

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15

Маслеников Олег Александрович¹, Комиссаров Анатолий Павлович^{1,2},
Лагунова Юлия Андреевна^{1,2}, Шестаков Виктор Степанович¹

¹ Уральский государственный горный университет² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

* для корреспонденции: Shestakov.v.s@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭКСКАВАТОРА



Информация о статье

Поступила:

31 октября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

14 ноября 2025 г.

Принята к печати:

15 ноября 2025 г.

Опубликована:

18 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

экскаватор гидравлический,
рабочее оборудование, ковш,
усилие, рабочий процесс, ма-
тематическая модель, про-
грамма

Аннотация.

На экскаваторах с гидравлическим приводом применяется рабочее оборудование «прямая» и «обратная» лопата. Для некоторых условий эксплуатации, например, для обработки широкого забоя, копание выше и ниже уровня стояния, стандартное оборудование не обеспечивает требуемые технологические операции, поэтому разработка нового типа рабочего оборудования является актуальной задачей. Разработана схема универсального рабочего оборудования экскаватора с подвижным днищем ковша, в котором в зависимости от движения последнего происходит его автоматическое переключение на работу в режиме прямой или обратной лопаты. Для этой схемы разработано математическое описание рабочего процесса также для двух вариантов эксплуатации экскаватора, которое включено в методику определения параметров, основанную на математических моделях кинематического и силового анализа по расчетной схеме. Касательная составляющая усилия сопротивления копания в режиме прямой лопаты от усилий гидроцилиндра ковша определяется по условию равновесия сил. Для практического применения составлена программа на алгоритмическом языке Visual Basic в приложении Microsoft Excel. Поиск возможного усилия на зубьях с учетом работы всех гидроцилиндров выполняется в модели силового анализа. Результаты позволяют выявить лимитирующий механизм, от которого зависит максимальное усилие копания. Результаты представлены в виде таблиц, графиков, схем, гистограмм. Также по линейным размерам рабочего оборудования определяется рабочая зона экскаватора для двух режимов работы ковша с выводом результатов расчета в таблицу с указанием координат зуба ковша и возможных усилий копания, а также формируется и выводится в масштабе на отдельный лист книги Excel рисунок границ зоны

Для цитирования: Маслеников О.А., Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Разработка методики определения параметров универсального экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 10-15. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15, EDN: FYZJEN

Введение. В настоящее время на горных предприятиях применяются гидравлические экскаваторы с рабочим оборудованием «прямая» и «обратная» лопаты. В строительстве применяются экскаваторы и с другими исполнениями, например, с двухчелюстным ковшом, с гидромолотом, с грейфером и др.

Проблемам совершенствования конструкций гидравлических карьерных экскаваторов посвящено большое число научных работ, в которых рассмотрены вопросы проектирования [1-7], представлены исследования, относящиеся к рабочему оборудованию [8-9], имеются также публикации по

эксплуатации гидравлических экскаваторов в реальных горных условиях [10-13], имеются публикации по методикам расчета параметров [14-16], но все они относятся к стандартному рабочему оборудованию.

Нами разработана схема универсального гидравлического экскаватора, ковш которого имеет подвижное днище с переводом ковша для копания прямой и обратной лопатами [18], показанная на Рис. 1. Экскаваторы с таким исполнением обеспечивают отработку забоя большей ширины по сравнению с традиционными схемами прямой и обратной лопатами. Особенно такой выигрыш будет эффек-

тивным при строительстве широких траншей, когда экскаватор может находиться только с одной стороны траншеи.

Рабочее оборудование экскаватора содержит стрелу, рукоять, ковш, выполненный с шарнирно установленной на оси и размещенной между боковыми стенками подвижной задней стенкой, перемещение которой ограничивается упорами, закрепленными на боковых стенках, причем днище ковша имеет округлую форму и оснащено двумя режущими кромками, закрепленными на торцах днища, гидроцилиндрами поворота стрелы, рукояти и ковша, а также тяги.

Рабочее оборудование экскаватора действует следующим образом. При копании прямой лопатой верхним черпанием подвижная задняя стенка опускается до упора под собственным весом и при внедрении режущей кромки ковша в массив породы происходит его заполнение. Груженный ковш транспортируется к месту разгрузки при одновременной установке его в транспортное положение гидроцилиндрами поворота стрелы, рукояти и ковша. Разгрузка породы из ковша производится через кромку ковша при его повороте под действием гидроцилиндра поворота ковша. При разгрузке ковша задняя стенка опускается и способствует быстрому опорожнению ковша. Затем порожний ковш перемещается в забой.

