

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ СТРЕЛЫ ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА

В. С. Шестаков¹, С. Ю. Брозовский^{1,2}, П. В. Давыдов³

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, 620144, Россия, E-mail: gmf.gmk@m.ursmu.ru,

² АО «Уралтрансмаш», г. Екатеринбург, 620144, Россия,

³ ООО «ЭКГСервис», г. Челябинск

Аннотация: Актуальность работы обусловлена потребностью конструкторских отделов, занимающихся проектированием экскаваторов-драглайнов, в методиках, позволяющих обосновать конструктивные параметры по условиям надежности и в то же время приводящих к снижению массы. Цель работы: разработка методики расчета на прочность и расчета нагрузок на элементы стрелы при транспортировании ковша. На стрелу действует собственная сила тяжести, а усилие на головные блоки от подъемного каната действуют в вертикальной плоскости. Транспортирование ковша из точки окончания копания в точку разгрузки происходит с одновременным поворотом платформы, при этом наряду с силами тяжести на стрелу действуют центробежные и инерционные силы, действующие в горизонтальных плоскостях. Методология исследования: математическое моделирование рабочего процесса. Исследования проведены для стрелы ЭШ-10.70, спроектированной конструкторским отделом предприятия «ЭКГСервис». В результате для экскаватора-драглайна разработаны математическая модель расчета усилий при транспортировании ковша, алгоритм и программа на алгоритмическом языке, позволяющие определять усилия в элементах рабочего оборудования. Созданная математическая модель предназначена для использования при расчете напряжений в элементах стрелы. Приведены формулы расчета нагрузок на стрелу, алгоритм, результаты расчета усилий и напряжений в элементах стрелы для экскаватора ЭШ-10.70.

Ключевые слова: экскаватор-драглайн, стрела, поворотное движение, скорость, ускорение, усилие, напряжение, модель, алгоритм.

Для цитирования: Шестаков В. С., Брозовский С. Ю., Давыдов П. В. Исследование нагрузки стрелы экскаватора-драглайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 167–178. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_167.

Excavator boom load study dragline

V.S. Shestakov¹, S.Yu. Brozovskiy², P.V. Davydov³

¹ Ural State Mining University, 620144, Russia, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30;

² JSC "Uraltransmash", Ekaterinburg, 620017, st. Front brigades, 29;

³ Technical Director of EKGService JSC, 454091, Chelyabinsk, st. Karl Marx, 131–144

Abstract: The relevance of the work is due to the need of design departments involved in the design of dragline excavators in methods that allow justifying design parameters in terms of reliability, and at the same time leading to weight reduction. Purpose of the work: development

of a methodology for calculating the strength and calculating the loads on the elements of the boom during the transportation of the bucket. The boom is affected by its own gravity, the force on the head blocks from the lifting rope, acting in a vertical plane. Transportation of the bucket from the end point of digging to the point of unloading occurs with the simultaneous rotation of the platform, while along with the forces of gravity, the boom is affected by centrifugal and inertial forces acting in horizontal planes. Research methodology: mathematical modeling of the workflow. The studies were carried out for the boom ESH-10.70, designed by the design department of the Joint Stock Company "EKService", Chelyabinsk. Results. For a dragline excavator, a mathematical model has been developed for calculating forces during bucket transportation, an algorithm and a program in an algorithmic language that allow determining forces in the elements of working equipment. The created mathematical model is intended for use in the calculation of stresses in the elements of the boom. The formulas for calculating the loads on the boom, the algorithm, the calculation results for the excavator are given.

Key words: dragline excavator, boom, rotary motion, speed, acceleration, effort, stress, model, algorithm.

For citation: Shestakov V. S., Brozovskiy S. Yu., Davydov P. V. Excavator boom load study dragline. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):167–178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_167.

