

На правах рукописи

Сборок

БРОЗОВСКИЙ Сергей Юрьевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Горных машин и комплексов»
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Научный руководитель – Кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры «Горные машины и
комpleксы» ФГБОУ ВО «Уральский
государственный горный университет»
Шестаков Виктор Степанович

Официальные оппоненты:

**Иванов
Сергей Леонидович** – Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры машиностроения
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского горного
университета императрицы Екатерины II».

**Кузиев
Дильшад Алишерович** – Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры горного оборудования, транспорта и
машиностроения ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «Московский институт стали и
сплавов» (НИТУ «МИСиС»).

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО УрФУ»).

Защита диссертации состоится «09» апреля 2026 г. в 11 часов 00 минут на
заседании диссертационного совета 24.2.423.02 при ФГБОУ ВО «Уральский
государственный горный университет» в ауд. 2142 по адресу: 620144,
Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30, 2-ой учебный корпус,
ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» –
<https://www.ursmu.ru/brozovskii-sergei-yurevic>.

Автореферат разослан «13» февраля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А. Е. Пелевин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При добыче полезных ископаемых открытым способом широко применяются драглайны для перевалки вскрышных пород. Затраты на обслуживание таких экскаваторов составляют значительную часть в себестоимости добычи горной породы, поэтому чтобы получить экономический эффект от добычи необходимо повысить производительность экскаваторов-драглайнов.

На отвалах в настоящее время используются экскаваторы-драглайны с длинной стрелой для перевалки вскрышных пород на требуемое расстояние по мере отработки в карьере полезного ископаемого. Удлинение стрелы даже на 1 % от ее длины увеличивает массу на 0,5-0,7 %, которая составляет 5...7 % от конструктивной массы всего экскаватора.

Такое влияние стрелы на массу драглайна вызывает необходимость при проектировании выполнять поиск рациональной конструкции для снижения массы драглайна. Снижение массы стрелы позволит одновременно уменьшить момент инерции поворотной части экскаватора, что позволит снизить время цикла, а, следовательно, повысить производительность при тех же параметрах поворотного механизма.

Сложность конструкции стрелы для определения рациональной конструкции и параметров, обеспечивающих получение по возможности меньшую массу и в то же время требуемой прочности, осуществляется с применением пакетов инженерного анализа (*ANSIS, APM WinMachine* и др.).

Особенностью расчетов стрелы экскаватора-драглайна является сложный характер нагружения ее в процессе работы. При выполнении исследований разработано математическое описание для определения усилий на ковш и головной блок стрелы по положению ковша. Результаты исследований оформлены методикой расчета рациональных параметров.

Еще одним из направлений повышения производительности экскаватора-драглайна может послужить снижение потерь горной массы при транспортировании от забоя до разгрузки. Такое снижение будет обеспечено при уменьшении наклона ковша в процессе транспортирования. Используемые методики определения параметров упряжи ковша основаны на расчете длины разгрузочного каната геометрическим построением при расчетном положении ковша. Перед началом разработки методики поставлена цель определения параметров упряжи по условию уменьшения просыпания горной массы при транспортировании.

Повышение производительности экскаватора-драглайна является актуальной научно-технической задачей.

Тема исследования соответствует направлениям исследований, указанных в паспорте научной специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины», а именно, пунктам:

14. Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствовании применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых.

15. Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие теории и практического опыта внесли Г.С. Бродский, К.Е. Виницкий, Д.П. Волков, П.А. Зыков, С.Л. Иванов, Л.И. Кантович, Г.Ю. Козин, А.П. Комиссаров, А.В. Королев, В.Р. Кубачек, Н.Н. Мельников, В.Г. Мерзляков, Р.Ю. Подэрни, М.Г. Рахутин, В.И. Русихин, А.В. Самолазов, Б.И. Сатовский, Л.С. Скобелев, Б.В. Слесарев, а так же ряд зарубежных ученых: Висбек З., Вэблер Д., Frimpong S., Hall A., Кельш Х. Р., Le Q. Н., Liu J., Rath H., Stefanov Goce.

Анализ публикаций по открытым источникам показал, что предприятия-производители экскаваторов-драглайнов не публикуют методики расчета параметров рабочего оборудования (стрел, ковшей и т.д.).

Объектом исследования является рабочее оборудование (стрела и ковш) экскаватора-драглайна.

Предметом исследования является повышение производительности экскаватора-драглайна за счет снижения массы трехгранных стрел на стадии проектирования и уменьшение объема просыпающейся из ковша горной массы при транспортировании ее в отвал.

Основная идея работы – снижение массы стрел экскаваторов-драглайнов осуществляется исключением «излишних» запасов прочности элементов на основе исследования напряженно-деформированного состояния, а также изменения конструкции стрелы путем исключения вант предварительного сжатия верхнего пояса стрелы. Уменьшение просыпания горной породы при транспортировании из забоя в отвал обеспечивается за счет задания рациональных параметров упряжи ковша и движения по рациональной траектории.

Целью работы является повышение производительности экскаватора-драглайна за счет снижения массы трехгранных стрел на стадии проектирования (или эксплуатации) и уменьшения объема просыпания горной массы из ковша обратно в забой при транспортировании в отвал.

Задачи работы:

- разработка математического и программного обеспечения для определения рациональных параметров подвески (упряжи) ковша и оформление результатов исследований в виде методики для практического применения.
- проведение исследований по поиску рациональных параметров стрелы, основанной на исследовании ее напряженно-деформированного состояния конструкции и по результатам оформление методики для практического применения.

Научная новизна полученных результатов заключается:

- в установлении зависимости потерь горной массы при транспортировании ковша экскаватора-драглайна от параметров подвески (упряжи) ковша и траектории движения ковша в зону разгрузки;
- в определении рациональных параметров стрелы экскаватора-драглайна по критерию массы и ограничению обеспечения прочности.

Теоретическая значимость работы состоит:

- в разработке математических моделей и алгоритма определения объема горной массы в ковше в зависимости от параметров подвески ковша и траектории движения из забоя в зону разгрузки;
- в разработке нового подхода к определению рациональных параметров стрелы экскаватора-драглайна, основанного на анализе напряженно-деформированного состояния элементов.

Практическая значимость работы состоит:

- в создании методики определения рациональных параметров подвески (упряжи) ковша;
- в обосновании конструктивного исполнения стрелы экскаватора-драглайна с исключением вант предварительного сжатия верхнего пояса;
- в разработке методики определения рациональных параметров стрелы, обеспечивающих снижение массы стрелы и, как следствие, снижение массы и стоимости всего экскаватора, повышение производительности.

Методология и методы диссертационного исследования: использование достаточного объема статистической информации. При выполнении теоретических исследований использовались современные методики сбора и обработки исходной информации, основные положения и методы математического моделирования, методы теории машин и механизмов, имитационное моделирование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Повышение производительности экскаватора-драглайна обеспечивается использованием ковша с рациональными параметрами подвески

(упряжи) и организации движения ковша по траектории, обеспечивающей наименьшие потери горной массы при его транспортировании.

2. Рациональное конструктивное исполнение и параметры стрелы экскаватора-драглайна определяются по критерию массы и ограничению обеспечения требуемой прочности на основе исследования напряженно-деформированного состояния стрелы.

Степень достоверности положений, выводов и результатов исследования подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, проверкой математических моделей на компьютерном программном обеспечении – в конструкторском пакете Компас, расхождение между которыми не превышает 3-5 %.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических и практических конференциях:

- международной научно-технической конференции «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В.Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2022-2025),
- международном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2024),
- VI Всероссийской научно-практической конференции "Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта", посвященной 95-летнему юбилею кафедры "Подъемно-транспортные машины и роботы" (г. Екатеринбург, 2024),
- XXXII Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2025).

Личный вклад соискателя заключается: в формулировании целей и задач исследования; участии на всех этапах диссертационного исследования – совместном проведении, анализе, описании и обобщении полученных результатов, написании и оформлении рукописи диссертации, публикации научных работ по результатам исследований; выполнении кинематического и силового анализа процесса транспортирования ковша экскаватора-драглайна; в разработке рекомендаций по определению степени совершенства конструктивных схем стрел драглайнов; в разработке методики поиска рациональных параметров рабочего оборудования с использованием моделирования напряженно-деформированного состояния стрелы драглайна.

