

# ГОРНЫЕ МАШИНЫ MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-11-17

Брозовский Сергей Юрьевич<sup>1</sup>, Франц Татьяна Петровна<sup>2</sup>,  
Лагунова Юлия Андреевна<sup>2,3</sup>, Шестаков Виктор Степанович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Трансмаш»

<sup>2</sup>Уральский государственный горный университет

<sup>3</sup>Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

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

## АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ СТРЕЛЫ ЭКСКАВАТОРА ДРАГЛАЙНА



### Информация о статье

Поступила:

01 февраля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к печати:

01 марта 2024 г.

Опубликована:

04 апреля 2024 г.

### Ключевые слова:

экскаватор, драглайн, усилие,  
рабочее оборудование, стрела,  
модель

### Аннотация.

В статье рассмотрена методика определения усилий, действующих на элементы стрелы экскаватора-драглайна при положении ковша, как в зоне растяжки, так и в других точках рабочей зоны. Результаты расчета усилий используются для анализа напряженно-деформированного состояния стрелы. Исследования выполнены в системе APM WinMachine в модуле APM WinStructure3D. По данным проекта ЭШ-20.90 для трехгранной стрелы составлена модель конструкции, в которую включены все несущие элементы. Лестницы, площадки, поддерживающие ролики и освещение учтены силами тяжести, инерционными и центробежными силами от поворотного движения платформы. Результатами исследований силового и напряженно-деформированного состояния стрелы доказано, что с учетом сил тяжести на верхний пояс стрелы не действует сжимающая нагрузка даже при максимальном приближении ковша к стреле, поэтому использовать предварительное напряжение ваннами не требуется. Исключение вант позволит упростить конструкцию стрелы и уменьшить сечение верхнего пояса. Результатами расчета напряжений показано, что имеются достаточные запасы прочности, выполненные расчеты при уменьшении толщины стенок труб несущих поясов на 1 мм показали, что условие прочности в сечениях обеспечивается, а масса стрелы уменьшается на 7300 кг.

**Для цитирования:** 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

**Введение.** Практически с самого начала производства драглайнов заводами-производителями и научными коллективами выполняются исследования, направленные на совершенствование конструкции и повышение эффективности рабочего процесса этих экскаваторов. Известно большое число предложений по выбору драглайнов для конкретных условий эксплуатации [1 – 8], по совершенствованию общей конструкции экскаваторов и ее различных узлов [9], по повышению эффективности эксплуатации [10], также уделено внимание вопросу повышения надежности и безопасности

узлов конструкции стрелы при ее обслуживании [11, 12]. Исследователями предлагается снизить энергопотребление за счет совершенствования привода и системы управления, но, на наш взгляд, это направление даст малый резерв экономии энергии.

Большой эффект может быть достигнут при конструктивном совершенствовании экскаватора, в том числе стрелы. Снижение массы стрелы уменьшит момент инерции поворотной части, может быть снижена масса противовеса и за счет этого уменьшатся затраты энергии на поворотное движение платформы.

На экскаваторах-драглайных применяются вантовые, трехгранные жесткие, ферменные и комбинированные типы стрел [9].

Вантовые стрелы имеют один центральный сжатый стержень, а основным элементом конструкции являются канаты (ванты). Вантовые стрелы имеют лучшие показатели по массе, однако имеют и существенные недостатки. При недостаточной жесткости стрелы на кручение во время работы возникают значительные крутильные колебания, иногда возникает перекос стрелы и ее повреждение, эксплуатационная надежность достаточно низкая, поэтому в новых моделях драглайнов такие стрелы не используются.