Введение

Исследования проведены по проекту стрелы экскаватора-драглайна ЭШ-10.70, разработанному конструкторским отделом ООО «ЭКГСервис», г. Челябинск. Стрела предназначена для замены базовой модели стрелы, исчерпавшей свой ресурс и не подлежащей восстановлению. На стадии предпроектных исследований рассмотрены рекомендации по выбору драглайнов для конкретных условий эксплуатации [1–4], проанализирован опыт эксплуатации [5–8], обработаны предложения по совершенствованию общей конструкции экскаваторов [9, 10], включая его различные узлы [11], рассмотрены предложения по повышению эффективности эксплуатации [12, 13], в том числе снижению энергозатрат на рабочий процесс [14], уделено также внимание вопросу повышения надежности и безопасности узлов конструкции стрелы при ее обслуживании [15–17]. Исследователями предложено снизить энергозатраты за счет совершенствования привода и системы управления, но, на наш взгляд, по этому направле-

нию малый резерв экономии энергии. Большой эффект может быть достигнут за счет конструктивного совершенствования экскаватора, в том числе стрелы. Снижение массы стрелы уменьшит момент инерции поворотной части и снизит затраты энергии на поворотное движение платформы.

В настоящее время на экскаваторах драглайнах применяются вантовые, трёхгранные 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 есть у них и существенные недостатки. При недостаточной жесткости стрелы на кручение при работе возникают значительные крутильные колебания, иногда возникает перекося стрелы и ее повреждение, эксплуатационная надежность достаточно низкая, поэтому в новых моделях драглайнов такие стрелы не используются.

На экскаваторах-драглайнах производства ПАО «Уралмашзавод» уста-

новлены 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.

Перспективной схемой является комбинированная конструкция стрелы, состоящая из двух шарнирно-соединенных частей — основания и верхней секции [10]. Обе части имеют по два трубчатых несущих пояса, обеспечивающих достаточную жесткость при поворотном движении платформы, по массовым показателям такая стрела эффективнее трехгранной. Размеры стрел подобраны так, что сжимающие усилия от подъемных канатов идут вдоль трубчатых поясов, знакопеременная нагрузка на трубы отсутствует.

Данные по массовым показателям стрел драглайнов показывают, что масса существенным образом зависит не только от типа стрел, но и от разбросов в массовых показателях стрел одинаковой длины. Учитывая большую длину стрел, увеличенная масса приводит к повышению массы противовеса, момента инерции поворотной части, а также требует использования приводов большей мощности для механизма поворота.

Резерв по снижению массы заключается в использовании рациональных типов стрел с оптимальными значениями параметров. Критерием при определении оптимальных значений параметров может служить масса. Ограничениями при поиске оптимальных значений будет требование обеспечения надежности и безопасности эксплуатации.

Процесс поиска оптимального варианта рассмотрим на примере комбинированной стрелы, состоящей

из основания стрелы и верхней секции, которая состоит из двух трубчатых поясов и подвески.

Для повышения надежности по результатам анализа была выявлена необходимость изменения конструкции стрелы. На базовой модели экскаватора ЭШ-10.70 лестницы располагались на одной стороне стрелы, что усложняло ее обслуживание, невозможно было выявить начало появления усталостных трещин на левых несущих секциях [17]. В разработанном проекте стрелы лестницы размещены и на левой стороне, кроме того, улучшены конструкции как лестниц, так и площадок пилонов и площадок обслуживания головных блоков. Внесенные изменения привели к увеличению массы стрелы примерно на 2 т, поэтому потребовалось проведение дополнительных расчетов для проверки ее на прочность и устойчивость. Согласно поставленной цели, одновременно с определением оптимальных значений параметров стрелы по минимуму массы должны быть обеспечены требуемая прочность и долговечность.

В настоящее время прочностные расчеты сложных металлоконструкций выполняются специальными компьютерными системами, вычислительный модуль которых основан на методе конечных элементов [18, 19]. В России в качестве такой системы разработано программное обеспечение APM WinMachine, где имеется модуль Structure3D для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций. Расчетное ядро APM WinMachine имеет аттестационный паспорт программного средства, выданный в Ростехнадзоре, регистрационный № 488 от 19.12.2019, ее можно применять для выполнения прочностных расчетов строительных и иных конструкций. Стрела драглайна вполне может быть проверена на прочность в этой

системе. Оптимизация с использованием этой системы будет заключаться в подборе таких сечений элементов стрелы, при которых будут исключены «излишние» запасы прочности с сохранением условия прочности и устойчивости.