Реализация результатов работы:

- разработана методика поиска рациональных параметров подвески ковша экскаватора-драглайна;
- разработана методика определения рациональных параметров стрел экскаваторов-драглайнов на основе выполнения исследований напряженно-

деформированного состояния (НДС);

– получено Свидетельство на программу ЭВМ по расчету параметров рабочего оборудования экскаватора-драглайна (представлено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025692750 от 24.11.2025);

– результаты диссертационного исследования обсуждены и рассмотрены на техническом совете ПАО «Уралмашзавод» (представлен «Акт об апробации результатов, полученных в ходе выполнения диссертации» от 02.10.2025);

– полученные результаты диссертационной работы приняты к внедрению в учебный процесс УГГУ для использования в лекционных и практических занятиях базовых и профилирующих дисциплин образовательных программ бакалавриата и магистратуры.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе три статьи в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, одна статья, входящая в международную базу данных и систему цитирования Scopus / Web of Science и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Материал диссертации изложен на 134 страницах машинописного текста, в том числе содержит 11 таблиц, 58 рисунка, библиографический список из 100 наименований и два приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, поставлены цели и задачи, представлены положения, выносимые на защиту, описаны методы исследований, обоснована научная и практическая значимость работы, описан личный вклад автора, реализация и апробация результатов.

В первой главе рассмотрены существующие типы конструкций ковшей и стрел экскаваторов-драглайнов, выполнен их анализ и обоснована цель дальнейших исследований параметров упряжи ковша и трехгранной стрелы экскаваторов-драглайнов. Приведены известные методики расчета нагрузок, действующих на стрелу. Большой вклад в разработку конструкций и методик расчета параметров стрел принадлежит Б.И. Бубновскому, Х.А. Винокурскому, Д.П. Волкову, Н.Г. Домбровскому, В.Н. Ефимову, В.В. Легоминову, В.П. Ломакину, Л.К. Михайлову, В.И. Морозову, В.Н. Николаеву, Б.Г. Осипову, С.А. Панкратову, В.А. Ряхину, Р.Ю. Подэрни, Е.С. Полянскому и др. Дан анализ существующих конструктивных схем и методик, в которых обоснованы габаритные размеры, размеры и формы поперечных сечений элементов и их

соединений, обеспечивающих заданные условия эксплуатации. Выполнен обзор известных методик расчета стрел экскаваторов-драглайнов, показано, что методики имеют ряд недостатков. Обоснована необходимость проведения исследований по созданию новой методики с применением компьютерных пакетов расчета напряженно-деформированного состояния.

Во второй главе разработана методика расчета действующих усилий на ковш и стрелу драглайна. Методика содержит блок расчета усилий в подъемных и тяговых канатах при транспортировании ковша к месту выгрузки и обратно в забой и углы наклона канатов, блок расчета инерционных и центробежных сил, блок расчета ветровых нагрузок. Значения усилий в подъемных и тяговых канатах, углы наклона канатов использованы в 3-й главе при расчете рациональных параметров упряжи ковша и в 4-й главе для модели нагружения модуля расчета напряжений *APM Structure3D*.

При выводе выражений расчета усилий использованы возможные варианты перемещения ковша по различным траекториям (рис. 1).

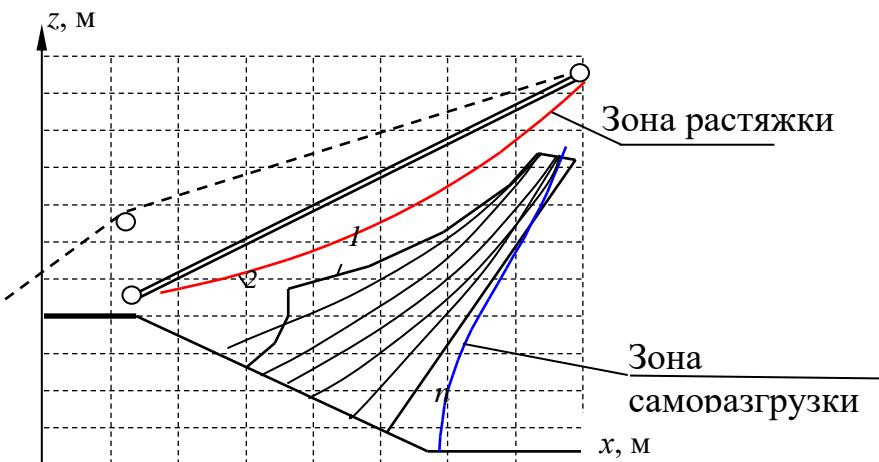


Рисунок 1 - Границы рабочей зоны и возможные траектории транспортирования ковша

Рассмотрено:

- перемещение ковша по заданной координатами траектории;
- перемещение ковша по траектории, определяемой скоростями подъемной и тяговой лебедок.

В известных методиках при расчете стрел драглайнов используют модели, основанные на расчете статических усилий от силы тяжести груженого ковша, перемещающегося по расчетной траектории (траектория 1). Динамические нагрузки учитываются заданием коэффициентов динамики.

Выражения математической модели получены с использованием схем: общего вида экскаватора с указанием действующих на ковш усилий (рис. 2) и схемы параметров в вертикальной плоскости (рис. 3).

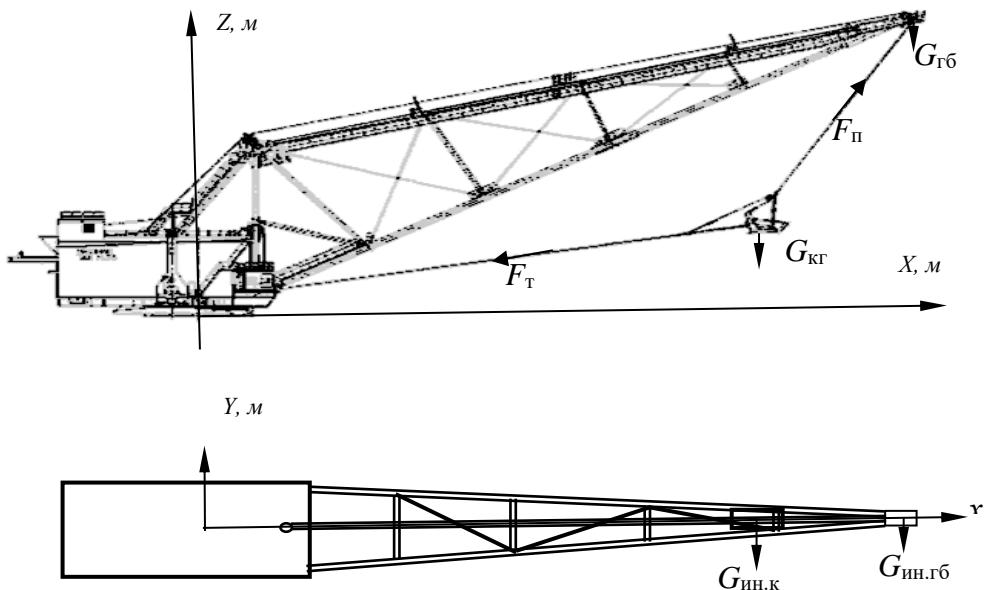


Рисунок 2 - Схема общего вида драглайна

Исходными данными для этой модели являются:

L_c – длина стрелы (расстояние между осью пяты стрелы и осью головных блоков);

α_c – угол наклона стрелы;

x_{pc}, z_{pc} – координаты оси пяты стрелы;

x_{hb}, z_{hb} – координаты оси направляющих блоков;

r_{hb}, r_{gb} – радиус направляющих и головных блоков;

G_{kr} – сила тяжести груженого или порожнего ковша.

