

ГОРНЫЕ МАШИНЫ MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-3-9

Брозовский Сергей Юрьевич^{1,2}, Шестаков Виктор Степанович¹

¹ Уральский государственный горный университет

² ОАО «Трансмаш»

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

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРЯЖИ КОВША ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА



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-драглайн,
упряжь, ковш, усилие, подъем-
ный и тягловый канаты, ма-
тематическая модель

Аннотация.

При анализе процесса транспортирования в отвал горной массы ковшом экскаватора-драглайна выявлено просыпание породы обратно в забой. На объем просыпанной породы влияет положение ковша при отрыве от забоя после окончания копания и траектория движения ковша. Для поиска рациональных параметров, обеспечивающих наименьшие потери горной массы при транспортировании, составлено математическое описание для определения угла наклона ковша и объема породы в нем зависимости от параметров ковша с подвеской. В состав конструкции ковша входит упряжь, состоящая из гибких элементов – канатов и цепей. Это не позволяет получить математическую модель для однозначного вычисления угла наклона ковша в зависимости от усилий в канатах подъема и тяги. Поэтому применен поисковый алгоритм, включающий три цикла для нахождения положения осей соединения подъемных канатов с подъемной цепью, тяговых канатов с тяговой цепью, угла наклона ковша (по условию равенства заданной длины разгрузочного каната и его расчетного значения, определенного по положениям ковша и указанных осей). Разработана математическая модель ковша драглайна, позволяющая создать методику определения параметров и провести необходимые исследования. Приведены результаты исследований. Методика расчетов параметров упряжи для практического применения при проектировании новых моделей экскаваторов и их ковшей включает программный модуль на алгоритмическом языке Visual Basic с реализацией в приложении Microsoft Excel. Проверка адекватности математической модели выполнена сравнением результатов, полученных при расчетах в программном модуле, с результатами, полученными графическим построением чертежа в конструкторском пакете Компас.

Для цитирования: Брозовский С.Ю., Шестаков В.С. Обоснование рациональных параметров упряжи ковша экскаватора-драглайна // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 6 (182). С. 3-9. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-3-9, EDN: DXNGEQ

Введение. При наблюдениях за процессом транспортирования ковша экскаватора-драглайна обнаружено просыпание породы как непосредственно в момент отрыва ковша из забоя, так и при его перемещении к месту разгрузки в отвал, причем по наблюдениям, в зависимости от положения ковша, просыпался больший или меньший объем породы. Разные объемы просыпанной породы наблюдались также и для экскаваторов, даже работающих в одинаковых условиях.

Проанализированы результаты исследований других исследователей по экскаваторам-драглайнам. Известно большое число предложений по выбору драглайнов для конкретных условий эксплуатации и по управлению рабочим процессом [1-7], по совершенствованию общей конструкции экскаваторов, и его различных узлов [8-10], по повышению эффективности эксплуатации [11-13], но по определению рациональных параметров ковша и его упряжи предложений не выявлено. Очевидно,

что на наклон ковша влияют размеры ковша и элементов упряжи, координаты осей крепления тяговых и подъемных цепей к ковшу. Поэтому нами разработано математическое описание для выбора рациональных значений указанных параметров.

Критерием при определении рациональных значений принята производительность экскаватора. Производительность зависит от многих параметров и может быть несколько повышена при уменьшении потерь горной массы при транспортировании от забоя до разгрузки.

Методика проведения исследований.

Угол наклона ковша зависит от длины подъемных и тяговых цепей, разгрузочного каната, координаты точек крепления цепей и канатов к ковшу.

Эти параметры влияют на операции копания, транспортирования и разгрузки ковша, на значения действующих на ковш усилий.

Влияния параметров на процесс наполнения ковша при копании рассмотрены в трудах многих исследователей [14-16], процесс же транспортирования изучен недостаточно.

Размеры элементов подвески определяют условия равновесия ковша при транспортировании, следовательно, границы зоны саморазгрузки, интенсивность разгрузки ковша [12-13].

Длина тяговых цепей определяет границу приближения ковша к экскаватору, т. е. задает минимальный радиус черпания [1].

