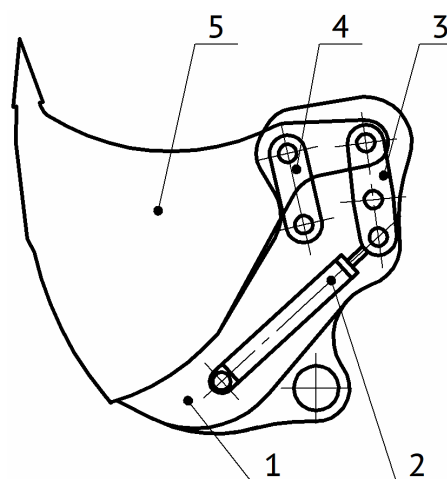


Рис. 1. Предлагаемая конструкция механизма раскрытия ковша: 1 – основание ковша; 2 – гидроцилиндр открывания; 3 – двуплечий рычаг; 4 – коромысло; 5 – козырёк

преодоление инерции козырька 5, позволяет отодвинуть его на расстояние, позволяющее свободный выход грунта из ковша. Помимо внесения дополнительной степени свободы предлагаемый механизм предусматривает закрепление штока гидроцилиндра 2 к двуплечему рычагу 3 для того, чтобы открывание козырька происходило при выдвижении штока, то есть при использовании полной площади поршня для преодоления сопротивлений открыванию.

Конструкция такого ковша с дополнительной степенью свободы козырька и работой гидроцилиндров на выдвижение при открывании позволяет применить гидроцилиндры меньшего размера и массы, тем самым понизить массу ковша, скорость разгрузки и требуемый расход жидкости на открывание, что в свою очередь позволит увеличить полезную массу грунта и повысить производительность работы экскаватора.

Определение геометрических размеров звеньев, их взаимного расположения, требуемых кинематических и силовых параметров и мощности гидропривода требует выполнения силовых расчётов, учитывающих действие инерционных сил всех звеньев механизма, включая козырёк. Для решения этой задачи составляется принципиальная кинематическая схема механизма (рис. 2).

Физическая модель разгрузки

Для определения действующих на козырёк со стороны грунта сил, необходимо рассмотреть движение грунта в момент открывании ковша. Для этого составим схему взаимодействия частиц грунта с элементами ковша (рис. 3). В начальной фазе открывания решающим является не факт появления зазора между козырьком и основанием, а быстрая потеря контакта находящегося в ковше грунта с поверхностью козырька. Для характерной частицы грунта, опирающейся на внутреннюю поверхность козырька, нормальная реакция определяется разностью между нормальной составляющей g и нормальной составляющей ускорения козырька a . Поскольку предельная сила сухого трения пропорциональна нормальной реакции N , рост ускорения козырька a в направлении разгрузки контакта непосредственно уменьшает максимально возможное трение, а соответственно сопротивления сдвигу.