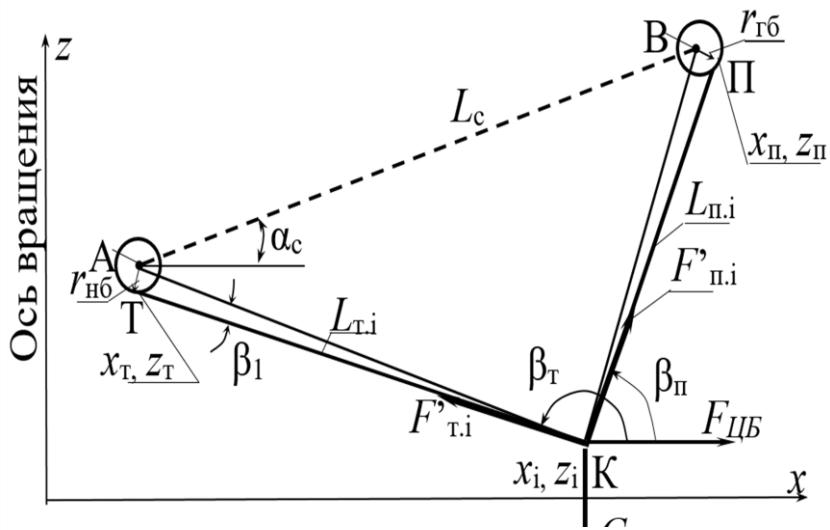


Рисунок 3 - Схема к определению усилий
в подъемных и тяговых канатах

В математическую модель вошли выражения, определения координат, углов, усилий. Разработан алгоритм и программа на алгоритмическом языке *Visual Basic*. Программа позволяет определять границы зоны растяжки, разгрузки

и определять усилия в любой точке внутри рабочей зоны. Программа позволяет проводить расчет усилий в задаваемой пользователем точке или во всех возможных точках, ограниченных зонами забоя, растяжки и разгрузки. Для всех точек задается шаг изменения координат по вертикали и по горизонтали.

Третья глава посвящена описанию методики определения рациональных параметров подвески ковша драглайна, обеспечивающих наименьшее просыпание породы при транспортировании.

Система разработки при эксплуатации драглайна определяет границы забоя, профиль отвала, угол поворота из забоя в отвал, угол над отвалом области разгрузки. Движение ковша из забоя в отвал возможно по различным траекториям.

По результатам наблюдений выявлено, что параметры подвески и траектория перемещения ковша влияют на наклон днища и на объем грунта в ковше, который будет доставлен к месту выгрузки, и значит на производительность экскаватора.

Наличие гибких связей в виде канатов и цепей (рис. 4) подвески не позволило получить конечные выражения для определения объема породы в ковше в зависимости от его положения, действующих на ковш усилий, параметров подвески, поэтому составлена модель, алгоритм и компьютерная программа для определения рациональных параметров подвески и траектории движения.

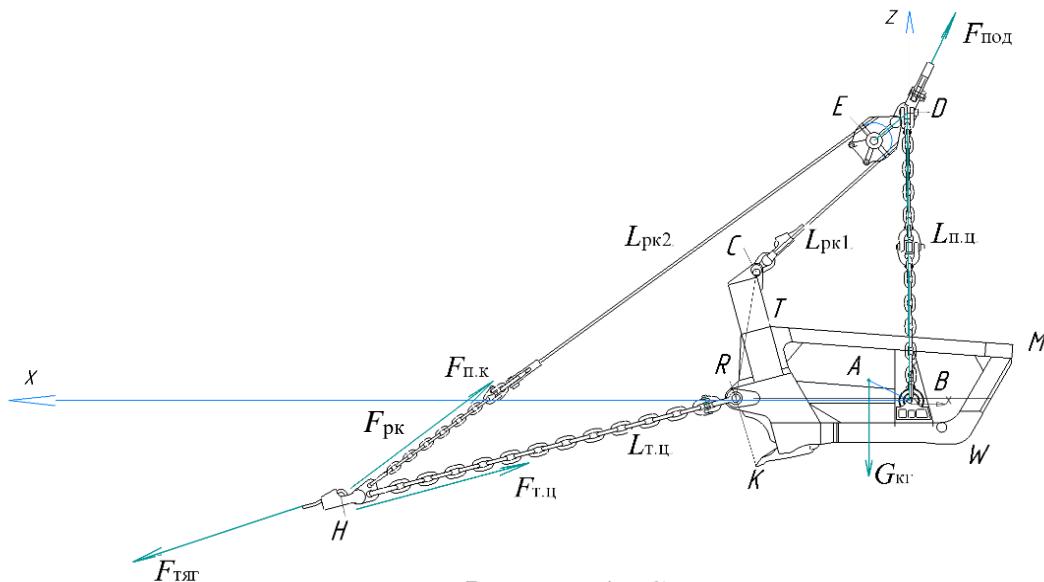


Рисунок 4 - Схема ковша

Поиск допустимого решения по следующему алгоритму:

1. Начальные значения: интервалы возможного наклона ковша, тяговых и подъемных цепей.
 2. Цикл 1 (внешний): изменение угла наклона подъемных цепей для поиска их положения, при котором длина разгрузочного каната равна заданной,

обеспечивается условия удержания ковша усилиями в подъемных и тяговых цепях и разгрузочном канате.

3. Цикл 2 (внутри цикла 1) изменения угла наклона днища ковша до достижения условия удержания ковша усилиями в тяговых цепях и разгрузочном канате при достижении заданной длины разгрузочного каната.

4. Цикл 3 (внутренний) по заданному углу наклона днища в цикле 2 поиск положения оси H (см. рис. 4) крепления тяговых цепей к тяговым канатам до достижения - расчетная длина разгрузочного каната должна была равна заданной.

Модель содержит выражения для определения координат точек ковша по углу наклона днища, длины разгрузочного каната по координатам оси H .

Исходными данными для модели кинематического анализа служат:

- конструктивные размеры ковша, задаваемые координатами точек ($A, R, C, D, E, H, T, K, M, W$ на рис. 4);

- размеры: подъемных ($L_{\text{п.ц}}$) и тяговых ($L_{\text{т.ц}}$) цепей, разгрузочного каната ($L_{\text{рк}}$), диаметр разгрузочного шкива ($d_{\text{рш}}$), длина тяги DE ;

- силовые параметры: усилия в подъемных ($F_{\text{пк}}$) и тяговых ($F_{\text{тк}}$) канатах, углы наклона подъемных ($\beta_{\text{п}}$) и тяговых ($\beta_{\text{т}}$) канатов при транспортировании ковша, сила тяжести груженого ковша ($G_{\text{кг}}$).

В математическую модель вошли также выражения, полученные по условиям силового равновесия, опрокидывающего и удерживающего моментов относительно оси крепления к ковшу подъемных цепей (т. B)

$$M_{\text{опр}} = G_{\text{кг}} \cdot L_{BA'} \quad (1)$$

$$M_{\text{уд}} = F_{\text{тц}} \cdot L_{BR'} + F_{\text{рк}} \cdot L_{BC'} \quad (2)$$

где $M_{\text{опр}}$, $M_{\text{уд}}$ – опрокидывающий и удерживающий моменты; $L_{BA'}$ -плечо действия силы тяжести груженого ковша $G_{\text{кг}}$ относительно оси B ; BR' , $L_{BR'}$; $L_{BC'}$ – плечи сил $F_{\text{тц}}$ и $F_{\text{рк}}$.

Выражения расчета усилий по условиям равновесия сил в узлах.

Сумма сил в узле H

$$F_T = F_{\text{тц}} \cos \tau_{RH} + F_{\text{рк}} \cos \tau_{HE} \quad (3)$$

Сумма сил в узле D

$$F_{\text{п}} = F_{\text{п.ц}} \cos \delta_{BD} + F_{DE} \cos \delta_{DE} \quad (4)$$

Сумма сил в узле E

$$F_{DE} = F_{\text{рк}} \cos \varepsilon_{EH} + F_{\text{рк}} \cos \varepsilon_{EC} \quad (5)$$

Таким образом, составлена система уравнений, включает неизвестные $F_{\text{тц}}$, $F_{\text{п.ц}}$, $F_{\text{рк}}$ – систему можно решить.