При копании обратной лопатой нижним черпанием подвижная задняя стенка под напором породы, поступающей в ковш, поворачивается до упора по мере заполнения ковша. Далее рабочий цикл происходит аналогично.

Методика проведения исследований.

Для универсальной схемы разработана методика расчета параметров, основанная на математических моделях кинематического и силового анализа по расчетной схеме (Рис. 2). На схеме обозначено: *ADHC, HEGO, OKK'* – контур стрелы, рукояти и ковша; *BC, DE, FL* – расстояние между осями крепления при перемещении штоков гидроцилиндров стрелы, рукояти и ковша; *LF, LG, LM, NM, OG* – элементы, обеспечивающие передачу усилий и движения на ковш от гидроцилиндров; *G_с, G_р, G_к, G_{цс}, G_{цр}, G_{цк}, G_{ЕФН}, G_{ГЛМ}* – сила тяжести стрелы, рукояти, ковша, гидроцилиндров стрелы, рукояти, ковша, элементов передачи усилий; *h_А, h_Н, h_О* – плечи передачи усилий, *P₀₁, P₀₂* – касательная и нормальная составляющие усилия сопротивления копанью.

Математическая модель кинематического анализа включает выражения определения координат и углов через линейные размеры элементов стрелы, рукояти и ковша, положений гидроцилиндров (ГЦ), по изменяющимся расстояниям при перемещении штоков гидроцилиндров. Модель реализована в компьютерной программе, в которой для упрощения анализа и наглядности выводятся в табличной форме и в виде рисунка результаты расчета возможной рабочей зоны при введенных значениях исходных данных, которые показаны на Рис. 3.

Математическая модель силового анализа составлена по расчетной модели (Рис. 2). Для анализа

результатов влияния параметров в модель включены выражения для расчета возможных усилий на зубьях ковша при независимом действии гидроцилиндров рабочего оборудования, а также при совместной работе всех приводов.

Касательная составляющая усилия сопротивления копанью в режиме прямой лопаты от усилий гидроцилиндра ковша определяется по условию равновесия усилий относительно оси *O*

$$P_{01.k} = (F_{цк} \cdot h_o - M_o) / OK' \quad (1)$$

где *M_о* – момент от усилий и сил тяжести относительно точки *O*;

$$M_o = G_k \cdot (x_{цтк} - x_o) + 0,5G_{цк} \cdot (x_L - x_o) + G_{GLM} \cdot ((x_L + x_M)/2 - x_o) \quad (2)$$

Нормальную составляющую *P_{02.к}* принято определять по касательной через коэффициент 0,1..0,2 [1].

Касательная составляющая усилия сопротивления копанья от усилий гидроцилиндра рукояти

$$P_{01.p} = (F_{цр} \cdot h_H - M_H) / HK' \quad (3)$$

где *M_Н* – момент от усилий и сил тяжести относи-

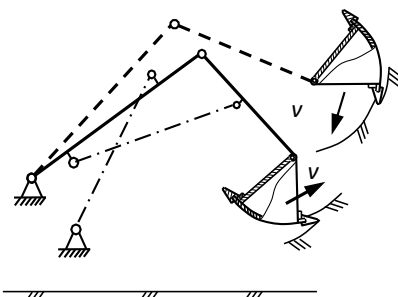


Рис. 1. Схема положений стенки ковша при копании

Fig. 1. Diagram of the bucket wall positions during digging

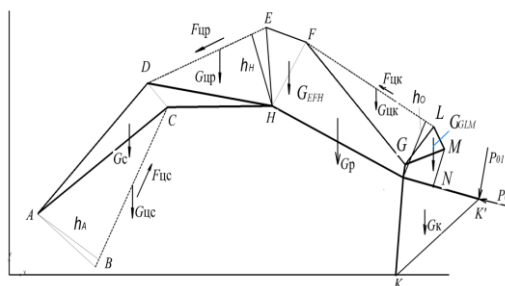


Рис. 2. Схема к расчету параметров

Fig. 2. Scheme for calculating parameters

тельно точки *H*

$$M_H = G_k \cdot (x_{цтк} - x_H) + 0,5G_{цр} \cdot (x_E - x_H) + G_{GLM} \cdot \left(\frac{x_L + x_M}{2} - x_H \right) + G_p \cdot (x_{цтр} - x_H) + G_{цк} \cdot \left(\frac{x_L + x_F}{2} - x_H \right) + P_{02.p} \cdot (y_{K'} - x_H). \quad (4)$$