Длина подъемных цепей определяет минимальное расстояние приближения ковша к головным блокам, тем самым задавая максимально возможную высоту отвала и, следовательно, его вместимость. В связи с этим размеры элементов подвески должны быть по возможности минимальными.

Параметры подвески влияют на наклон днища ковша при выполнении транспортных операций и, следовательно, на объем грунта в ковше и на производительность экскаватора.

Наклон днища определяется усилиями в элементах подвески при заданной силе тяжести груженого ковша. Усилия зависят от взаимной ориентации элементов подвески, определяемых их размерами и координатами точек присоединения их к ковшу.

При транспортировке груженого ковша управлением подъемной и тяговой лебедками стремятся обеспечить оптимальный угол наклона днища ковша и, следовательно, максимальный объем грунта в нем. Траектории перемещения ковша влияют не только на объем породы в ковше, но и на усилия в подъемных и тяговых канатах, на нагруженность механизмов, на затраты электроэнергии при транспортировании.

Задача выбора рациональных параметров объектов, в том числе и рассматриваемой подвески ковша, может решаться с использованием различных критериев.

Может быть выбран критерий, который учтет все затраты на изготовление и эксплуатацию объекта, например, в виде приведенных затрат на экскавацию единицы объема горной массы. При выборе такого критерия потребуются выражения для

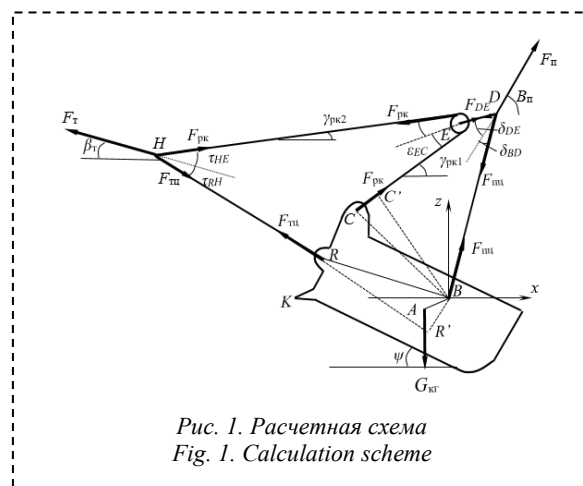


Рис. 1. Расчетная схема
Fig. 1. Calculation scheme

расчета производительности, капитальных и эксплуатационных затрат, что приведет к сложным моделям, потребуются большие трудозатраты. При решении частных задач можно воспользоваться более простыми критериями, такими, как производительность, затраты электроэнергии и др. Нами для определения рациональных параметров упряжи ковша принят критерий сохранения наибольшего объема в ковше при переносе ковша в точку разгрузки.

Для поиска рациональных параметров составлена целевая функция, которая в данном случае содержит математические модели определения угла наклона ковша и объема горной массы в ковше.

Математическая модель ковша драглайна

Для исследования влияния параметров упряжи ковша на эффективность выполнения операции транспортирования составлена математическая модель, в которой по условию равновесия ковша под действием усилий в подъемных и тяговых канатах, сил тяжести определяется угол наклона днища и объем горной массы в ковше.

Цель моделирования:

- создание методики определения рациональных параметров упряжи ковша.
- исследование возможности повышения производительности экскаватора-драглайна при обеспечении движения по траекториям, снижающим просыпание породы при транспортировании, что приведет к увеличению производительности экскаватора.

Попытка получить зависимости определения объема породы в ковше в зависимости от усилия в подъемных и тяговых канатах не увенчалась успехом. Это связано с тем, что положение осей крепления осей D и H (Рис. 1) к тяговым и подъемным канатам жестко не определено – они перемещаются в зависимости от усилий в канатах, длин подъемных и тяговых цепей, разгрузочного каната. Положение D и H зависит не только от усилий, но и от угла наклона тяговых и подъемных канатов.