Математическая модель расчета объема горной массы в ковше приведена в диссертации, включает более сотни уравнений. Для проверки адекватности

модели построен чертеж в конструкторском пакете. Численные значения результатов расчета по модели совпадают с точностью замеров с данными чертежа, что подтвердило адекватность модели.

По разработанной модели проведены исследования влияния на угол наклона ковша и объем породы в ковше: длины разгрузочного каната (рис. 5), центра тяжести ковша (рис. 6), положения ковша в различных точках рабочей зоны (рис. 7).

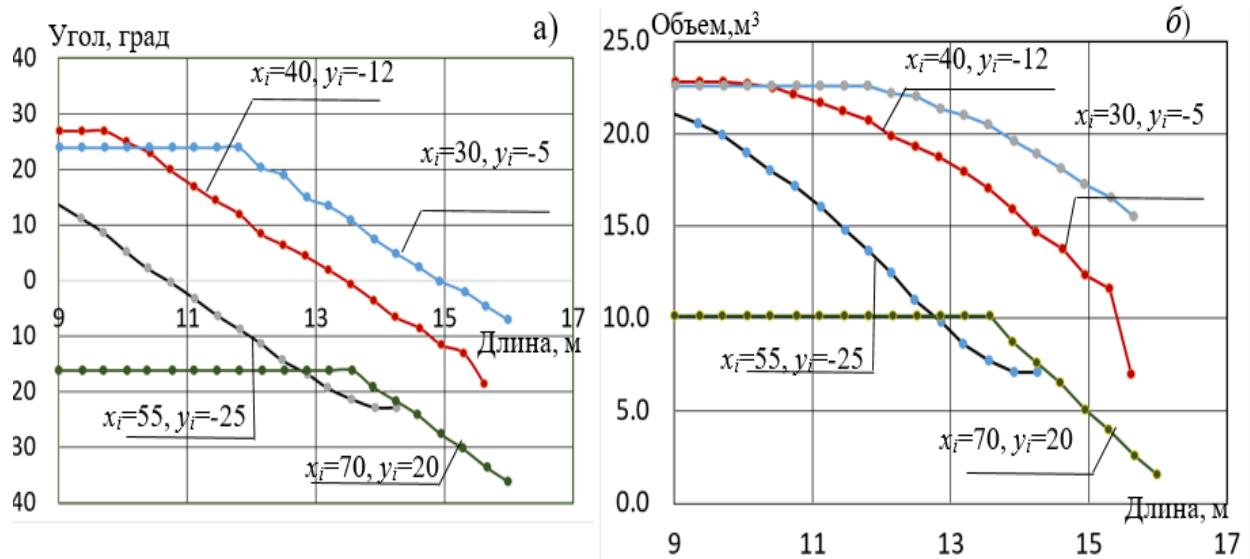


Рисунок 5 - Влияние длины разгрузочного каната на угол наклона ковша (а) и объем породы (б)

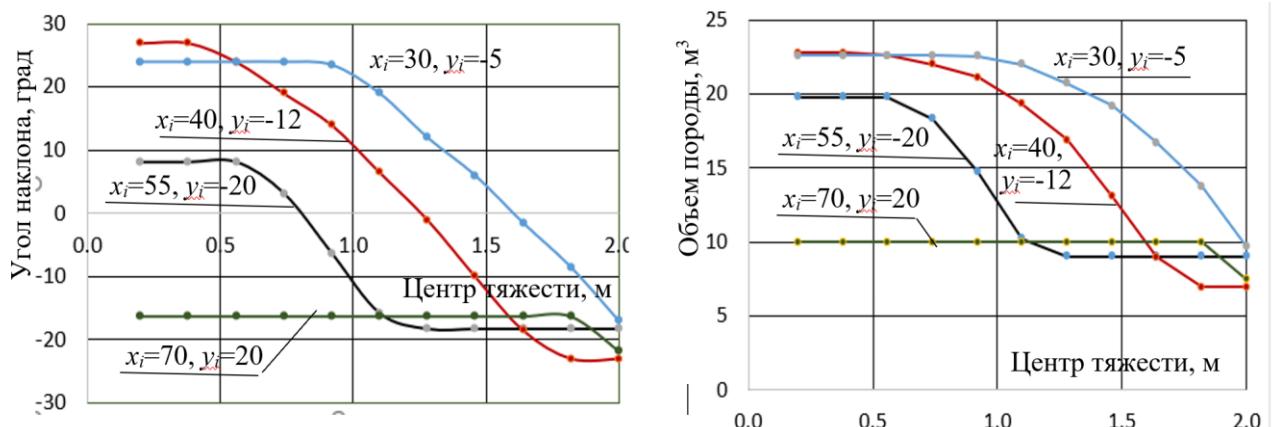


Рисунок 6 - Влияние положения центра тяжести ковша относительно крепления подъемных цепей при длине каната 12,5 м

Исследовано также влияние на объем просыпанной породы характеристики горной массы (угла естественного откоса), длины разгрузочного каната, координат завершения копания и начала разгрузки (рис. 8, 9).

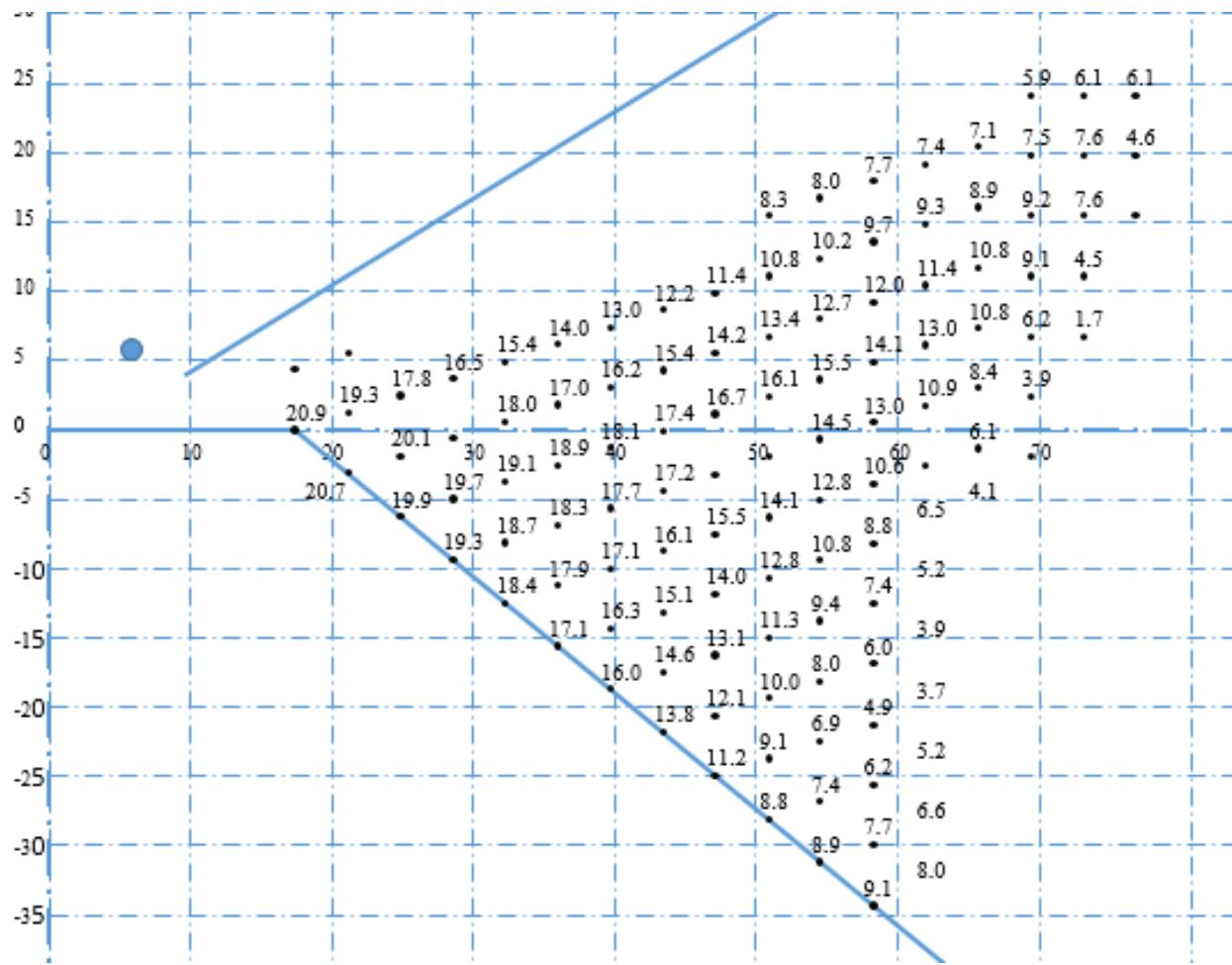


Рисунок 7 - Объема породы в ковше в пределах зоны транспортирования
(длина разгрузочного каната 12,5 м, $X_{\text{цт}}=1,1$ м, угол откоса породы в ковше 35° ,
относительная высота «шапки» 0,1)