Касательная составляющая усилия сопротивления копанья от усилий гидроцилиндра стрелы

$$P_{01.c} = (F_{цс} \cdot h_A - M_A) / AK' \quad (5)$$

где *M_А* – момент от усилий и сил тяжести относительно точки *A*

$$M_A = G_k \cdot (x_{цтк} - x_A) + 0,5G_{цс} \cdot (x_C - x_A) + G_{GLM} \cdot \left(\frac{x_L + x_M}{2} - x_A \right) + G_p \cdot (x_{цтр} - x_A) - G_{цк} \cdot \left(\frac{x_L + x_F}{2} - x_A \right) + G_{цр} \cdot \left(\frac{x_D + x_E}{2} - x_A \right) + G_{EFH} \cdot$$



Рис. 3. Результаты расчета параметров рабочей зоны
Fig. 3. Results of calculating the working area parameters

$$\left(\frac{x_E + x_F}{2} - x_A\right) + G_c \cdot (x_{цтс} - x_A) + P_{02.с} \cdot (x_{к'} - x_A) \quad (6)$$

Выражения (1)-(6) позволяют определить касательной составляющей усилия копания при режиме «прямая лопата» при независимом действии усилий гидроцилиндров. Для режима «обратная лопата» знак у моментов меняется на плюс.

Значения для усилий при независимом действии усилий используются для анализа влияния гидроцилиндров. При реальном рабочем процессе в копании участвуют все гидроцилиндры, даже если копание происходит поворотом ковша, то цилиндры рукояти и стрелы должны обеспечить фиксирование рукояти и стрелы соответствующими усилиями. Если усилие какого-либо цилиндра будет недостаточно для фиксирования, начнется «просадка» штока, и за счет этого уменьшится усилие на зубьях.

Поиск возможного усилия на зубьях с учетом работы всех гидроцилиндров выполняется в модели силового анализа – начиная с возможного усилия по (1) из выражений (3) и (5) определяются требуемые усилия на штоках гидроцилиндров рукояти $F_{цр.тр}$ и стрелы $F_{цс.тр}$, которые сравниваются с номинальными усилиями по исходным данным. В случае превышения требуемых усилий уменьшается усилие на зубьях ковша до тех пор, пока требуемые усилия не будут превышать номинальных значений.

Результаты расчета в программе выдаются в таблицы, графики и на рисунки.

Приведенная часть результатов в Таблице 1 и для всех вариантов рабочей зоны в виде графиков на Рис. 4 показывают, что усилия на зубья ковша должны определяться с учетом действия всех гидроцилиндров.

Графики могут иметь разный тип, так на Рис. 4 приведен линейный график, в котором результаты усилий при копании прямой лопатой от каждого ГЦ соединены отрезками. Такой тип использован

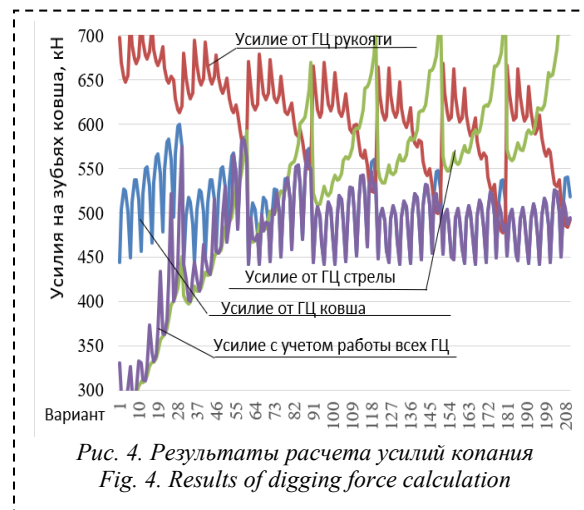


Рис. 4. Результаты расчета усилий копания
Fig. 4. Results of digging force calculation

для наглядной демонстрации зависимости усилий копания от лимитирующих гидроцилиндров. На Рис. 5 приведена гистограмма вывода результатов усилий копания в режиме обратной лопаты с учетом работы всех ГЦ.

Результаты позволяют выявить лимитирующий механизм, от которого зависит максимальное усилие копания.