Угол наклона ковша ψ и, соответственно, объем горной массы $V_{гм}$ в нем зависит: от усилий в тяговом (F_t) и подъемном (F_n) канатах, углов наклона канатов (β_t , β_n), размеров упряжи: длин тяговых ($L_{тц}$) и подъемных ($L_{пц}$) цепей; длины разгрузочного каната ($L_{рк}$), положения крепления подъемных (B) и

тяговых (R) цепей, разгрузочного каната (C) к ковшу относительно оси B , от углов τ_{RH} , τ_{HE} , δ_{BD} , δ_{DE} , ϵ_{EH} , ϵ_{EC} , γ_{PK1} , γ_{PK2} (рис. 1). Дополнительно к указанным на Рис. 1 обозначены сила тяжести грузеного ковша ($G_{ку}$), усилия в разгрузочном канате (F_{PK}), тяговых цепях (F_{TK}), подъемных цепях (F_{TL}), тяге (F_{DE}), используемых для условий равновесия.

Указанные параметры влияют на положение осей крепления тяговых канатов к тяговой цепи к разгрузочному канату (H) и подъемных канатов к

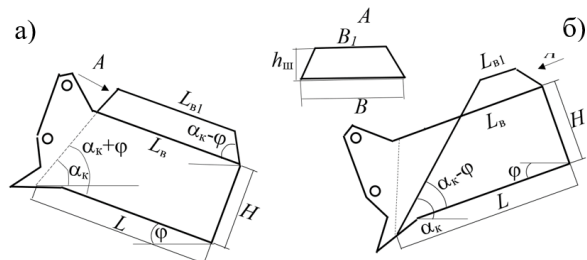


Рис. 2. Схема к определению объема горной массы в ковше
Fig. 2. Diagram for determining the volume of rock mass in a bucket

подъемной цепи и тяги блока разгрузочного каната (D), и тем самым изменяют наклон ковша.

Ввиду невозможности получения конечной однозначной модели решено было применить поисковые методы допустимого решения и провести поиск, используя разработанный нами программный продукт на алгоритмическом языке *Visual Basic*, встроенном в приложение *Microsoft Excel*.

Суть реализованного в программе алгоритма заключается в задании начальных положений осей H и D , начальные углы τ_{RH} и δ_{BD} принимаются 2° , тем самым будут обеспечены положительные усилия в разгрузочном канате и тяге ED .

При заданных положениях D и H в программе при расчетах меняется угол наклона днища ковша ψ до тех пор, пока расчетная длина разгрузочного каната не будет равна заданной.

При достижении такого выполняется проверка по условию равновесия ковша относительно B и, если условие не выполняется, то меняется положение оси H .

При достижении равновесия от усилия в тяговых канатах выполняется проверка равновесия узла D от усилий в подъемных канатах, подъемной цепи и тяге ED . При невыполнении условия равновесия перемещается положение оси D и повторяется поиск положения оси H и угла наклона днища.

По углу наклона днища ковша, положениям D и H , отвечающим указанным ограничениям, определяется объем горной массы в ковше при отрыве ковша от забоя и при перемещении ковша в отвал.

В математическую модель входят выражения для расчета координат R и C по углу наклона днища ковша, вычисления по ним и положениям осей H , D и E расчетной длины разгрузочного каната. Эти выражения представляют собой простые выражения и в статье не приводятся. Выражения для силового анализа и определения углов наклона по условиям равновесия приведены в [10]. Там же

представлены результаты исследования влияния параметров на углы наклона днища ковша.

Расчет объема горной массы в ковше выполнен при задании относительной высоты «шапки» – отношение высоты объема породы над ковшом к высоте ковша. Нами выполнены наблюдения и замеры на нескольких карьерах, в результате обработки получено, что средние значения зависят от углов естественного откоса породы и находятся в интервалах $0,05..0,2$. Среднее значение $0,1$. На Рис. 2 приведена схема для расчета объема при положительном (а) и отрицательном (б) углах наклона ψ .

На Рис. 2 обозначено: α_k – угол естественного откоса горной массы, L , B – длина и ширина ковша, L_B , L_{B1} – длина объема породы по верху на уровне верха ковша и «шапки», B_1 – ширина объема породы по верху «шапки».