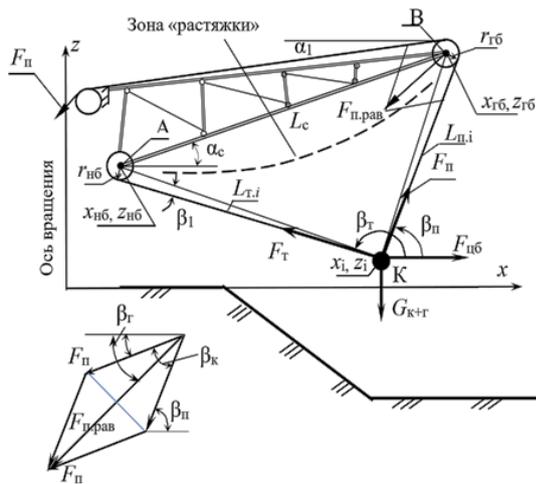


Рис. 1. Расчетная схема  
Fig. 1. Calculation scheme

**Методика проведения исследований.** Нами проведены исследования и выявлено возможное направление снижения массы стрелы драглайна за счет изготовления ее элементов без излишних запасов прочности. Для решения этой задачи необходимо точно определить значения напряжений в элементах стрелы и использовать в конструкции такие сечения элементов, чтобы расчетное напряжение было близко к допустимому напряжению.

На экскаваторах-драглайных производства ПАО «Уралмашзавод» установлены трехгранные жесткие стрелы, состоящие из одного верхнего и двух нижних трубчатых поясов, соединенных в вершине. Такие стрелы обладают высокой эксплуатационной надежностью и сравнительно простой конструкцией, но масса 1 м трехгранной стрелы примерно на 15% больше вантовой.

При расчете трехгранных стрел в известных методиках рассматривается положение равнодействующей от усилий подъемных канатов. Считается, что если равнодействующая направлена ниже нижних поясов трехгранной стрелы, то верхний пояс испытывает растяжение, а когда равнодействующая направлена выше нижних поясов, то верхний пояс начинает работать на сжатие. Для исключения знакопеременных нагрузок на верхний пояс используют ванты с предварительным натяжением, что приводит к увеличению напряжений и, следовательно, приходится увеличивать площадь

сечения верхнего пояса. Происходит также усложнение конструкции стрелы.

В этой методике при расчете усилий на верхний пояс не учитывается действие силы тяжести стрелы. При расчетах усилий рассматривается положение ковша на границе зоны растяжки, а усилия в подъемных и тяговых канатах считают равными стопорным (максимальным) значениям [13-15].

**Результаты исследования.** Нами составлена методика определения усилий в тяговых  $F_T$  и подъемных  $F_n$  канатах, которые определяются по силе тяжести грузеного или порожнего ковша  $G_k$  и углам наклона канатов ( $\beta_n, \beta_T$ ) по уравнениям равновесия (Рис. 1).

На Рис. 1 обозначено:  $L_c$  – длина стрелы;  $\alpha_c$  – угол наклона стрелы;  $x_{нб}, z_{нб}, x_{гб}, z_{гб}$  – координаты осей направляющих и головных блоков;  $x_i, z_i$  – положение центра тяжести ковша;  $r_{нб}, r_{гб}$  – радиус направляющих и головных блоков;  $G_{к+г}$  – сила тяжести грузеного ковша.

Усилия в подъемных и тяговых канатах

$$F_T = \frac{G_k + F_{цб} \operatorname{tg} \beta_n}{\sin \beta_T - \cos \beta_T \cdot \operatorname{tg} \beta_n}, \quad F_n = -\frac{F_T \cdot \cos \beta_T + F_{цб}}{\cos \beta_n},$$

где  $F_{цб}$  – центробежная сила, действующая на ковш

$$F_{цб} = m_{к+г} \omega_{пл}^2 x_i;$$

$x_i$  – расстояние от оси вращения платформы экскаватора до центра тяжести ковша;  $\omega_{пл}$  – скорость поворота платформы.