Выводы по результатам исследований:

1. Для универсального гидравлического экскаватора разработана конструктивная схема рабочего оборудования с ковшом, имеющим подвижную стенку для работы в режиме прямой и обратной лопаты.
2. Разработана методика расчета параметров, включающая математические модели кинематиче-

Таблица 1. Результаты расчета усилий гидроцилиндров и на зубьях ковша
Table 1. Results of calculation of efforts of hydraulic cylinders and on bucket teeth

N	Расстояние			Координаты		Усилие на зубьях при независимом действии цилиндров, кН			Усилия на штоках ГЦ при одновременной работе, кН			Усилие на зубьях с учетом работы всех ГЦ, кН
	BC	DE	FL	Xк'	Yк'	ЦКшт	ЦРшт	ЦСп	ЦК	ЦР	ЦС	
1	5	5	5.5	22.22	-4.52	445	698	282	703	1481	5366	331
2	5	5	6	22.345	-5.423	504	670	278	575	1499	5371	296
3	5	5	6.5	22.25	-6.33	526	653	277	522	1517	5365	279
4	5	5	7	21.90	-7.25	525	648	280	513	1549	5371	281
5	5	5	7.5	21.23	-8.14	501	655	287	555	1601	5368	302
191	8	6	5.5	20.79	9.59	443	642	594	895	1933	4375	443
192	8	6	6	21.23	8.79	494	613	589	895	2281	4789	494
193	8	6	6.5	21.47	7.91	510	596	591	895	2481	4848	510
194	8	6	7	21.48	6.93	501	590	600	895	2532	4593	501
195	8	6	7.5	21.18	5.85	473	596	619	895	2411	4029	473
196	8	6.5	5.5	20.66	7.88	442	610	617	895	1995	4318	442
197	8	6.5	6	20.96	7.02	497	584	616	895	2368	4674	497
198	8	6.5	6.5	21.04	6.11	516	570	622	895	2588	4676	516
199	8	6.5	7	20.88	5.14	511	565	635	895	2651	4372	511
200	8	6.5	7.5	20.40	4.13	486	571	659	895	2531	3774	486
201	8	7	5.5	20.21	6.11	445	568	654	895	2094	4204	445
202	8	7	6	20.34	5.21	503	545	656	895	2506	4493	503
203	8	7	6.5	20.25	4.30	526	533	666	895	2754	4434	526
204	8	7	7	19.91	3.38	524	530	685	895	2833	4081	524
205	8	7	7.5	19.25	2.48	501	537	716	895	2710	3453	501
206	8	7.5	5.5	19.34	4.31	451	514	709	895	2251	4014	451
207	8	7.5	6	19.28	3.40	513	495	717	895	2725	4224	513
208	8	7.5	6.5	19.00	2.53	539	486	733	844	2867	3943	505

ского и силового анализа.

3. Для методики определения рациональных параметров разработан алгоритм и программа на алгоритмическом языке *Visual Basic* в приложении *Microsoft Excel*.

4. Выполненные исследования показали, что максимальные значения усилий копания определяются лимитирующими гидроцилиндрами.

5. Разработанная методика определения рациональных параметров может быть использована при проектировании новых моделей экскаваторов.