Для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния в АРМ WinMachine требуется составить: модель конструкции стрелы, модель нагружения и модель закрепления.

Решение задач исследований

Модель нагружения включает в себя значения всех действующих на конструкцию внешних нагрузок и их приложение. При транспортировании ковша нагрузки на стрелу зависят от заполнения ковша, его положения, а также от параметров поворотного движения и величины ветрового давления.

Предыдущими исследованиями доказано, что наибольшие нагрузки на стрелу действуют при положении ковша на границе зоны растяжки [19]. Схема для математической модели расчета нагрузок на стрелу от силы тяжести ковша приведена на рис. 1. На рис. 1 обозначено: A — ось направляющих блоков, B — ось головных блоков, C — ось подъемных блоков на надстройке, K — условная точка пересечения подъемных и тяговых канатов и вектора силы тяжести ковша, P, T — точки схода подъемных и тяговых канатов с блоков. Точки используются для обозначения отрезков в приведенных ниже выражениях введением символа L с индексами точек, например, L_{AB} .

Нагрузки на головные блоки стрелы при положении ковша на границе зоны растяжки определяют по следующему алгоритму. Задают интервал по оси x допустимого положения ковша. Минимальное значение интервала (x_{\min})

определяют добавлением к координате направляющего блока по x длины упряжи ковша, а максимальное (x_{\max}) — вычетом из координаты оси головных блоков длины упряжи. Интервал возможного положения ковша разбивают на N отрезков. Из каждой точки, полученной при разбиении интервала, в программе на алгоритмическом языке организовано перемещение ковша по вертикальной линии начиная с $z_i=0$, с определением по мере перемещения размеров отрезков, углов наклона отрезков, усилий в подъемном и тяговом канатах. Усилия в канатах сравнивают с заданными максимальными значениями. При достижении усилия в подъемном или тяговом канате максимального значения подъем ковша прекращается, результаты расчета усилий на головные блоки заносят в таблицу, по этим усилиям выполняют проверку стрелы на прочность.

Усилия в тяговом (F_T) и подъемном (F_{Π}) канатах в текущем положении ковша определяют по уравнениям равновесия

$$F_T = \frac{G_{K+Г} + F_{цб} \operatorname{tg} \beta_{\Pi}}{\sin \beta_T - \cos \beta_T \cdot \operatorname{tg} \beta_{\Pi}},$$

$$F_{\Pi} = -\frac{F_T \cdot \cos \beta_T + F_{цб}}{\cos \beta_{\Pi}}, \quad (1)$$

где $G_{K+Г}$ — сила тяжести груженого ковша; $F_{цб}$ — центробежная сила; β_{Π} , β_T — углы наклона отрезков (см. рис. 1).

Инерционная сила действует в плоскости, перпендикулярной плоскости действия силы тяжести, ее действие на стрелу будет определено по отдельному выражению, поэтому в уравнение равновесия она не включена.

Центробежная сила, действующая на ковш при повороте поворотной платформы,

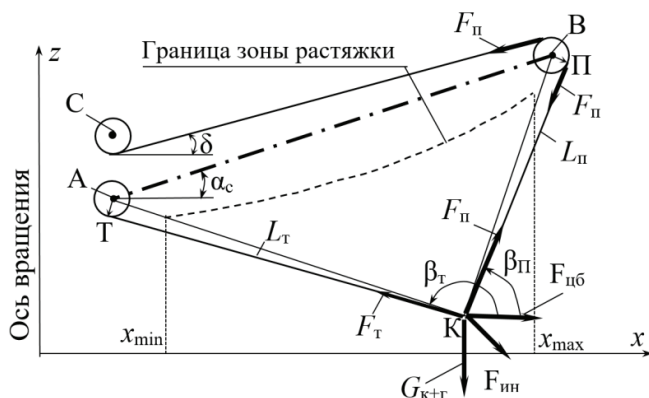


Рис. 1. Схема к расчету усилий
Fig. 1. Scheme for calculating forces

$$F_{цб} = m_{к+г} \cdot \omega_в^2 \cdot x_i, \quad (2)$$

где $\omega_в$ — угловая скорость поворота платформы; x_i — координата расчета усилий в i -й точке; $m_{к+г}$ — масса груженого ковша.