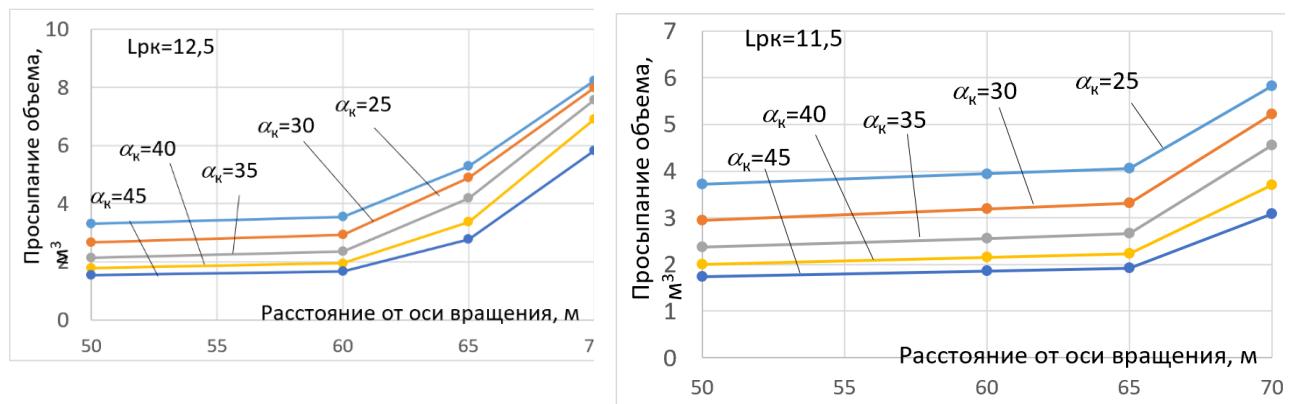


Рисунок 8 - Зависимость объема просыпанной породы в зависимости от точки
начала разгрузки, длины разгрузочного каната L_{pk} и угла откоса горной массы в
ковше α_k

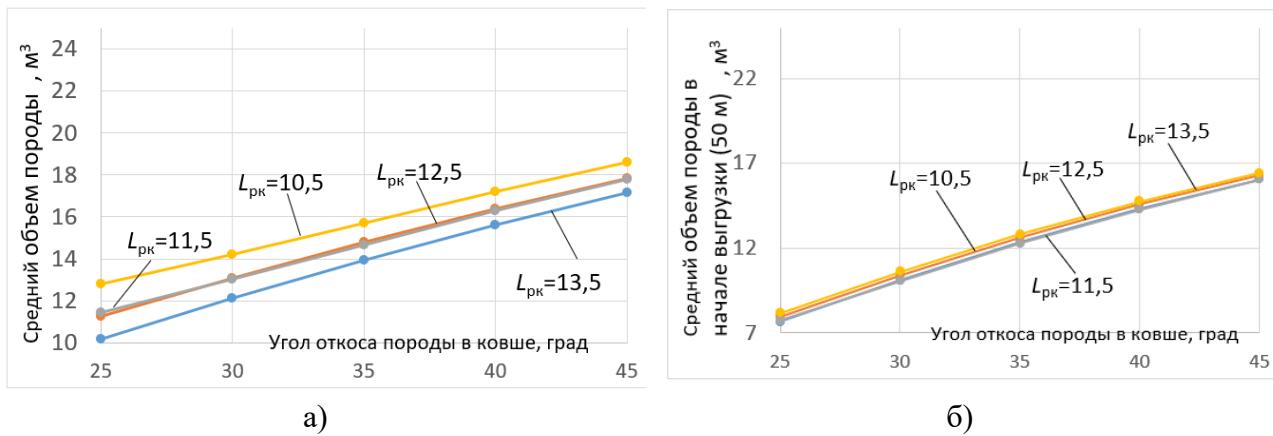


Рисунок 9 - Средний объем породы при отрыве ковша (а) и в точке начала разгрузки 50 м (б) в зависимости от длины разгрузочного каната и угла откоса горной массы в ковше

1. Результаты исследований показали влияние на объем горной массы в ковше, доставляемый к месту выгрузки, параметров забоя, характеристики транспортируемой горной массы, длины разгрузочного каната, положение осей крепления подъемных и тяговых цепей к ковшу, положения ковша при отрыве после копания из забоя и в зоне начала разгрузки.

2. Длина разгрузочного каната, положение осей крепления тяговых и подъемных цепей, их размеры влияют на производительность экскаватора, существуют значения, при которых будет наименьший объем просыпанной обратно в забой породы при транспортировании ковша в зону выгрузки, что обеспечит повышение производительности.

3. Траектория движения ковша к месту выгрузки должна определяться по наименьшему объему просыпаемой обратно в забой породы.

4. Для выбора положения ковша при выполнении условия снижения просыпания породы обратно в забой необходимо выполнять проверку по обеспечению перемещения ковша для полной разгрузки за оставшееся время поворотного движения.

5. При работе в конкретных технологических условиях эксплуатации с параметрами забоя и отвала необходимо определять рациональную длину разгрузочного каната и координаты зоны начала разгрузки.

6. Важным параметром, влияющим на объем просыпанной обратной в забой горной массы, является точка начала разгрузки – чем ближе эта точка к бровке забоя, тем меньше потери, но при задании точки начала разгрузки требуется проводить дополнительные расчеты по проверке: успеют ли лебедки переместить ковш из этой точки в зону саморазгрузки за оставшееся время поворота платформы на угол зоны разгрузки.

Четвертая глава посвящена описанию методики расчета параметров с использованием модуля *APM WinStructure3D*, а также приведены результаты исследований по поиску рациональных параметров стрелы драглайна.

Критерием оптимальности (рациональности) принята масса конструкции стрелы. Ограничениями служат условия прочности и устойчивости элементов стрелы. Переменными оптимизации являются конструктивная схема и геометрические размеры, сечений элементов стрелы. Идея поиска рационального исполнения и параметров стрелы заключается в исключении «излишних» запасов прочности и в то же время обеспечение требуемой прочности, устойчивости и надежности.

Для поиска решения в задачах оптимизации используется целевая функция, результаты расчета которой сравниваются, и выбирается «наилучшее», обеспечивающее наименьшее значение критерия при обеспечении задаваемых ограничений. В нашей задаче необходимо сравнивать расчетное напряжение с допустимым для проверки условием прочности.

Учитывая сложность конструкции стрелы, расчет напряжений выполнен в Российской компьютерной системе *APM WinMachine* в модуле *APM WinStructure3D*. Система разработана НПЦ АПМ (г. Королев) имеет аттестационный паспорт программного средства, выданный РОСТЕХНАДЗОР, ФБУ «НТЦ ЯРБ», предназначена для комплексного анализа трехмерных конструкций, состоящих из стержневых, пластинчатых и объемных элементов и любых их комбинаций.

Модуль позволяет определять напряжения и перемещения в элементах стрелы, проводить расчеты на устойчивость и усталость. Выполнив расчет и последующий анализ, можно принять решение по изменению и доработке проектируемой стрелы.

При расчетах в *APM WinStructure3D* используются модели: конструкции, защемлений, нагружения, материалов.