Методика может также применяться при эксплуатации экскаваторов в зависимости от требуемых размеров рабочих зон или усилий черпания можно рассчитать размеры тяг крепления гидроцилиндров к ковшу, рукояти и стреле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Проектирование карьерных экскаваторов. М. : Инновационное машиностроение, 2017. 228 с.
2. Побегайло П. А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. М. : ЛЕНАНД, 2014. 296 с.
3. Казаков В. А., Огороков Ю. В. Новые гидравлические экскаваторы ЭГ-110 и ЭГО-110 // Горное оборудование и электромеханика. 2007. № 12. С. 46–50. EDN IITVAX.
4. Xu G., Feng Z., Wang W., Ding H. Constrained multiobjective optimization design for ordinary shovel attachment of hydraulic excavator based on evolutionary algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 135. P. 108839. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108839. EDN BIGBXV.
5. Mishra S. K., Goyal N. K., Mukherjee A. Reliability Analysis and Life Cycle Cost Optimization of Hydraulic Excavator // Journal of Reliability and Statistical Studies. 2024. P. 297–328. DOI: 10.13052/jrss0974-8024.1626. EDN HMTVFG.
6. Lee S. J., Chang P. H. Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26. №1. P. 195–204. DOI: 10.1007/s12206-011-0938-2. EDN TNJDYS.
7. Gongyue Xu, Zemin Feng, Erkuo Guo. Many-objective Optimization Design for TriRocker Working Mechanism of Face-shovel Hydraulic Excavator // Jixie Gongcheng Xuebao. 2023. Vol. 59. № 3. P. 54. DOI: 10.3901/jme.2023.03.054. EDN BWTJSU.
8. Chen J., Qing F., Pang X. Mechanism optimal design of backhoe hydraulic excavator working device based on digging paths. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. №28(1):213–222. DOI: 10.1007/s12206-013-0955-4. EDN MVZZAD.
9. Bradley D. A., Seward D. W., Mann J. E., Goodwin M. R. Artificial intelligence in the control and operation of construction plantthe autonomous robot excavator // Automation in Construction. 1993. Vol. 2(3). Pp. 217–228.
10. Бураков А. М., Панишев С. В., Алькова Е. Л., Хосоев Д. В. Опыт применения гидравлических экскаваторов в сложных горно-геологических и климатических условиях // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 90–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.
11. Салихов Р. Ф., Пермяков В. Б. Исследование влияния динамики технических параметров на эксплуатационную производительность гидравлических одноковшовых экскаваторов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. № 4(98). С. 540–560. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560. EDN UCHWDO.
12. Маслеников О. А., Комиссаров А. П. Математическая модель универсального рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. 2024. Т. 1. С. 71–77. EDN CPSLWK.
13. Хорешок А. А., Пудов Е. Ю. Проектирование перспективного конструктивного исполнения ковша гидравлического экскаватора схемы "обратная лопата" // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 8(105). С. 37–44. EDN SKWZFI.
14. Даньярова А. С. [и др.] Выбор метода расчета усилий копания и нагрузок, действующих на элементы рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2023. Vol. 145. № 4. P. 188–203. DOI: 10.32523/2616-7263-2023-145-4-188-203. EDN LZFYHC.
15. Безкоровайный П. Г., Шестаков В. С. Определение рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора с напорным звеном // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 1. С. 25–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35.
16. Кожушко Г. Г., Комиссаров А. П., Шестаков В. С. Рабочее оборудование экскаватора. Патент на полезную модель 110389. Опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Маслеников Олег Александрович, аспирант ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30);

Комиссаров Анатолий Павлович, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19);

Лагунова Юлия Андреевна, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3828-434X>, e-mail: yu.lagunova@mail.ru

Шестаков Виктор Степанович, кандидат техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), orcid.org/0000-0001-9468-6696, e-mail: Shestakov.v.s@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Маслеников Олег Александрович – постановка исследовательской задачи; разработка математической модели; обзор соответствующей литературы; анализ результатов.

Комиссаров Анатолий Павлович – разработка конструктивной схемы, постановка задачи исследований; анализ результатов.

Лагунова Юлия Андреевна – научный менеджмент, написание текста статьи.

Шестаков Виктор Степанович – разработка алгоритма, составление математической модели силового анализа; анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15

Oleg A. Maslenikov ¹, Anatoly P. Komissarov ^{1,2}, Yulia A. Lagunova ^{1,2}, Viktor S. Shestakov ¹

¹ Ural State Mining University

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

* for correspondence: Shestakov.v.s@mail.ru

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A UNIVERSAL EXCAVATOR



Article info

Received:

31 October 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

18 December 2025

Keywords: hydraulic excavator, working equipment, bucket, force, work process, mathematical model, program.

Abstract.

The hydraulically driven excavators are equipped with the working equipment "forward" and "reverse" shovel. For some operating conditions, for example, processing a wide face, digging above and below the standing level, standard equipment does not provide the required technological operations. A scheme of a universal excavator with a movable bucket bottom has been developed, in which, depending on the bucket movement, it switches to work in the forward and reverse shovel mode. For this scheme, a mathematical description of the working process has been developed also for two variants of excavator operation, which is included in the methodology for determining the parameters based on mathematical models of kinematic and force analysis according to the calculation scheme. The tangential component of the digging resistance force in the forward shovel mode from the efforts of the bucket hydraulic cylinder is determined by the condition of force equilibrium. For practical application, a program has been compiled in the Visual Basic algorithmic language in the Microsoft Excel application. The search for a possible force on the teeth, taking into account the operation of all hydraulic cylinders, is performed in the force analysis model. The results allow us to identify the limiting mechanism on which the maximum digging force depends. The results are presented in the form of tables, graphs, diagrams, and histograms.