Угол наклона отрезка ПК к горизонтали:

$$\beta_n = \alpha_c + \cos^{-1} \left(\frac{L_c^2 + L_{BK}^2 - L_{AK}^2}{2 \cdot L_c \cdot L_{BK}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{r_{цб}}{L_n} \right), \quad (3)$$

где α_c — угол наклона стрелы; L_c — длина стрелы; L_{BK} , L_{AK} — расстояния от оси головных (направляющих) блоков до центра тяжести ковша; $r_{цб}$ — радиус головных блоков, L_n — условная текущая длина подъемного каната при расчетах.

Угол наклона отрезка ТК к горизонтали:

$$\beta_n = \alpha_c + \cos^{-1} \left(\frac{L_c^2 + L_{BK}^2 - L_{AK}^2}{2 \cdot L_c \cdot L_{BK}} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{L_{BK}^2 + L_{AK}^2 - L_c^2}{2 \cdot L_{AK} \cdot L_{BK}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{r_{нб}}{L_m} \right), \quad (4)$$

где L_m — условная текущая длина тяговых канатов при расчетах ковша; $r_{нб}$ — радиус направляющих блоков.

Длина отрезка L_{BK} :

$$L_{BK} = \sqrt{(x_i - x_{цб})^2 + (z_i - z_{цб})^2}, \quad (5)$$

где x_i , z_i — координаты текущего положения центра тяжести ковша, вычисляются в приведенном выше алгоритме определения границ зоны растяжки.

Длина отрезка L_{AK} :

$$L_{AK} = \sqrt{(x_i - x_{нб})^2 + (z_i - z_{нб})^2}. \quad (6)$$

Подъемные канаты огибают головные блоки и через блоки надстройки С идут на барабан лебедки. При расчетах на прочность уменьшение нагрузок при огиба-

нии канатами головных блоков можно не учитывать, считая, что усилия в канатах до и после головных блоков равны.

В модели нагружения модуля Structure 3D системы APM WinMachine должны быть определены проекции нагрузок по осям модели конструкции, которые совпадают с обозначением расчетной схемы по рис. 1.

Проекция усилия подъемных канатов от головных блоков до ковша

$$F_{п.у.к} = F_{п} \cdot \cos \beta_{пг}; F_{п.у.к} = F_{п} \cdot \sin \beta_{п}. \quad (7)$$

Проекция усилия подъемных канатов от головных блоков до блоков надстройки

$$F_{п.у.г} = F_{п} \cdot \cos \delta; F_{п.у} = F_{п} \cdot \sin \delta, \quad (8)$$

где δ — угол наклона подъемного каната между головными блоками и блоками надстройки,

$$\delta = \arctg[(z_B + r_{гб} - z_C - r_{нб}) / (x_B - x_C)]. \quad (9)$$

При разгоне и торможении поворотной платформы с ускорением на ковш начнут действовать усилия инерции, которые подъемными канатами передадутся на головные блоки. Инерционная сила, действующая на ковш от ускорения поворотного движения, составит

$$F_{ом} = m_{к} \cdot \varepsilon_i \cdot x_i, \quad (10)$$

где ε_i — угловое ускорение поворотного движения; x_i — расстояние по горизонтали от оси вращения платформы до ковша.

Инерционная сила и сила тяжести действуют в плоскости стрелы, а отклоняющая сила — перпендикулярно этой плоскости.

Действие инерционной силы на голову стрелы можно определить по выражению

$$F_{ом.z} = F_{ом} \frac{x_i - x_{нб}}{x_{гб} - x_{нб}}. \quad (11)$$

Для проведения исследований составлены несколько *моделей конструкций*: модель конструкции всей стрелы и модели конструкций отдельных узлов (верхней подвески, пяты стрелы, раскосов и др.). Исследование напряженно-деформированного состояния стрелы проведено в два этапа.