Угол наклона к горизонтали отрезка, соединяющего точку схода подъемных канатов с головных блоков и центр тяжести ковша

$$\beta_n = \alpha_c + \arccos \left( \frac{L_c^2 + L_{БК}^2 - L_{АК}^2}{2 \cdot L_c \cdot L_{БК}} \right) - \operatorname{arctg} \frac{r_{гб}}{L_{н.и}},$$

Угол наклона к горизонтали отрезка, соединяющего точку схода тяговых канатов с направляющих блоков и центр тяжести ковша

$$\beta_T = \alpha_c + \arccos \left( \frac{L_c^2 + L_{БК}^2 - L_{АК}^2}{2 \cdot L_c \cdot L_{БК}} \right) + \arccos \left( \frac{L_{БК}^2 + L_{АК}^2 - L_c^2}{2 \cdot L_{АК} \cdot L_{БК}} \right) + \operatorname{arctg} \frac{r_{гб}}{L_{т.и}},$$

где  $L_{АК}$  – длина отрезка между осью направляющих блоков и центром тяжести ковша;  $L_{БК}$  – длина отрезка между осью головных блоков и центром тяжести ковша

$$L_{БК} = \sqrt{L_{н.и}^2 + r_{гб}^2}; \quad L_{АК} = \sqrt{L_{т.и}^2 + r_{гб}^2}.$$

Угол между канатами

$$\beta_k = \beta_n - \alpha_1$$

Значение равнодействующей

$$F_{п.равн} = 2F_n \cos (\beta_k / 2)$$

Угол наклона равнодействующей к горизонтали

$$\beta_r = 0,5\beta_k + \alpha_1$$

Для расчета по приведенным выражениям составлена программа на алгоритмическом языке Visual Basic в приложении Microsoft Excel. Форма ввода данных приведена на Рис. 2.

Исследования напряженно-деформированного состояния стрелы выполнено в системе APM WinMachine в модуле APM WinStructure3D, модуль имеет сертификат соответствия № РОСС RU.СП

15.H00086, представляет собой «систему, предназначенную для комплексного анализа трехмерных конструкций, состоящих из совокупности стержневых, пластинчатых и объемных элементов и любых их произвольных комбинаций». Для исследований в этой системе составляются модели конструкции, закрепления и нагружения.

По данным проекта ЭШ-20.90 составлена модель конструкции, в которую включены все несущие элементы. Лестницы, площадки, поддерживающие ролики и освещение учтены силами тяжести,

Экскаватор ЭШ-20.90			
Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Значение
<i>1. Параметры экскаватора</i>			
1. Вместимость ковша	м <sup>3</sup>	$E$	20
2. Установившаяся скорость поворота платформы	рад/с	$\omega_{пл}$	0.18
3. Ускорения разгона, торможения платформы	с <sup>-2</sup>	$\epsilon_{пл}$	0.03
4. Максимальное усилие подъема,	кН	$F_{г\_max}$	1250
5. Максимальное усилие тяги	кН	$F_{г\_max}$	1200
6. Масса 1 м подъемных канатов (диаметр 39,0-Г-1-Н-166 ГОСТ 7669-80)	кг/м	$m_{кан.п}$	6.53
7. Масса 1 м тяговых канатов (диаметр 52,0-Г-1-Н-166 ГОСТ 7669-80)	кг/м	$m_{кан.т}$	11.85
<i>2. Параметры ковша</i>			
1. Масса порожнего ковша	т	$m_k$	26
2. Масса груженого ковша	т	$m_{к+г}$	66
<i>3. Параметры стрелы</i>			
1. Координаты оси пята стрелы	м	$x_{пс}$	10.00
		$y_{пс}$	4.00
2. Длина стрелы по осям блоков	м	$L_c$	90
3. Угол наклона нижних поясов стрелы к горизонту	град	$\alpha_c$	32.00
<i>4. Параметры барабанов, блоков</i>			
Наименование	Диаметр по оси каната	Координата оси	
		x	z
1. Барабан подъемной лебедки, м	1.63	-3	3.4
2. Барабан тяговой лебедки, м	1.63	-1.2	3.4
3. Головной блок по оси каната	1.63	86.3	51.7
4. Направляющий блок тяговых канатов	1.63	8	4
5. Направляющий блок подъемных канатов (на надстройке)	1.63	3.75	11.2

Рис. 2. Форма ввода  
Fig. 2. Input form

инерционными и центробежными силами от поворотного движения платформы.