Длина верхней заполненной породой кромки ковша при наклоне ковша на угол ϕ

$$L_B = L - H \cdot \text{ctg}(\alpha_k + \phi) \quad (1)$$

Объем породы в ковше до «шапки»

$$V_1 = B \cdot (L + L_B) / 2 \cdot H \quad (2)$$

Объем «шапки» представляет собой усеченную пирамиду высотой $h_{ш}$

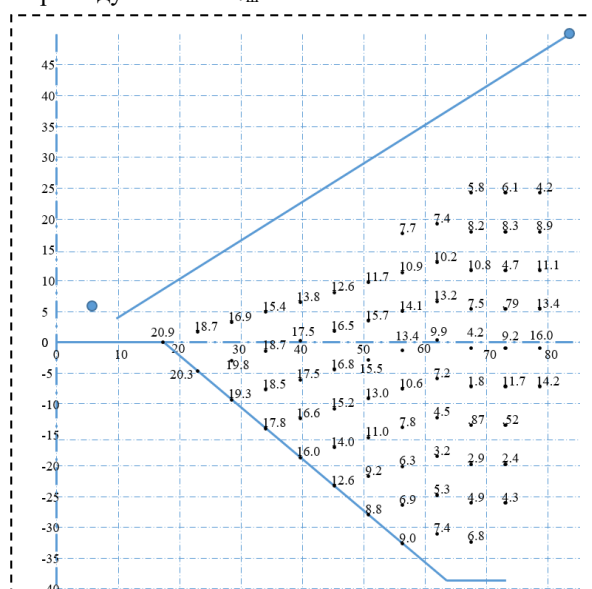


Рис. 3. Объем горной массы в ковше при отрыве от забоя
Fig. 3. Volume of rock mass in the bucket when breaking away from the face

$$V_{ш} = \frac{1}{3} h_{ш} [S_1 + (S_1 \cdot S_2)^{0.5} + S_2] \quad (3)$$

где S_1 , S_2 – площадь верхней заполненной части ковша и верхней части шапки.

$$S_1 = L_B \cdot B \quad (4)$$

$$S_2 = [L_B - h_{ш} \cdot \text{ctg}(\alpha_k + \phi) - h_{ш} \cdot \text{ctg}(\alpha_k - \phi)] \cdot [B - 2h_{ш} \text{ctg}(\alpha_k)] \quad (5)$$

Результаты исследований

Для экскаватора ЭШ 20/90 проведены исследования влияния параметров упряжи и координат положения ковша на объем породы в нем. Вывод результатов в программе предусмотрен в таблицах (пример в Таблице 1) и для наглядности на рисунках (примере на Рис. 3).

Копание драглайна может быть ниже уровня стояния, так и выше. На Рис. 3 приведены результаты расчета объема при отрыве ковша в указанных на рисунке точках. Этот объем отличается от объема при транспортировании, так как в некоторых областях забоя (нижняя часть забоя при копании ниже уровня стояния) наклон ковша в сторону разгрузки больше, чем в точках при транспортировании. При уменьшении угла наклона согласно (1-5) должен увеличиться объем породы в ковше, но физически такого при транспортировании не может быть, поэтому в программе реализован вариант, при котором увеличения объема при транспортировании не происходит, возможное же уменьшение породы рассчитывается при изменении угла наклона.

Таблица 1. Исследование влияния параметров забоя и точки начала разгрузки на потери породы при транспортировании

Table 1. Study of the influence of face parameters and the unloading start point on rock losses during transportation

Рабочий процесс	№ п/п	Результаты вычислений							
		Координаты ковша		Угол наклона ковша	Объем породы в ковше при углах откоса породы				
		x	z		25	30	35	40	45
Отрыв ковша от забоя	1	64.7	-33.3	-16.5	3.42	5.49	7.64	9.93	12.36
	6	60.8	-30.0	-17.2	3.14	5.20	7.34	9.60	12.03
	11	56.8	-26.7	-17.9	2.84	4.89	7.01	9.26	11.67
	16	52.8	-23.3	-12.7	4.97	7.10	9.35	11.76	14.10
	21	48.8	-20.0	-7.1	7.35	9.62	12.04	14.32	16.12
	26	44.9	-16.7	-0.2	10.54	12.93	15.03	16.67	18.01
	31	40.9	-13.3	4.5	12.79	14.88	16.55	17.91	19.05
	36	36.9	-10.0	9.9	14.93	16.61	17.95	19.09	20.06
	41	32.9	-6.7	15.4	16.53	17.95	19.10	20.08	20.95
	46	29.0	-3.3	19.5	17.36	18.77	19.84	20.75	21.56
Начало разгрузки	51	25.0	0.0	17.3	16.96	18.35	19.46	20.40	21.24
Средний объем просыпанной породы					2.3	1.9	1.6	1.3	1.1