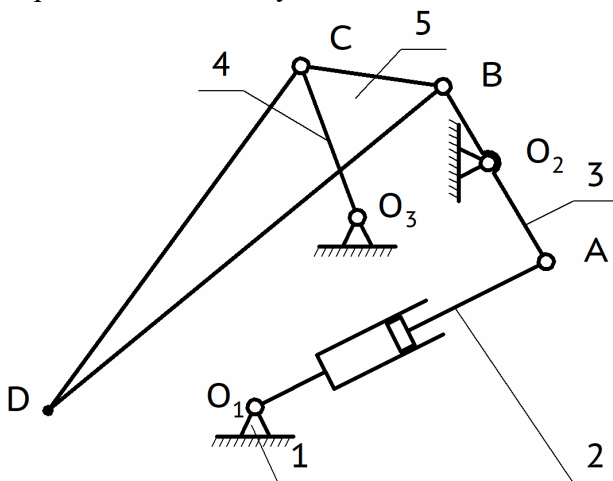


Рис. 2. Принципиальная кинематическая схема механизма

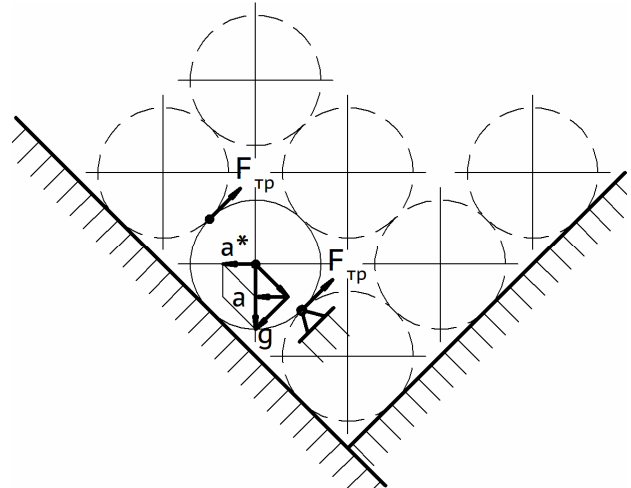


Рис. 3. Взаимодействие частиц грунта с элементами ковша

Рассматривая локальные режимы движения частицы грунта, находящейся в контакте с козырьком, можно выделить два механизма перехода к разгрузке. В ковшах традиционной конструкции, в режиме скольжения, частица грунта ещё касается козырька, то есть контакт сохраняется, нормальная реакция $N > 0$, но удержать её на поверхности уже нельзя. Тогда начинается относительное перемещение вдоль внутренней поверхности козырька. В этом режиме требуемая касательная сила становится больше предельной силы статического трения, и контакт переходит из состояния покоя в скольжение, этот процесс описывается законом трения Кулона.

Другой режим – это отрыв. Такой режим реализуется в предлагаемом ковше с эксцентрическим движением козырька. В этом режиме грунт уже не может оставаться прижатым к козырьку вообще, потому что нормальная реакция падает до нуля при достижении $a \geq g \sin \alpha \sin \beta / (\sin \alpha + \sin \beta)$, где g – ускорение свободного падения; α , β – углы наклона к горизонтали козырька ковша и основания ковша соответственно, в точке контакта частицы. Тогда контакт «грунт – козырёк» исчезает, и кусок грунта перестаёт следовать траектории козырька. После этого его движение определяется уже не трением о козырёк, а в основном гравитацией, инерцией и последующими контактами с соседними кусками, днищем козырька, задней стенкой и формирующимся потоком.

Таким образом, так как в ковше с эксцентрическим движением козырька в начальной фазе открывания козырёк совершает движение, преимущественно нормальное к поверхности днища, это обеспечивает быстрое снижение нормальной реакции со стороны материала, уменьшение сил трения и разрушение локальной контактной структуры у зева ковша.

В результате последующее истечение развивается после ослабления или потери контакта грунта с козырьком.

Рациональная кинематика открытия должна включать импульс нормального ускорения, направленного на вывод козырька из-под массива грунта с достижением $a \geq g \sin \alpha \sin \beta / (\sin \alpha + \sin \beta)$ с целью быстро сорвать контакт и предотвратить образование свода у зева ковша. После этого необходимо обеспечить дальнейший рост проёма до величины, достаточной для устойчивого истечения материала.

Следовательно, эффективное опорожнение ковша определяется сочетанием двух условий: быстрой разгрузки контакта в начале движения и достаточного геометрического раскрытия в последующей фазе. Эта связка условий положена в основу дальнейшего моделирования механизма и экспериментального подтверждения.

Кинематическое моделирование механизма

Проведём кинематическое исследование плоского рычажного механизма с гидроцилиндром в качестве входного звена аналитическим методом. Расчётная схема механизма приведена на рисунке 4.

Рассмотрим контур O_1AO_2 . Векторное уравнение замкнутости контура:

$$\vec{l}_3 + \vec{S} - \vec{a} = 0, \quad (1)$$

где $l_3 = O_2A$ – длина плеча O_2A коромысла 3; S – обобщённая переменная; $a = O_1O_2$ – расстояние между стойками O_1 и O_2 .