На первом этапе исследований использована комбинированная модель конструкции стрелы из стержневых, пластинчатых и объемных конечных элементов. Стержневыми элементами реализованы несущие трубы поясов, раскосы, оси. Стержневыми и пластинчатыми конечными элементами смоделированы лестницы, причем перила, которые не несут нагрузки, в модель не включены, а их вес учтен. Объемными элементами реализована обойма нижней подвески. При таком исполнении подвески обеспечена точная передача усилий от шести раскосов площадки пилонов через обойму на ось нижнего узла подвески. Расчетами на этом этапе определены усилия и напряжения во всех элементах модели.

Для второго этапа исследований использованы объемные модели проектов узлов стрелы, которые для расчетов разбиты в модуле APM Studio на объемные конечные элементы. Нагрузками при расчете напряжений для таких моделей служат усилия, определенные на первом этапе расчетов.

Исследования выполнены по проекту стрелы экскаватора ЭШ-10.70, объемная модель которой приведена на рис. 2. Шарнирное соединения и верхней секции снижает изгибающий момент и позволяет уменьшить сечение трубчатых поясов. Масса модели 58 203 кг. Разработанная для расчета напряжений модель конструкции стрелы приведена на рис. 3. Масса модели формы стрелы 58 474 кг.

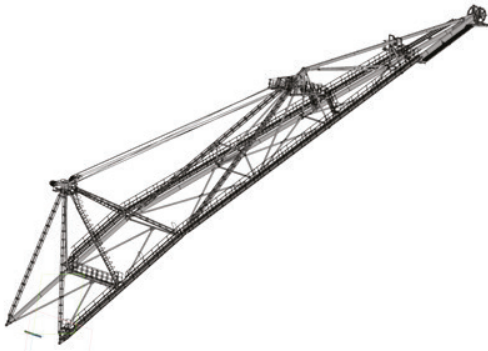


Рис. 2. Объемная модель стрелы ЭШ-10.70
Fig. 2. Three-dimensional model of the boom ESH-10.70

В табл. 1 приведены исходные данные для проведения исследований.

Карта напряжений при положении ковша на максимальном вылете и на максимальной высоте ($x=60$ м, $z=27$ м) показана для стрелы на рис. 4, а для обоймы — на рис. 5. На голову модели стрелы приложены максимальные расчетные инерционные и центробежные силы. Расчет выполнен с учетом:

– действия усилий в подъемных канатах (проекции усилия $F_{п,x}=700,2$ кН, $F_{п,z}=612,2$ кН);

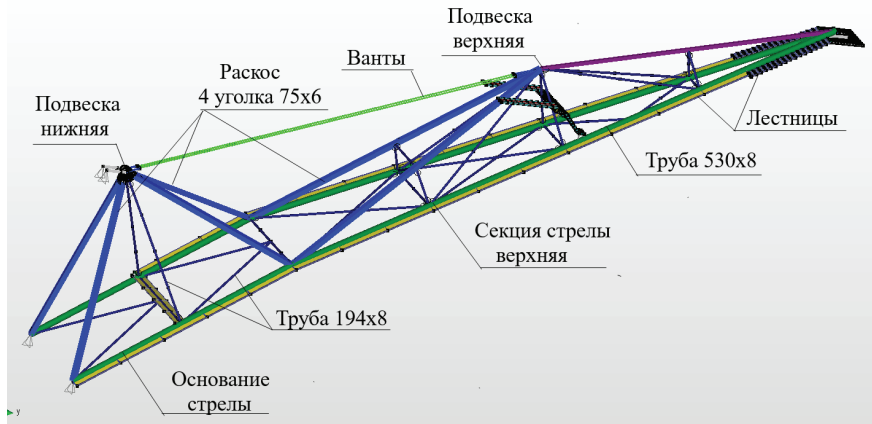


Рис. 3. Модель конструкции стрелы ЭШ-10.70
Fig. 3. Model of the design of the boom ESH-10.70

Таблица 1
Исходные данные
Initial data

Параметры	Размерность	Значение
1. Установившаяся скорость поворота платформы	рад/с	0.18
2. Ускорения разгона, торможения платформы	с ⁻²	0.03
3. Масса порожнего ковша	т	9.688
4. Масса груженого ковша	т	30
5. Максимальное усилие подъема	кН	490
6. Максимальное усилие тяги	кН	588
7. Координаты оси пяты стрелы: по оси x от оси вращения по оси z	м	5,2
		2,15
8. Расстояние от пяты до оси головных блоков	м	70
9. Угол наклона линии, соединяющей ось пяты стрелы и ось головных блоков	град	30