Приведенные результаты на Рис. 3 показывают, что завершение процесса копания ниже глубины 20 м нерационально, при отрыве 8 м³ из ковша объемом 20 м³ высыплется. Иногда также нерационально в забое при копании высоко подтягивать уже заполненный ковш. Так, при перемещении ковша подъемной и тяговой лебедками над забоем в точку x=50, y=5 объем с 20 м³ уменьшится до 15.7 м³.

Результаты влияния задаваемой точки доставки ковша после обработки полученных результатов приведены на Рис. 4. Графики демонстрируют, что объем породы зависит и от угла естественного откоса породы α_k .

Выводы по результатам исследований:

1. Разработана математическая модель определения объема горной массы в ковше по задаваемым параметрам упругости и положению ковша.
2. Для методики определения рациональных параметров разработан алгоритм и программа на алгоритмическом языке *Visual Basic* в приложении *Microsoft Excel*.
3. Выполненные исследования влияния параметров упругости показали зависимость объема породы в ковше, доставляемой к зоне начала выгрузки, как от собственно параметров упругости, так и парамет-

ров забоя, в частности от координат отрыва ковша после его заполнения.

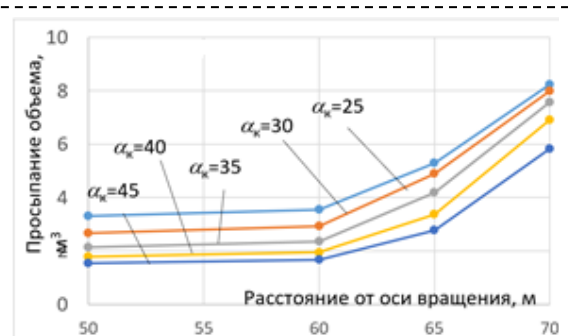


Рис. 4. Влияние положения точки начала разгрузки на объем просыпанной породы
Fig. 4. Effect of the position of the unloading start point on the volume of spilled rock

4. Разработанная методика определения рациональных параметров может быть использована как при проектировании новых моделей экскаваторов, так и для определения длины разгрузочного каната при изменении условий эксплуатации существующих экскаваторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сокольский М. (ред.) Горные машины и землеройная техника: проблемы проектирования, исследования и эксплуатации. Springer International Publishing, 2020. 226 стр. DOI: 10.1007/9783-030-25478-0.
2. Tsybalyuk T. A., Cheskidov V. I. Selection procedure of draglines for stripping operations in surface mining // Journal of Mining Science. 2020. Т. 56. № 4. С. 557–566.
3. Rusiński E., Czmochoński J., Moczko P., Pietrusiak D. Surface mining machines: problems of maintenance and modernization // Springer International Publishing AG, 2017. 169 p. DOI: 10.1007/978-3-319-47792-3.
4. Cheskidov V. I., Norri V. K. Stripping with direct dumping in Kusbass open pit mines: the current state and prospects // Journal of Mining Science. 2016. Т. 52. № 4. С. 725–731.
5. Мейлахс А. Л., Певзнер Л. Д. Интеллектуальные алгоритмы управления рабочим органом экскаватора-драглайна для расширения его технологических возможностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. М. : МГТУ, 2003. № 6.
6. Самойленко, А. М. Система автоматизации процесса копания экскаватора-драглайна // Горное оборудование и электромеханика. 2007. № 1. С. 58–60. EDN HDVTRE.
7. Певзнер Л. Д., Сулейменов Т. З. Югай И. С. К проблеме автоматизированного управления шагающим экскаватором-драглайном // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 3. С. 12–22. EDN NCRRRX.
8. Багатырев И. В. Обзор конструкции экскаватора-драглайна с целью повышения производительности рабочих элементов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых

БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2016 года / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2016. С. 2059–2064. EDN XEIPXL.