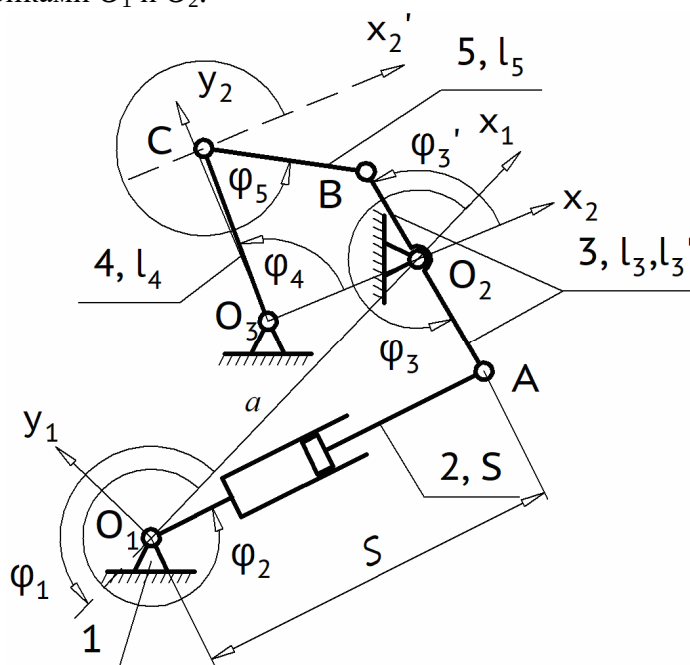


Рис. 4. Расчётная схема механизма

Проекция уравнения (1) на оси O_1X_1 , O_1Y_1 :

$$\begin{cases} l_3 \cdot \cos \varphi_3 + S \cdot \cos \varphi_2 - a = 0, \\ l_3 \cdot \sin \varphi_3 + S \cdot \sin \varphi_2 = 0, \end{cases}$$

где φ_3 – угол поворота звена 3 относительно оси O_1X_1 ; φ_2 – угол поворота звена 2 относительно оси O_1X_1 .

Выполним дифференцирование по обобщённой координате S для получения аналогов скоростей и ускорений. После получения угловых зависимостей дифференцируем их по S и получим аналоги угловой скорости и углового ускорения звена 3, откуда угловая скорость ω_3 и угловое ускорение ϵ_3 звена 3:

$$\begin{aligned} \omega_3 &= S \cdot U_{3s}; \\ \epsilon_3 &= \dot{S}^2 \cdot U'_{3s} + \ddot{S} \cdot U_{3s}, \end{aligned}$$

где U_{3s} – аналог угловой скорости звена 3; U'_{3s} – аналог углового ускорения звена 3.

Рассмотрим условие замкнутости контура O_2BCO_3 :

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_4 + \vec{l}_5 = \vec{l}_3', \quad (2)$$

где l_1 – расстояние между стойками O_2 и O_3 ; l_4, l_5 – длина звеньев соответственно 4 и 5; l_3' – длина плеча O_2B коромысла 3.

Проекции (2) на оси O_3X_2 и O_3Y_2 соответственно:

$$\begin{cases} -l_1 + l_4 \cdot \cos \varphi_4 + l_5 \cdot \cos \varphi_5 = l_3' \cdot \cos \varphi_3', \\ l_1 + l_4 \cdot \sin \varphi_4 + l_5 \cdot \sin \varphi_5 = l_3' \cdot \sin \varphi_3', \end{cases}$$

где φ_4 – угол поворота звена 4 относительно оси O_3X_2 ; φ_5 – угол поворота звена 2 относительно оси O_3X_2' ; φ_3' – угол поворота звена 3 относительно оси O_3X_2 .