В модель нагружения входят внешние нагрузки на объект исследования и внутренние силы тяжести, инерционные и центробежные силы, вызванные рабочими инерциями. Внешними нагрузками на стрелу служат усилия в подъемных канатах, определяемые по приведенным выражениям. Внутренние нагрузки, такие как силы тяжести,

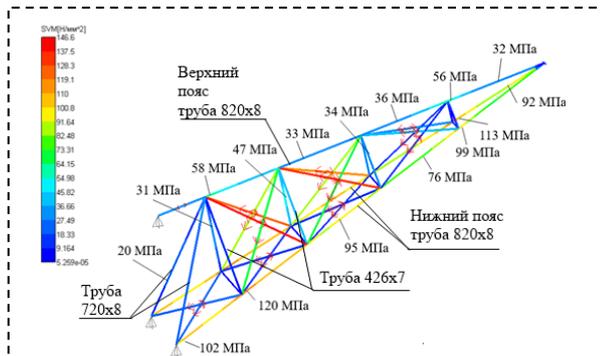


Рис. 3. Карта напряжений  
Fig. 3. Voltage map

определяются системой по параметрам модели конструкции (размерам элементов, плотности материала), наряду с ними в модель нагрузки должны быть включены сосредоточенными силами и распределенными нагрузками параметры конструктивных элементов, которые не включены в модель конструкции (лестницы, площадки и др.). В наших исследованиях сила тяжести площадок, роликов, электрооборудования задана сосредоточенными силами, приложенными в узлах. Сила тяжести лестниц учтена распределенной нагрузкой на стержни поясов. По массам не включенным в модель элементов вычислены силы инерции

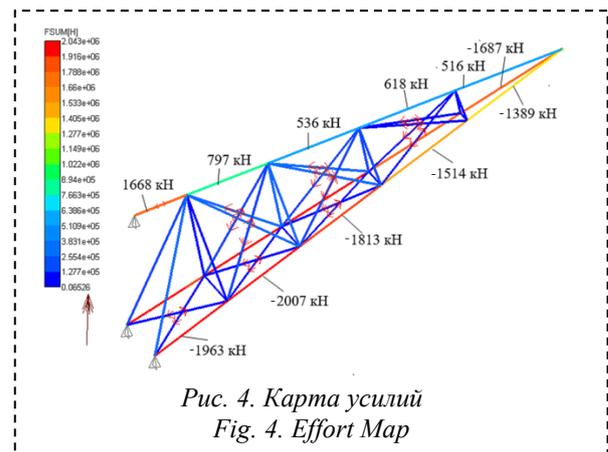


Рис. 4. Карта усилий  
Fig. 4. Effort Map

$F_{ин.и} = m_i \epsilon_{пл} x_i$  и центробежные силы  $F_{цб.и} = m_i \omega_{пл}^2 x_i$  на  $i$ -й элемент, массой  $m_i$ , расположенный на расстоянии  $x_i$  от оси вращения. Значения этих усилий сосредоточенными силами прикладываются на узлы модели конструкции с заданием направлений действия.

В модель нагружения нами включены также ветровые нагрузки. В модуле *APM WinStructure3D* имеется возможность задания ветровой нагрузки на стержни, для выполнения исследований нами введено ветровое давление 0,48 кПа (4-й ветровой

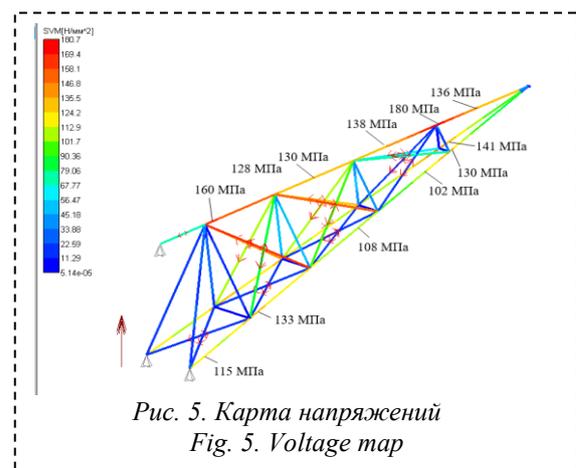


Рис. 5. Карта напряжений  
Fig. 5. Voltage map

район по СНиП 2.01.07-85).