Для стрел драглайнов предложена **модель конструкции** двух типов. При расчетах на первом этапе выполняют выбор сечений и размеров элементов, которые реализуют схему стрелы. Модель конструкции для такого расчета представляет собой стержневую систему.

Для проектирования пяты и головы стрелы используем модель из объемных элементов. Расчеты на этом этапе проводят по усилиям, определенным на первом этапе для стержневой конструкции.

Достоинство стержневой системы заключается в возможности простого изменения сечений входящих в конструкцию стержневых элементов и подбора таких значений, при которых масса конструкции будет наименьшей и обеспечит требуемую прочность и долговечность.

Модель нагружения включает все действующие на стрелу усилия. Уравнения для их расчета приведены во второй главе. На стрелу действуют усилия двух типов: сосредоточенные (усилия со стороны канатов, инерционные и центробежные силы головных блоков) и распределенные (ветровые, инерционные).

Инерционные и ветровые нагрузки прикладываются к стержневым элементам распределенными и сосредоточенными силами. В диссертационной работе даны рекомендации их задания.

Сформулированы задачи расчета стрел драглайнов и показана методика использования пакета *APM Structure3D* для:

- расчета напряженно-деформированного состояния;
- проверки несущей способности стержневых элементов по СНиП;
- расчета коэффициентов запаса и форм потери устойчивости.

Рассмотрен алгоритм использования модуля *APM Structure3D* при расчетах на прочность и устойчивость. Показано влияние геометрических характеристик сечений на прочность и устойчивость стрелы, рассмотрен выбор схемы модели конструкции. Для исследований составлена модель трехгранной стрелы драглайна ЭШ-20.90 (рис. 10).

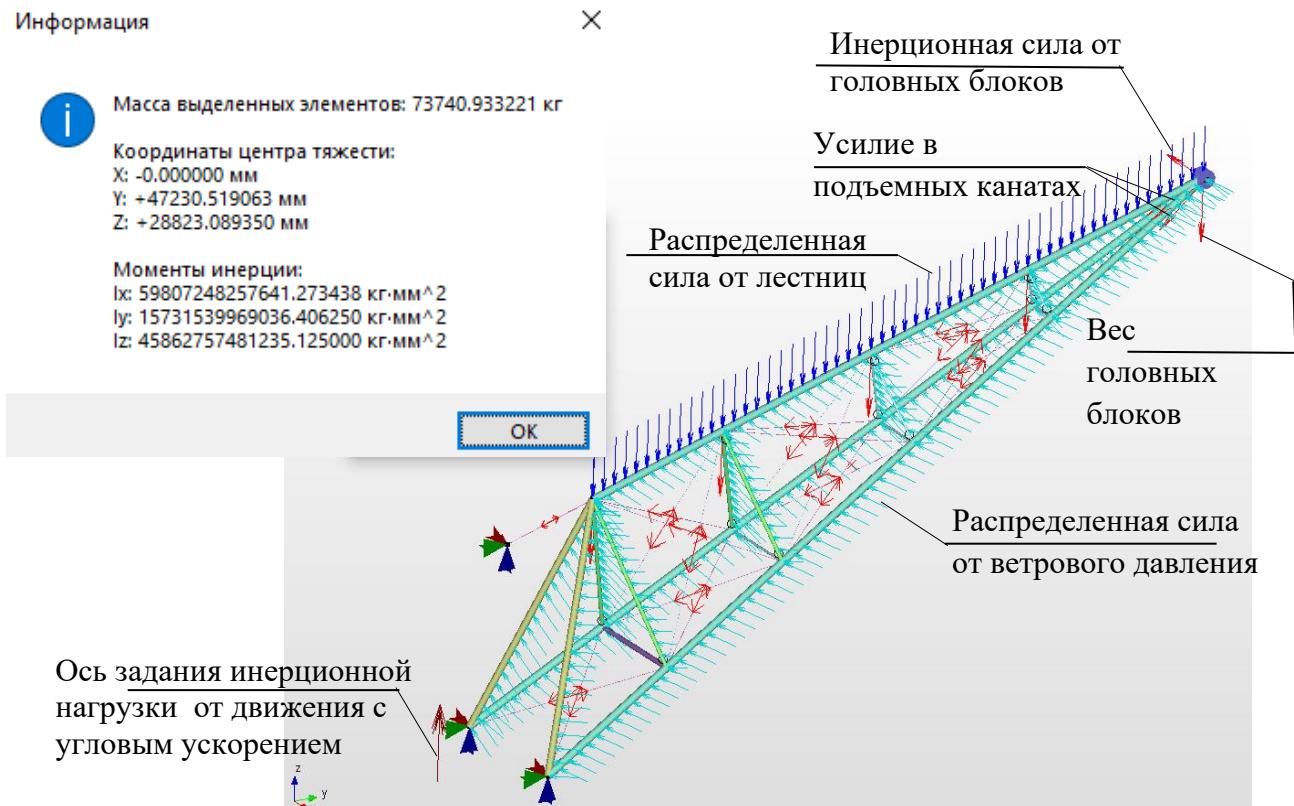


Рисунок 10- Стержневая модель стрелы

Анализируя конструкцию стрелы на прочность, выполнены расчеты при положении ковша в зоне растяжки максимально приближенным к пяте стрелы

(1 расчетное положение), а также в зоне растяжки при ковше вблизи головы стрелы (2 расчетное положение). В первом положении канаты максимально приближены к плоскости нижних поясов, инерционные и центробежные силы от ковша при повороте платформы с ускорением минимальны. Во втором расчетном положении на голову стрелы будет действовать наибольшие инерционные и центробежные от ковша.

Результаты расчета напряжений и усилий для 1 расчетного положения на рис. 11 и 12, для 2-го на рис. 13 и 14. Выполнена проверка на устойчивость, коэффициент устойчивости более 10.