После дифференцирования из полученных аналогов угловой скорости звена 4 через входной угол звена 3 выражаем реальную угловую скорость и угловое ускорение для звена 4:

$$\omega_4 = \omega_3 \cdot U_{43};$$

$$\varepsilon_4 = \omega_3^2 \cdot U'_{43} + \varepsilon_3 \cdot U_{43},$$

где U_{43} – аналог угловой скорости звена 4; U'_{43} – аналог углового ускорения звена 4.

Проведённый на основе полученных зависимостей анализ показывает, что важным параметром механизма является соотношение длин плеч коромысла 3:

$$\lambda = \frac{O_2A}{O_2B}.$$

При прочих равных параметрах механизма уменьшение λ ведёт к росту угловой скорости и углового ускорения козырька 4, а рост λ – к их снижению.

Значимо влияющими на кинематику и динамику параметрами механизма также являются и другие размерные параметры, например расстояние l_5 между шарнирами B и C (рис. 4).

Требуется подобрать геометрические параметры механизма открывания ковша, прежде всего длины звеньев O_2A , O_2B , расстояние l_5 а при необходимости и связанные с ними постоянные размеры схемы, так, чтобы в начальной фазе открывания обеспечить режим отрыва прилегающего к козырьку слоя грунта. При этом необходимо соблюдение геометрических, силовых, динамических и технологических ограничений.

Для наглядности представим движение механизма открывания ковша с изменением указанных параметров смоделировав движения рычажного механизма (рис. 5, 6). На рисунке 5 показано влияние величины отношения λ на ускорение при раскрытии козырька ковша. На рисунке 6 приведены результаты моделирования механизма с изменением расстояния l_5 , показывающие влияние длины звена на ускорение и форму траектории движения нижней кромки козырька.

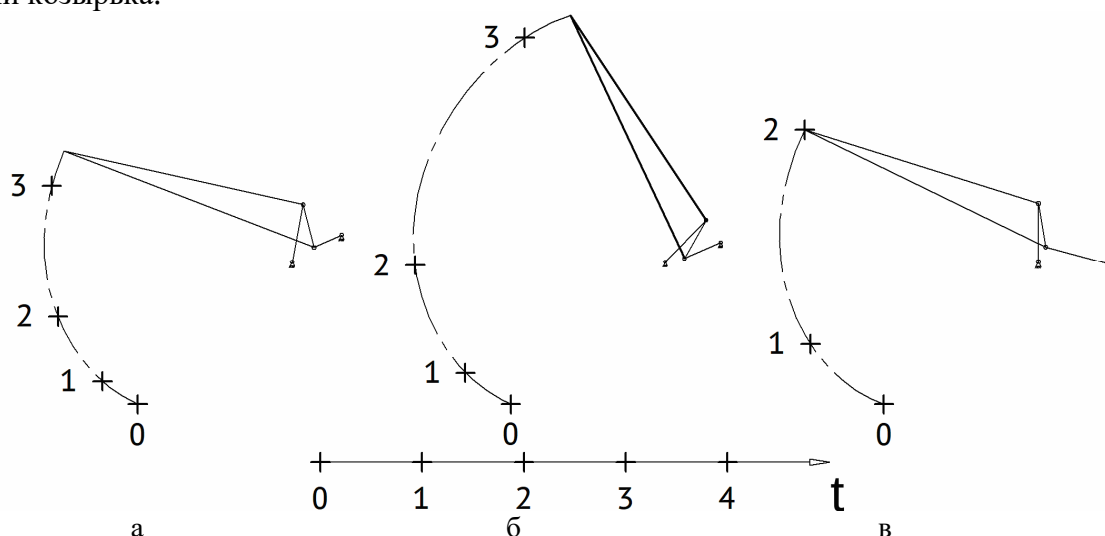


Рис. 5. Влияние λ на кинематику механизма: а) $\lambda > 1$, б) $\lambda = 1$, в) $\lambda < 1$