9. Подэрни Р. Ю., Хромой М. Р., Соловьев С. В. Анализ современных конструкций экскаваторов- драглайнов мировых производителей // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012. № 8. С. 103–114. EDN PCHAMX.

10. Tyulenev M., Markov S., Zhironkin S., Gasanov M., Cehlár M. The choice of technology and equipment for coal seams of different bedding excavation at Kusbass surface mines based on digging capacity and unit costs // Acta Montanistica Slovaca. 2021. Т. 26. № 4. С. 603–619.

11. Мислибаев И. Т., Махмудов А. М., Махмудов Ш. А. Теоретическое обобщение режимов функционирования и моделирование эксплуатационных показателей работы экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 102–110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.

12. Sokolski M. (Ed.). Mining machines and earth-moving equipment: problems of design, research

and maintenance. Springer International Publishing. 2020. 226 p. DOI: 10.1007/9783-030-25478-0.

13. Брозовский С. Ю., Шестаков В. С. Адамков А.В., Буялич К.Г. Разработка методики определения параметров подвески ковша экскаватора драглайна // Горное оборудование и электромеханика. 2024 № 6(176). С. 26–32. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-26-32, EDN JQGLXO.

14. Брозовский С. Ю., Франц Т. П., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С. Анализ нагруженности стрелы экскаватора драглайна // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 1 (171). С. 11–17. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-11-17. EDN QBNHLG.

15. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Емельянов А. А., Пумпур Е. В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 86–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

16. Крицкий Д. Ю., Мутыгуллин А. В., Шигин А. О., Бардаков В. В. Организация мониторинга стрел экскаваторов-драглайнов в режиме эксплуатации // Горный журнал. 2018. № 2. С. 91–96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.

© 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:

Брозовский Сергей Юрьевич, зам. гл. конструктора ОАО «Трансмаш», (620017, Россия, г. Екатеринбург, ул. Фронтových бригад, 29);

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), Shestakov.v.s@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Брозовский Сергей Юрьевич – постановка исследовательской задачи; разработка математической модели; обзор соответствующей литературы; написание текста, анализ результатов.

Шестаков Виктор Степанович – постановка задачи оптимизации упряжи ковша; разработка алгоритма, разработка математической модели; анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-3-9

Sergey Yu. Brozovsky^{1,2}, Viktor S. Shestakov¹

¹ Ural State Mining University

² OJSC "Transmash"

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

ANALYSIS OF LOADING OF THE BOOM OF A DRAGLINE EXCAVATOR



Article info

Received:

31 October 2025

Accepted for publication:

14 November 2025

Accepted:

15 November 2025

Published:

18 December 2025

Keywords: Excavator-dragline, harness, bucket, force, lifting and traction ropes, mathematical model.

Abstract.

When analyzing the process of transporting rock mass to the dump by a dragline excavator bucket, spilling of rock back into the face was revealed. The volume of spilled rock is affected by the position of the bucket when breaking away from the face after digging is finished and the trajectory of the bucket. To find rational parameters that ensure the least loss of rock mass during transportation, a mathematical description was compiled to determine the angle of inclination of the bucket and the volume of rock in it depending on the parameters of the bucket with suspension. The bucket contains a harness of flexible elements - ropes and chains, which does not allow obtaining a mathematical model for the unambiguous calculation of the bucket tilt angle depending on the forces in the lifting and traction ropes, therefore a search algorithm is used, including three cycles for searching for the position of the axes of the connection of the lifting ropes with the lifting chain, the traction ropes with the traction chain, the bucket tilt angle according to the condition of equality of the specified length of the unloading rope and its calculated value, determined by the positions of the bucket and the specified axes. The results of the studies are presented. The method of calculating the parameters of the harness for practical application in the design of new models of excavators and their buckets includes a software module in the algorithmic language Visual Basic with implementation in the Microsoft Excel application. The adequacy of the mathematical model is checked by comparing the results obtained during calculations in the software module with the results obtained by graphically constructing a drawing in the Kompas design package.