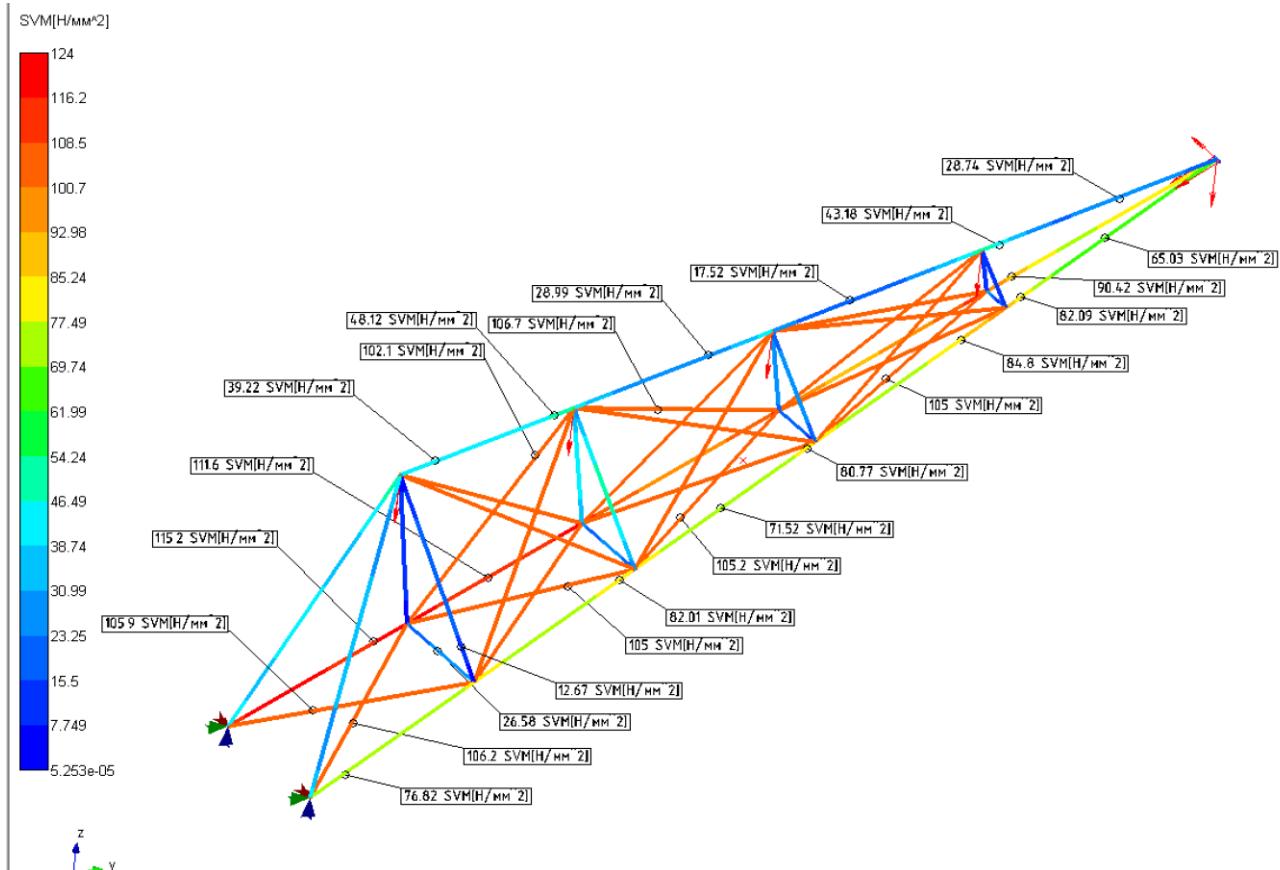


Рисунок 11 - Карта напряжений от усилий в канатах, собственного веса, ветровой и инерционной нагрузки
(относительная деформация вант 0.00025)

Таблица 1 – Усилия в канатах

Расчетное положение	Координаты ковша		Усилия в канатах, кН		Равнодействующая усилий в канатах подъема, кН	Угол наклона равнодействующей горизонту, град	Проекции равнодействующей, кН	
	x	z	подъема	тяги			на ось X	на ось Z
1	20,0	4,0	1250	1067,4	2492,6	30,6	2144,7	1270,2
2	74,3	32,7	1250	945,3	2417,1	40,9	1826,7	1583,0

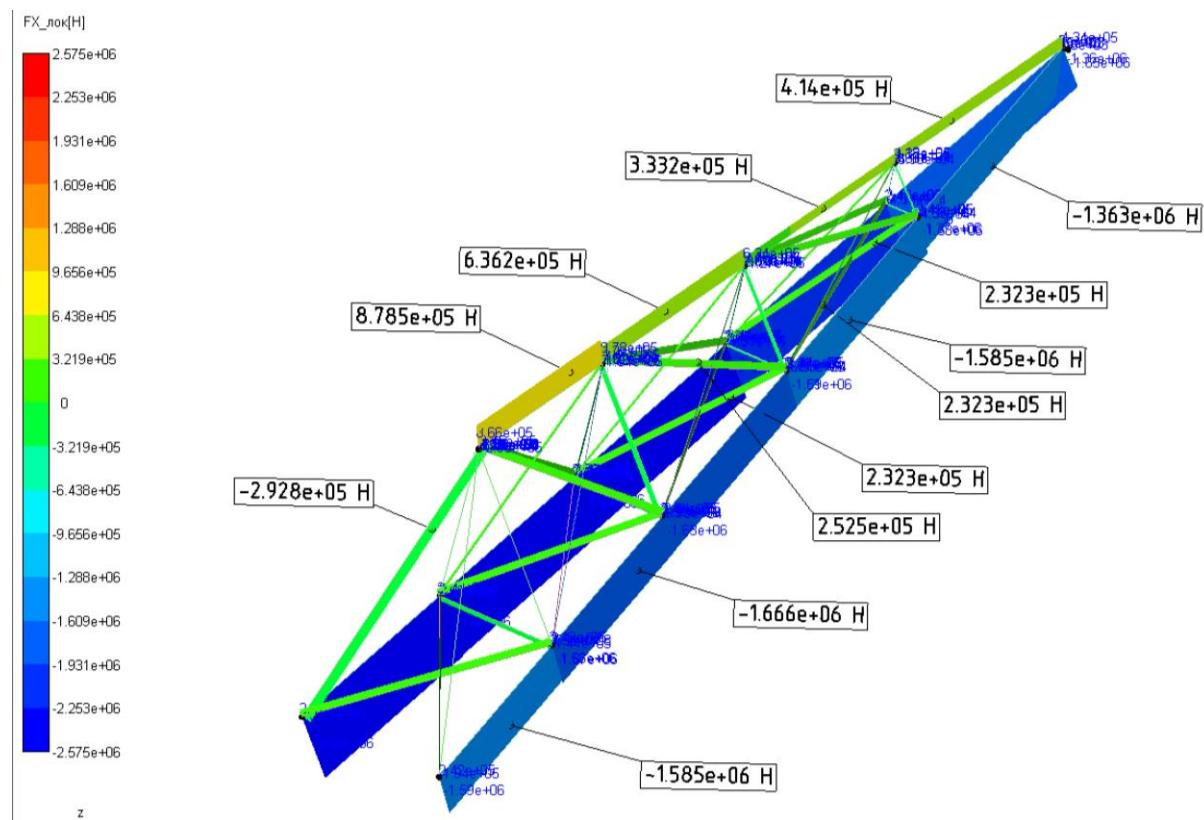


Рисунок 12 - Карта нагрузок в элементах от усилий в канатах, собственного веса, ветровой и инерционной нагрузки (относительная деформация вант 0,00025)

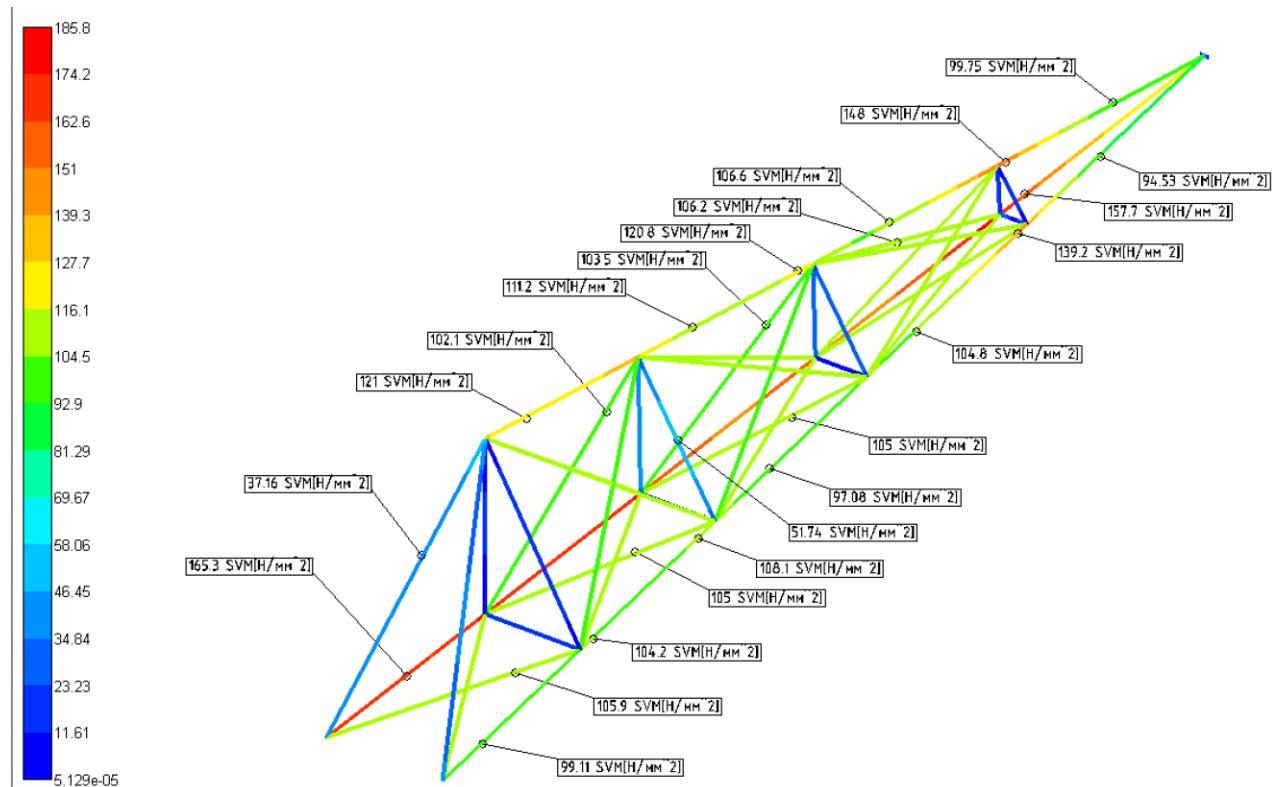


Рисунок 13 - Карта напряжений от усилий в канатах, собственного веса, ветровой и инерционной нагрузки (2-е расчетное положение ковша, относительная деформация вант 0,00025)

Выводы по исследованию НДС:

1. Верхний пояс даже при максимальном приближении ковша к стреле, когда равнодействующая проходит внутри между поясами, работает на растяжение (рис. 13), это объясняется действием собственного веса стрелы, поэтому ванты предварительного сжатия для исключения знакопеременной нагрузки могут быть исключены.