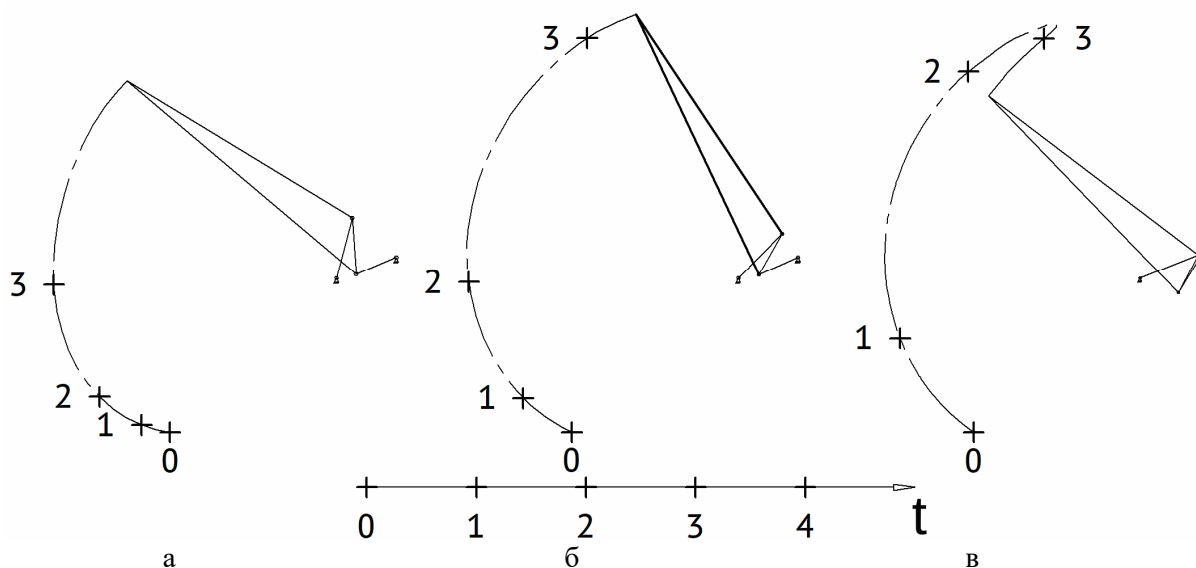


Рис. 6. Влияние l_5 на кинематику механизма: а) $l_5 > l_5^{onm}$, б) $l_5 = l_5^{onm}$, в) $l_5 < l_5^{onm}$

Выводы

Представленные результаты моделирования движения механизма подтверждает выводы, полученные в результате аналитических расчётов: при увеличении соотношения λ , равно как и при увеличении l_5 ускорение движения козырька снижается, при уменьшении λ и l_5 ускорение растёт.

На основе кинематического и силового анализа схемы установлено, что применение эксцентрического закрепления козырька к основанию ковша уменьшает сопротивление раскрытию ковша в 10...12 раз, что возможно реализовать в увеличении вместимости ковша и производительности. Оценочно определено, что данный подход позволит повысить производительность на 5...6%.

В настоящее время в ДВГУПС ведутся работы по совершенствованию конструкций ковшей карьерных экскаваторов.

Список литературы

1. Качурин Н.М., Курехин Е.В., Мельник В.В. Обоснование параметров экскаваторно-автомобильных комплексов на угольных разрезах с учетом фактора надежности // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – №1. – С. 224-238.
2. Нанзад Ц., Зэндмэнэ Ч. Обоснование обновления парка экскаваторов Багануурского разреза // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №12. – С. 325-329.
3. Burt C.N., Caccetta L. Literature Review // Equipment Selection for Mining: With Case Studies. Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham, 2018, vol. 150, pp. 25-51. – doi.org/10.1007/978-3-319-76255-5_3.
4. Телиман И. В. Обоснование рациональных конструктивных и режимных параметров исполнительных механизмов рабочего оборудования гидравлического экскаватора: Дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2022. – 122 с.
5. Ding J., Ding H., Yang W. Dynamic Modeling of a Novel Multi-Loop Multi-Body Mechanism of Face-Shovel Excavator // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2025, vol. 38, p. 38. doi.org/10.1186/s10033-024-01166-7.
6. Шемякин С.А., Иванченко С.Н., Чебан А.Ю., Белов В.Е. Усовершенствованные рабочие органы одноковшовых землеройных машин для выемки пород // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – №1. – С. 12-15.
7. Шемякин С.А., Сидорков В.В., Васильев Д.А. Обоснование усовершенствованной конструкции механизма раскрытия ковша экскаватора с погрузочным оборудованием или прямой лопатой // Строительные и дорожные машины. – 2021. – №9. – С. 36-40.
8. Шемякин С.А., Шишкин Е.А., Васильев Д.А. Определение силы раскрытия ковша гидравлического экскаватора // Справочник. Инженерный журнал. – 2023. – №7(316). – С. 27-31. – doi.org/10.14489/hb.2023.07.pp.027-031.
9. Патент №2555992 РФ. Ковш экскаватора / С.А. Шемякин. – Заявка №2014120867 от 22.05.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. №19.