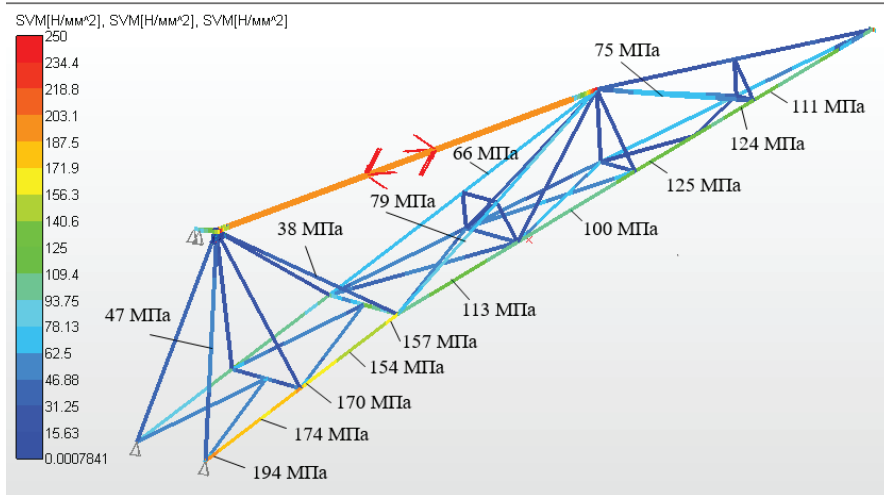


Рис. 4. Карта напряжений стрелы
Fig. 4. Boom stress map

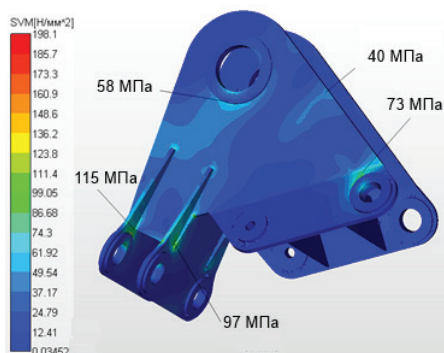


Рис. 5. Карта напряжений в обойме
Fig. 5. Stress map in the cage

- действия инерционной силы ковша на головной блок 49,3 кН;
- действия сил тяжести конструкции стрелы;
- действия центробежных и инерционных сил элементов стрелы;
- действия ветрового давления (по 5-му ветровому району на стрелу сбоку) по направлению, совпадающему с действием инерционной силы от ковша.

Для выявления доли вышеперечисленных действующих нагрузок выполнены расчеты при действии этих нагрузок по отдельности для несколь-

ких вариантов положения ковша, два из которых приведены в табл. 2. Результаты показывают, что основной вклад в значение напряжения вносят усилия в подъемных канатах и собственный вес стрелы (~71%). Доля в напряжении от действия центробежных сил менее 2%, что объясняется малыми значениями угловой скорости поворотного движения платформы.

Анализ результатов расчета напряжений по рис. 4 показывает, что в трубах 530x8 верхней секции (см. рис. 3) напряжения практически в два раза ниже допустимого напряжения 210 МПа, т.е. имеется излишний запас прочности. Для выявления возможности снижения массы в модели конструкции стрелы поясам верхней секции заданы сечения «Труба 530x6», а всем нижним раскосам сечения – «Труба 194x6». При такой замене масса модели формы стрелы составит 55 399 кг, координата центра тяжести по оси x от пяты стрелы – 32,34 м. Расчетные напряжения в трубах с уменьшенной толщиной остались ниже допустимых, в диапазоне 130–170 МПа.