Нагрузки размещены в соответствующие загрузки модуля *APM WinStructure3D*, и из них сформирована комбинация нагружений. Это позволяет как выполнить расчеты для всех действующих нагрузок, так и вывести результаты по каждому нагружению.

Модель закрепления обеспечивает требование к статическому расчету (модель должна быть закреплена), реализуется заданием опор. На пяту стрелы заданы опоры с полным запретом перемещений и с разрешением всех поворотов. Разрешение поворотов реализует конструкцию с использованием оси для крепления пяты в опорах. Подвеска стрелы к надстройке выполнена элементом канат, конец которого закреплен опорой с запретом перемещений.

По составленным моделям выполнены исследования для нескольких расчетных положений ковша. Приведены результаты расчета напряжений и усилий при двух положениях ковша: в зоне растяжки при максимальном приближении к пяте стрелы (Рис. 3, 4) и при максимальном приближении к голове стрелы груженого ковша (Рис. 5).

На Рис. 4 знак «минус» при сжатии элемента, «плюс» – при растяжении.

Действие отдельных видов нагрузок на верхний и нижний пояс различно. Система *APM WinMachine* позволяет создавать комбинацию загружений, включая в нее все действующие нагрузки, и выполнять расчеты напряжений как суммарно для всех, так и выделяя результаты отдельно для каждой нагрузки. Такая возможность приведена в Таблице 1 для варианта расчета с положением груженого ковша в зоне разгрузки вертикально под головными блоками.

#### Выводы по результатам исследований:

1. Для базовой модели экскаватора ЭШ-20.90 во всех положениях ковша расчетное напряжение существенно ниже допустимого для стали 17Г1С.

2. Выявлены большие запасы прочности базовой конструкции стрелы, расчеты показали, что можно на несущих поясах вместо труб 820x8 использовать трубы 820x7, при такой замене максимальное расчетное напряжение в трубах верхнего пояса достигает допустимого, а масса стрелы уменьшится на 7300 кг.

3. Выявлены резервы по снижению сечений в стойках и раскосах, при уменьшении сечения этих элементов еще будет уменьшена масса стрелы.

4. Исследованиями выявлено, что верхний пояс стрелы работает только на растяжение даже при максимальном приближении ковша к нижним поясам в зоне растяжки.

Ввиду отсутствия знакопеременных нагрузок могут быть исключены ванты сжатия верхнего пояса, и за счет этого упрощается конструкция стрелы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цымбалюк Т. А., Ческидов В. И. Методика выбора модели драглайна для отработки вскрышных пород на разрезах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 4. С. 59–69. DOI: 10.15372/FTPPI20200407.

2. 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.

3. Tyulenev M., Markov S., Zhironkin S., Gasanov M., Cehlár M. The choice of technology and equipment for coal seams of different bedding excava-

tion at Kusbass surface mines based on digging capacity and unit costs // Acta Montanistica Slovaca. 2021. Т. 26. № 4. С. 603–619.

4. 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.

5. Martyanov V. L., Markov S. O., Kolesnikov V. F. Study of inclined deposits opening under the combined mining system: Kureinsky area case-study // Journal of Mining and Geotechnical Engineering. 2021. No. 4(15). P. 64–88. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-64-88.

6. Somua-Gyimah Godfred, Frimpong Nyaaba Wedam, Gbadam Eric Formation fragmentation modeling and impact on dragline excavation performance in surface mining operations // International Journal of Mining Science (IJMS). 2019. Vol. 5. Issue 1. P.11–21. DOI: 10.20431.

7. Пенчук В. А., Круглов Д. А. Влияние длины стрелы на производительность драглайна // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научнотехнической конференции, Тюмень, 08 февраля 2021 года / Под общей редакцией Ш. М. Мерданова. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2021. С. 159–162.

8. 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.

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

10. 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.

11. 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.

12. Панфилова О. Р., Великанов В. С. Некоторые аспекты расчета и выбора параметров элементов металлоконструкций горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 1. С. 141–148. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-141-148.