For citation: Maslenikov O.A., Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. Development of a methodology for determining the parameters of a universal excavator. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 6(182):10-15 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-10-15, EDN: FYZJEN

REFERENCES

1. Lagunova Yu.A., Komissarov A.P., Shestakov V.S. Design of Quarry Excavators. Moscow: Innovative Mechanical Engineering; 2017. 228 p.
2. Pobegailo P.A. Powerful Single-Bucket Hydraulic Excavators: Selection of the Main Geometric Parameters

of the Working Equipment at the Early Stages of Design. Moscow: LENAND; 2014. 296 p.

3. Kazakov V.A., Okorokov Yu.V. New Hydraulic Excavators EG-110 and EGO-110. *Mining Equipment and Electrical Engineering*. 2007; 12:46–50. EDN IITVAX.

4. Xu G., Feng Z., Wang W., Ding H. Constrained multiobjective optimization design for ordinary shovel attachment of hydraulic excavator based on evolutionary algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024; 135:108839. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108839. EDN BIGBXV.

5. Mishra S.K., Goyal N.K., Mukherjee A. Reliability Analysis and Life Cycle Cost Optimization of Hydraulic Excavator. *Journal of Reliability and Statistical Studies*. 2024. Pp. 297–328. DOI: 10.13052/jrss0974-8024.1626. EDN HMTVFG.

6. Lee S.J., Chang P.H. Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012; 26(1):195–204. DOI: 10.1007/s12206-011-0938-2. EDN TNJDYS.

7. Gongyue Xu, Zemin Feng, Erkuo Guo. Many-objective Optimization Design for TriRocker Working Mechanism of Face-shovel Hydraulic Excavator. *Jixie Gongcheng Xuebao*. 2023; 59(3):54. DOI: 10.3901/jme.2023.03.054. EDN BWTJSU.

8. Chen J., Qing F., Pang X. Mechanism optimal design of backhoe hydraulic excavator working device based on digging paths. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014; 28(1):213–222. DOI: 10.1007/s12206-013-0955-4. EDN MVZZAD.

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

10. Burakov A.M., Panishev S.V., Alkova E.L., Khosoev D.V. Experience in using hydraulic excavators in difficult mining, geological and climatic conditions.

Mining industry. 2022; 2:90–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.

11. Salikhov R.F., Permyakov V.B. Research of the Influence of the Dynamics of Technical Parameters on the Operational Performance of Hydraulic Single-Bucket Excavators. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2024; 21(4(98)):540–560. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560. EDN UCHWDO.

12. Maslenikov O.A., Komissarov A.P. Mathematical model of the universal working equipment of a hydraulic excavator. *Actual Problems of Improving the Efficiency and Safety of Mining and Oilfield Equipment*. 2024; 1:71–77. EDN CPSLWK.

13. Khoreshok A.A., Pudov E.Yu. Design of a promising design of a bucket for a hydraulic excavator of the “back shovel” scheme. *Mining equipment and electrotechanics*. 2014; 8(105):37–44. EDN SKWZFI.

14. Danyarova A.S. [et al.] Selection of a method for calculating digging forces and loads acting on the elements of working equipment of a hydraulic excavator. *Bulletin of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov. Series: Technical sciences and technologies*. 2023; 145(4):188–203. DOI: 10.32523/2616-7263-2023-145-4-188-203. EDN LZFYHC.

15. Bezkorovayny P.G., Shestakov V.S. Determination of Rational Parameters of the Working Equipment of a Hydraulic Excavator with a Pressure Link. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Gorny Zhurnal*. 2023; 1:25–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35.

16. Kozhushko G.G., Komissarov A.P., Shestakov V.S. Excavator working equipment. Patent for utility model 110389. Published 20.11.2011. Bulletin No. 32.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Oleg A. Maslenikov, postgraduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuibysheva st., 30);

Anatoly P. Komissarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, (620144, Russia, Yekaterinburg, ul. Kuibysheva, 30), Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira st., 19);

Yuliya A. Lagunova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuibysheva st. 30), Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira st. 19); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3828-434X>, yu.lagunova@mail.ru

Viktor S. Shestakov, PhD (Eng.), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuibysheva st., 30), Shestakov.v.s@mail.ru

Contribution of the authors:

Oleg A. Maslenikov – formulation of the research problem; development of the mathematical model; review of the relevant literature; analysis of the results.

Anatoly P. Komissarov – development of the design scheme, formulation of the research problem; analysis of results.

Yuliya A. Lagunova – scientific management, writing the article.

Viktor S. Shestakov – development of the algorithm, compilation of the mathematical model of force analysis; analysis of results.

Authors have read and approved the final manuscript.