For citation: Brozovsky S.Yu., Shestakov V.S. Analysis of loading of the boom of a dragline excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 6(182):3-9 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-6-3-9, EDN: DXNGEQ

REFERENCES

1. Sokolsky M. (ed.). *Mining Machines and Earth-Moving Equipment: Design, Research, and Operation Challenges*. Springer International Publishing, 2020. 226 p. DOI: 10.1007/9783-030-25478-0.
2. Tsymbalyuk T.A., Cheskidov V.I. Selection procedure of draglines for stripping operations in surface mining. *Journal of Mining Science*. 2020. T. 56. № 4. C. 557–566.
3. Rusiński E., Czmochoński J., Moczko P., Pietrusiak D. Surface mining machines: problems of maintenance and modernization. Springer International Publishing AG. 2017. 169 p. DOI: 10.1007/978-3-319-47792-3.
4. Cheskidov V.I., Norri V.K. Stripping with direct dumping in Kusbass open pit mines: the current state and prospects. *Journal of Mining Science*. 2016. T. 52. № 4. C. 725–731.
5. Meylakhs A.L., Pevzner L.D. Intelligent control algorithms for the working body of a dragline excavator to expand its technological capabilities. *Mining information and analytical bulletin*. Moscow: Moscow State Mining University; 2003. №6.
6. Samoylenko A.M. Automation system for the digging process of a dragline excavator. *Mining equipment and electromechanics*. 2007; 1:58–60. EDN HDVTRE.
7. Pevzner L.D., Suleimenov T.Z., Yugay I.S. On the problem of automated control of a walking excavator-dragline. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2010; 3:12–22. EDN NCRRRX.
8. Bagatyrev I.V. Overview of the design of a dragline excavator in order to increase the productivity of working elements. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V. G. Shukhov*. Belgorod, May 01–20, 2016 / Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2016. Pp. 2059–2064.
9. Poderni R.Yu., Khromoy M.R., Soloviev S.V. Analysis of modern designs of dragline excavators from world manufacturers. *Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*. 2012; 8:103–114. EDN PCHAMX.
10. Tyulenev M., Markov S., Zhironkin S., Gasanov M., Cehlár M. The choice of technology and equipment for coal seams of different bedding excavation at Kusbass surface mines based on digging capacity and unit costs. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021; 26(4):603–619.
11. Mislibaev I.T., Makhmudov A.M., Makhmudov Sh.A. Theoretical generalization of operating modes and modeling of operational indicators of excavators. *Mining information and analytical bulletin*. 2021; 1:102–110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.
12. Sokolski M. (Ed.). *Mining machines and earth-moving equipment: problems of design, research and maintenance*. Springer International Publishing, 2020. 226 p. DOI: 10.1007/9783-030-25478-0.
13. Brozovsky S.Yu., Shestakov V.S., Adamkov A.V., Buyalich K.G. Development of a methodol-

ogy for determining the parameters of the dragline excavator bucket suspension. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 6(176):26–32. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-26-32. EDN JQGLXO.

14. Brozovsky S.Yu., Franz T.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. Analysis of the dragline excavator boom loading. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 1(171):11–17. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-11-17. EDN QBNHLG.

15. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Emelianov A.A., Pumpur E.V. Evaluation of quarry excavator performance indicators under real operating conditions. *Mining information and analytical bulletin*. 2020; 10:86–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

16. Kritsky D.Yu., Mutygullin A.V., Shigin A.O., Bardakov V.V. Organization of monitoring of dragline excavator booms in operation mode. *Mining Journal*. 2018; 2:91–96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.

© 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:

Sergey Yu. Brozovsky, deputy. Ch. Designer, OJSC "Transmash", (620017, Russia, Yekaterinburg, Front Brigade Street, 29);

Viktor S. Shestakov, Candidate of Technical Sciences. sciences, professor, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes of the Ural State Mining University (FGBOU VO), (620144, Russia, Yekaterinburg, Kuybysheva St., 30), orcid.org/0000-0001-9468-6696, e-mail: Shestakov.v.s@mail.ru

Contribution of the authors:

Sergey Yu. Brozovsky – formulation of a research problem; development of a mathematical model; review of relevant literature; writing a text, analysis of results.

Viktor S. Shestakov – formulation of the bucket harness optimization problem; algorithm development, mathematical model development; analysis of results.

The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