13. Побегайло П. А., Крицкий Д. Ю. Развитие инженерного подхода к оценке напряжений в металлоконструкциях экскаваторов-драглайнов // В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2020. С. 335–340.

14. Головнева Т.П., Шестаков В.С. Расчет нагрузок на стрелу драглайна при транспортировании ковша // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 4. С. 50–55.

15. Брозовский С. Ю., Шестаков В. С. Расчет усилий в канатах драглайна при входе ковша в зону растяжки. // Технологическое оборудование для

горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. Екатеринбург, 2023. С. 237–240.

© 2024 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);

**Франц Татьяна Петровна**, кандидат техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

**Лагунова Юлия Андреевна**, доктор техн. наук, профессор, заведующая кафедрой горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30); профессор кафедры подъемно-транспортные машины и роботы ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19);

**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](mailto:shestakov.v.s@mail.ru)

Заявленный вклад авторов:

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

Франц Татьяна Петровна – разработка модели конструкции и модели закреплений в модуле APM WinMachine; выполнение расчетов; написание текста, анализ результатов; выводы.

Лагунова Юлия Андреевна – постановка исследовательской задачи; разработка алгоритма построения зоны саморазгрузки, написание текста.

Шестаков Виктор Степанович – постановка задачи оптимизации конструкции стрелы; разработка алгоритма построения зоны растяжки, разработка математической модели; разработка модели нагружений; анализ результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-11-17

Sergey Yu. Brozovsky<sup>1</sup>, Tatyana P. Franz<sup>2</sup>, Yuliya A. Lagunova<sup>2,3</sup>, Viktor S. Shestakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OJSC "Transmash"

<sup>2</sup>Ural State Mining University

<sup>3</sup>Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin

\*E-mail: [shestakov.v.s@mail.ru](mailto:shestakov.v.s@mail.ru)

## ANALYSIS OF LOADING OF THE BOOM OF A DRAGLINE EXCAVATOR



### Article info

Received:

01 February 2024

### Abstract.

The article discusses a method for determining the forces acting on the elements of the boom of a dragline excavator when the bucket is in position, both in the stretch zone and at other points in the working area. The results of the force calculation are used to analyze the stress-strain state of the boom. The research was carried out in the APM WinMachine system in the APM WinStructure3D module. Based on the data from the ESh-20.90 pro-

Accepted for publication:  
15 February 2024

Accepted:  
01 March 2024

Published:  
04 April 2024

**Keywords:** excavator, dragline, force, working equipment, boom, model.

ject, a design model has been compiled for a three-gun boom, which includes all the load-bearing elements. Stairs, platforms, support rollers and lighting are taken into account by gravity, inertial and centrifugal forces from the turning movement of the platform. The results of studies of the force and stress-strain state of the boom have proven that, taking into account the forces of gravity, there is no compressive load acting on the upper chord of the boom even when the bucket is as close as possible to the boom, so there is no need to use pre-stressing with cables. Eliminating the cables will simplify the boom design and reduce the cross-section of the upper chord. The results of stress calculations show that there are "excessive" strength reserves; calculations were performed when the wall thickness of the pipes of the load-bearing belts was reduced by 1 mm, the strength condition for such sections is ensured, and the mass of the boom will decrease by 7300 kg.

**For citation:** Brozovsky S.Yu., Franz T.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. Analysis of loading of the boom of a dragline excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 1(171):11-17 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-11-17, EDN: QBNHLG