Таблица 2
Результаты расчета
Calculation results

Вариант	Составляющие расчетных напряжений, МПа /доля от суммарного					Суммарное напряжение, МПа
	от собственного веса	от усилий в подъемных канатах	от инерционных сил	от центробежных сил	от ветрового давления	
1	63,2/0,326	74,8/0,386	34,1/0,176	1,65/0,009	17,8/0,092	194,1
2	65,4/0,367	62,07/0,348	29,14/0,164	1,6/0,009	18,22/0,102	178,11

Таким образом, применение для верхней секции труб 530×6 и раскосов 194×6 приводит к уменьшению массы на 3075 кг при сохранении в то же время достаточной прочности. При снижении массы стрелы появится возможность или уменьшить массу противовеса, или, оставляя противовес неизменным, увеличить вместимость ковша для рассматриваемого экскаватора примерно на 1 м³ и за счет этого увеличить производительность экскаватора.

Заключение

1. Разработанные математическая модель, алгоритм и программа на алгоритмическом языке позволяют определять максимальные усилия в подъемных канатах при транспортировании ковша для последующего использования их при расчетах на прочность конструкции стрелы.

2. Анализ расчетных усилий показал, что у такой конструкции стрелы равнодействующая усилий в подъемных канатах, действующая на голову, направлена ниже стрелы, что обеспечи-

вает работу верхних элементов только на растяжение.

3. В результате исследования выявлены «излишние» запасы прочности в некоторых элементах спроектированной конструкции стрелы. Предложено уменьшить сечения таких элементов, в результате масса стрелы может быть уменьшена на 3,075 т (на 5,2% по сравнению с массой базового варианта). Условие прочности при таких изменениях обеспечивается.

4. Предлагаемая методика с использованием системы APM WinMachine позволяет выполнять проверку на прочность и устойчивость, а также проводить поиск оптимального исполнения стрелы по критерию массы.

Вклад авторов:

Шестаков В. С. — постановка задачи исследования, выполнение расчетов, анализ результатов исследования.

Брозовский С. Ю. — выполнение работы по систематизации материала, написание текста статьи.

Давыдов П. В. — генерация идеи исследования, получение данных для анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пенчук В. А., Круглов В. А. Влияние длины стрелы на производительность драглайна // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 08 февраля 2021 года. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. — С. 159–162.

2. *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/FTPRPI20200407.

3. *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, vol. 52, no. 4, pp. 725–731.

4. *Li Y., Liu W.* Comparison of advanced dragline dynamics models for efficient engineering analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014, vol. 72, no. 5, pp. 757–764.

5. *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, vol. 26, no. 4, pp. 603–619.

6. *Tymbalyuk T. A., Cheskidov V. I.* Selection procedure of draglines for stripping operations in surface mining // Journal of Mining Science. 2020, vol. 56, no. 4, pp. 557–566.

7. *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), pp. 64–88. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-64–88.

8. *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, pp. 11–21. DOI: 10.20431/2454–9460.0501002.

9. *Подэрни Р. Ю.* Обзор мирового рынка современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных разработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № S1. — С. 507–518.

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

11. *Грабчук М. С.* Повышение эффективности эксплуатации экскаватора ЭШ-10/70 в зимний период в условиях Калининградского калийного комбината // Развитие современной науки и образования: Актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2 ч. — Пенза, 2022. — С. 74–77.

12. *Панишев С. В., Козлов Д. С., Максимов М. С.* Комплексный мониторинг работы драглайна на угольном месторождении криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № S30. — С. 185–192.

13. *Wei N., Li Ch., Peng X., Zeng F., Lu X.* Conventional models and artificial intelligence based models for energy consumption forecasting: A review // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019, vol. 181, № 106187.

14. *Ляхомский А. В., Петухов С. В.* Энергоэффективность экскаваторных работ угледобывающих предприятий // Промышленная энергетика. — 2019. — № 1. — С. 38–41.

15. *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.

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.

17. *Панфилова О. Р., Великанов В. С.* Некоторые аспекты расчета и выбора параметров элементов металлоконструкций горнотранспортных машин // Горный информаци-

онно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 1. — С. 141–148. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-141-148.

18. Побегайло П. А., Крицкий Д. Ю. Развитие инженерного подхода к оценке напряжений в металлоконструкциях экскаваторов-драглайнов // 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.

19. 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. — Екатеринбург, 2023. — С. 237–240. **МАН**

REFERENCE

1. Penchuk V.A., Penchuk V.A., Kruglov D.A. Influence of boom length on dragline performance. *Ground transport and technological complexes and means: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Tyumen, February 08, 2021*. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2021, pp. 159–162.