10. Патент №2704669 РФ. Ковш экскаватора / С.А. Шемякин, Д.А. Васильев. – Заявка №2019106732 от 11.03.2019; опубл. 30.10.2019, Бюл. №31.

References

1. Kachurin N.M., Kurekhin E.V., Melnik V.V. Substantiation of parameters of excavator-automobile complexes at coal mines taking into account the reliability factor // News of Tula State University. Earth Sciences. 2023, no. 1, pp. 224-238.
2. Nanzad Ts., Zendmene Ch. Substantiation of renewal of the excavator fleet of the Baganuur open pit // Mining informational and analytical bulletin. 2011, no. 12, pp. 325-329.
3. Burt C.N., Caccetta L. Literature Review // Equipment Selection for Mining: With Case Studies. Studies in Systems, Decision and Control. – Springer, Cham, 2018, vol. 150, pp. 25-51. – doi.org/10.1007/978-3-319-76255-5_3.
4. Teliman I.V. Substantiation of rational design and operating parameters of executive mechanisms of the working equipment of a hydraulic excavator: Diss. ... cand. of tech. sc. – Yekaterinburg, 2022. – 122 p.
5. Ding J., Ding H., Yang W. Dynamic Modeling of a Novel Multi-Loop Multi-Body Mechanism of Face-Shovel Excavator // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2025, vol. 38, p. 38. doi.org/10.1186/s10033-024-01166-7.
6. Shemyakin S.A., Ivanchenko S.N., Cheban A.Yu., Belov V.E. Improved working bodies of single-bucket earthmoving machines for rock excavation // Mining Equipment and Electromechanics. 2014, no. 1, pp. 12-15.
7. Shemyakin S.A., Sidorkov V.V., Vasiliev D.A. Substantiation of an improved design of the bucket opening mechanism of an excavator with loading equipment or face shovel // Construction and Road Building Machines. 2021, no. 9, pp. 36-40.
8. Shemyakin S.A., Shishkin E.A., Vasiliev D.A. Determination of the opening force of a hydraulic excavator bucket // Handbook. An Engineering Journal. 2023, no. 7(316), pp. 27-31. doi.org/10.14489/hb.2023.07.pp.027-031.
9. Patent No. 2555992 RU. Bucket of an excavator / S.A. Shemyakin. – Appl. No. 2014120867 from 22.05.2014; publ. 10.07.2015, Bul. No. 19.
10. Patent No. 2704669 RU. Bucket of an excavator / S.A. Shemyakin, D.A. Vasiliev. – Appl. No.2019106732 from 11.03.2019; publ. 30.10.2019, Bul. No 31.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Васильев Донат Александрович – старший преподаватель кафедры «Транспортно-технологические комплексы»	Vasiljev Donat Aleksandrovich – senior lecturer of the Department of transport and technological complexes
Поспелов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические комплексы»	Vasiljev Donat Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of transport and technological complexes
Щетинин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы»	Schetinin Vladimir Sergeevich – doctor of technical sciences, professor of the Department of transport and technological complexes
donat.a.vasiljev@ya.ru	

Получена 10.04.2026