#### REFERENCES

1. Tsybalyuk T.A., Cheskidov V.I. Metodika vybora modeli draglayna dlya otrabotki vskryshnykh porod na razrezakh. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2020; 4:59–69. DOI: 10.15372/FTPRPI20200407.
2. 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; 52(4):725–731.
3. 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.
4. Tsybalyuk T.A., Cheskidov V.I. Selection procedure of draglines for stripping operations in surface mining. *Journal of Mining Science*. 2020; 56(4):557–566.
5. Martyanov V.L., Markov S.O., Kolesnikov V.F. Study of inclined deposits opening under the combined mining system: Kureinsky area case-study. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2021; 4(15):64–88. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-64-88.
6. Somua-Gyimah Godfred, Frimpong Nyaaba Wedam, Gbadam Eric Formation fragmentation modeling and impact on dragline excavation performance in surface mining operations. *International Journal of Mining Science (IJMS)*. 2019; 5(1):11–21. DOI: 10.20431.
7. Penchuk V.A., Kruglov D.A. Vliyaniye dliny strely na proizvoditel'nost' draglayna. Nazemnyye transportno-tekhnologicheskiye komplekсы i sredstva : Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Tyumen', 08 fevralya 2021 goda / Pod obshchey redaktsiyey SH.M. Merdanova. Tyumen': Tyumenskiy industrial'nyy universitet; 2021. S. 159–162.
8. Poderni R.Yu., Khromoy M.R., Solov'yev S.V. Analiz sovremennykh konstruktsiy ekskavatorov-draglaynov mirovykh proizvoditeley. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2012; 8:103–114. EDN PCHAMX.
9. Lagunova Yu.A., Komissarov A.P., Shestakov V.S. Proektirovaniye kar'yernykh ekskavatorov. M.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye; 2017.
10. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Yemel'yanov A.A., Pumpur Ye.V. Otsenka pokazateley rabotosposobnosti kar'yernykh ekskavatorov v real'nykh usloviyakh ekspluatatsii. *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten'*. 2020; 10:86–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
11. Kritskiy D.Yu., Mutygullin A.V., Shigin A.O., Bardakov V.V. Organizatsiya monitoringa strel ekskavatorov-draglaynov v rezhime ekspluatatsii. *Gornyy zhurnal*. 2018; 2:91–96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.
12. Panfilova O.R., Velikanov V.S. Nekotoryye aspekty rascheta i vybora parametrov elementov metallokonstruktsiy gornotransportnykh mashin. *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten'*. 2020; 1:141–148. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-141-148.
13. Pobegaylo P.A., Kritskiy D.Yu. Razvitiye inzhenernogo podkhoda k otsenke napryazheniy v metallokonstruktsiyakh ekskavatorov-draglaynov. *V sbornike: Tekhnologicheskoye oborudovaniye dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XVIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Cheniya pamyati V. R. Kubacheka»*. Yekaterinburg, 2020. S. 335–340.
14. Golovneva T.P., Shestakov V.S. Raschet nagruzok na strelu draglayna pri transportirovaniy kovsha. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika*. 2009; 4:50–55.
15. Brozovskiy S.Yu., Shestakov V.S. Raschet usilii v kanatakh draglayna pri vkhode kovsha v zonu rastyazhki. *Tekhnologicheskoye oborudovaniye dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti. Sbornik trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Pod obshchey redaktsiyey Yu.A. Lagunovoy. Yekaterinburg, 2023. S. 237–240.

*The author declares no conflict of interest.*

*About the author:*

**Sergey Yu. Brozovsky**, deputy. Ch. designer of OJSC Transmash, (620017, Russia, Ekaterinburg, Frontovyykh Brigade St., 29);

**Tatyana P. Franz**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, (620144, Russia, Ekaterinburg, Kuibysheva St., 30)

**Yuliya A. Lagunova**, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Head 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, Kuibysheva St., 30); Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Robots of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin” (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira St., 19);

**Viktor S. Shestakov**, C. Sc. in Engineering, 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, Ekaterinburg, Kuibysheva St., 30), shestakov.v.s@mail.ru

*Contribution of the authors:*

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

Tatyana P. Franz – development of a design model and a fastening model in the APM WinMachine module; performing calculations; writing text, analyzing results; conclusions.

Yuliya A. Lagunova. – formulation of a research task; development of an algorithm for constructing a self-loading zone, writing a text.

Viktor S. Shestakov – formulation of the problem of optimizing the boom design; development of an algorithm for constructing a stretching zone, development of a mathematical model; development of a loading model; analysis of the results.

*Author have read and approved the final manuscript.*