2. Tsymbalyuk T.A., Cheskidov V.I. Methodology for selecting a dragline model for overburden mining in open-pit mines. *Physico-technical problems of mineral development*. 2020, no. 4, pp. 59–69. DOI: 10.15372/FTPRPI20200407.

3. 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, vol. 52, no. 4, pp. 725–731.

4. Li Y., Liu W. Comparison of advanced dragline dynamics models for efficient engineering analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol. 72, no. 5, pp. 757–764.

5. 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, vol. 26, no. 4, pp. 603–619.

6. Tsymbalyuk T.A., Cheskidov V.I. Selection procedure of draglines for stripping operations in surface mining. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 4, pp. 557–566.

7. 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), pp. 64–88. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-64-88.

8. 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, pp. 11–21. DOI: 10.20431/2454-9460.0501002.

9. Poderni R. Yu. Review of the world market of modern excavation and loading equipment for open-pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S1, pp. 507–518.

10. Lagunova Yu. A., Komissarov A. P., Shestakov V. S. Design of mining excavators, Moscow, Innovative engineering, 2017, 228 p.

11. Grabchuk M. S. Improving the efficiency of operation of the ESH-10/70 excavator in the winter period in the conditions of the Kaliningrad potash plant. Development of modern science and education: Current issues, achievements and innovations. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference: In 2 parts. Penza, 2022, pp. 74–77.

12. Panishev S. V., Kozlov D. S., Maksimov M. S. Complex monitoring of the dragline operation at a coal deposit in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S30, pp. 185–192.

13. Wei N., Li Ch., Peng X., Zeng F., Lu X. Conventional models and artificial intelligencebased models for energy consumption forecasting: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2019, vol. 181, 106187.

14. Lyakhomsky A. V., Petukhov S. V. Energy Efficiency of Excavator Works at Coal Mining Enterprises. *Industrial Energy.* 2019, no. 1, pp. 38–41.

15. Kritsky D. Yu., Mutygullin A. V., Shigin A. O., Bardakov V. V. Organization of monitoring of dragline excavator booms in operation mode. *Gornyi Zhurnal.* 2018, no. 2, pp. 91–96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.

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, no. 2, pp. 91–96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.

17. Panfilova O. R., Velikanov V. S. Some aspects of calculation and selection of parameters of elements of metal structures of mining transport machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 1, pp. 141–148. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-141-148.

18. Pobegailo P. A., Kritsky D. Yu. Development of an engineering approach to assessing stresses in the metal structures of dragline excavators. *Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference “Readings in Memory of V. R. Kubachek”, held as part of the Ural Mining Decade.* Yekaterinburg, 2020, pp. 335–340.

19. Brozovsky S. Yu., Shestakov V. S. Calculation of efforts in dragline ropes when the bucket enters the stretch zone. *Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference held within the framework of the Ural Mining Decade.* Yekaterinburg, 2023, pp. 237–240.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шестаков Виктор Степанович — канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Горные машины и комплексы», <http://orcid.org/0000-0001-9468-6696>? Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, 620144, ул. Куйбышева, 30, Россия, E-mail: shestakov.v.s@mail.ru (для контактов);

Брозовский Сергей Юрьевич — аспирант, зам. гл. конструктора бюро серийной гражданской продукции АО «Уралтрансмаш», г. Екатеринбург, 620017, ул. Фронтových бригад, 29, E-mail: ogr@uraltransmash.ru;

Давыдов Павел Владимирович — технический директор АО «ЭКГСервис», 454091, г. Челябинск, ул. Карла Маркса, 131–414, E-mail: info@ekg-servis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shestakov V. S., Cand. Sci. (Eng.), Ural State Mining University, 620144, Russia, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30, E-mail: shestakov.v.s@mail.ru (corresponding author);

Brozovskiy S. Yu., JSC “Uraltransmash”, Ekaterinburg, 620017, st. Front brigades, 29;

Davydov P. V., Technical Director of EKGService JSC, 454091, Chelyabinsk, st. Karl Marx, 131–414.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 03.10.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 03.10.2023; accepted for printing 10.12.2023.