2. При исключении 4-х вант их конструкции верхнего пояса уменьшится масса стрелы на $\Delta m_c = 4 \cdot 17.148 \cdot 70 = 4800$ кг.

3. Пояса стрелы, особенно верхний, а также и раскосы, имеют большие запасы прочности, напряжение расчетное 148 МПа < 200 МПа, возможно снижение сечения поясов и раскосов.

Выполнены исследования при уменьшении сечения труб поясов (рис. 14) при использовании для верхнего пояса труб 820x6, вместо труб 820x9, также уменьшены сечения стоек.

Расчетное повышение производительности

Результатами исследований доказана возможность исключения вант верхнего пояса и уменьшение сечения труб некоторых элементов. Повышение производительности экскаватора может быть достигнуто двумя способами: за счет сокращения времени цикла и за счет увеличения вместимости ковша. Сокращение времени цикла будет достигнуто за счет уменьшения момента инерции поворотной части (снижение массы стрелы позволит уменьшить и массу противовеса), что при том же приводе порота, как у базовой модели, увеличится ускорение разгона и торможения, время цикла уменьшится. При втором способе противовес остается неизменным, как у базовой модели, поэтому для сохранения неизменным и опрокидывающего момента можно увеличить массу ковша за счет увеличения его объема.

Расчет выполнен для второго способа увеличения производительности при сравнении вариантов базовой модели стрелы ЭШ-20.90 и рациональной с уменьшенными сечениями и исключением вант верхнего пояса.

Масса модели базовой $m_b = 75238$ кг, координаты центра масс $x_b = 49$ м, $z_b = 30,2$ м, масса модели, модернизированной $m_h = 65862$ кг, координаты центра масс $x_h = 48,4$ м, $z_h = 29$ м.

Опрокидывающий момент от силы тяжести стрелы базовой

$$M_b = g \cdot m_b \cdot x_b = 9,81 \cdot 75,238 \cdot 49 = 36 \ 166 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_h = g \cdot m_h \cdot x_h = 9,81 \cdot 65,862 \cdot 48,4 = 31 \ 271 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Уменьшение опрокидывающего момента

$$\Delta M = M_b - M_h = 4895 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Сила тяжести груженого ковша базового $G_{kb} = 647,5$ кН.

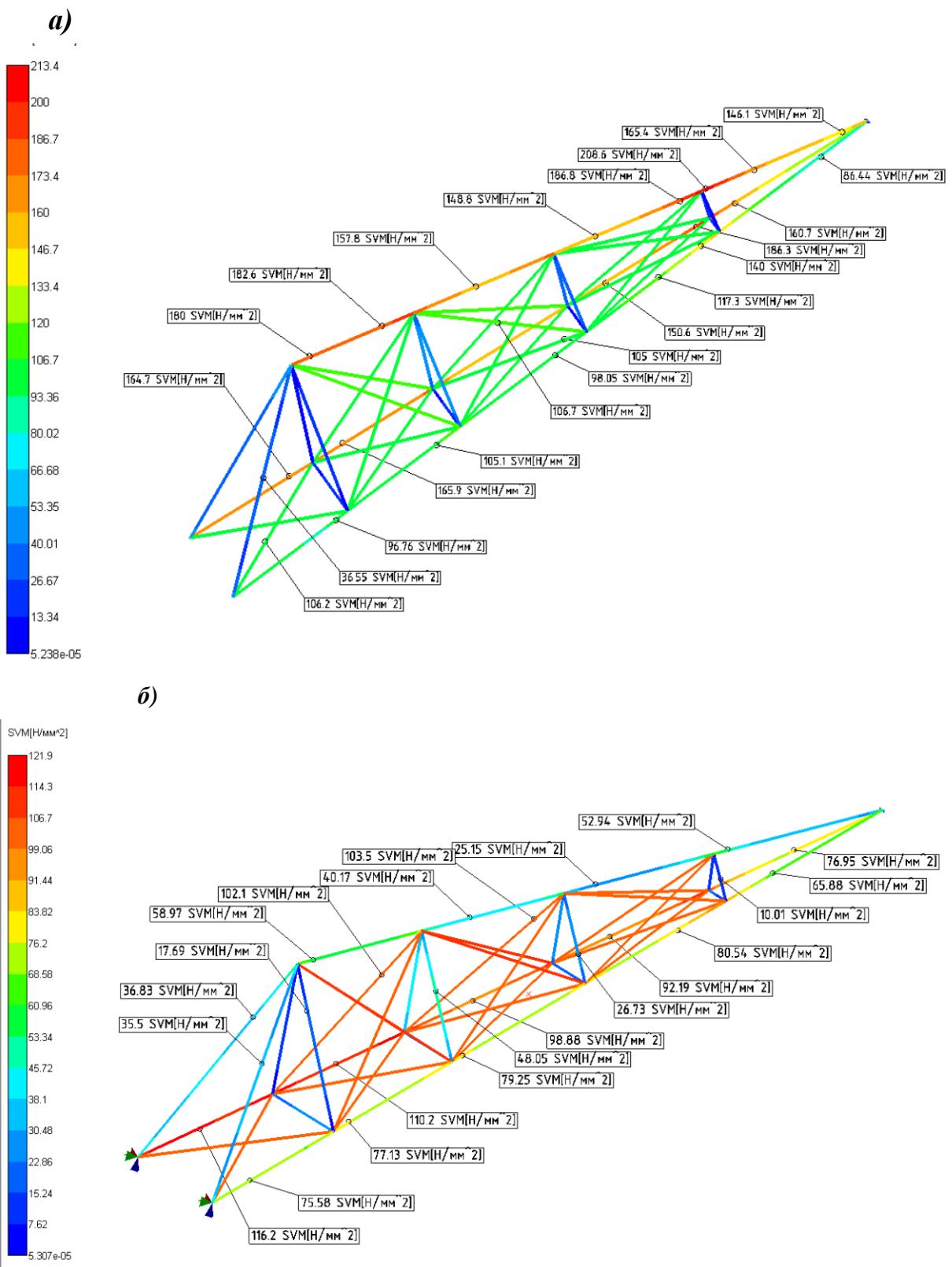


Рисунок 14 - Карта напряжений при действии собственного веса, стопорного усилия в подъемных канатах, ветровой нагрузки и нагрузки от поворотного движения (а – вариант нагружения 1, б – вариант нагружения 2)

Положение груженого ковша относительно пяты стрелы $x_k=76,3$ м.

Возможное увеличение массы груженого ковша

$$\Delta m_k = \Delta M / x_k / 9,81 = 4895 / 76,3 / 9,81 = 6,4 \text{ t}$$

Полученная масса делится на увеличение массы порожнего ковша, которая примерно 0,4 массы груженого ковша и массу породы. Исходя из этого возможное увеличение горной массы в ковше $0,6*6,4=3,84$ т

При плотности породы 2 т/м³ объем ковша может быть увеличен на 1,92 м³ или относительное увеличение объема

$$\Delta m_{\text{к.отн}} = (20+1,92)/20 = 1,09$$

При неизменном времени цикла за счет увеличения вместимости ковша производительность экскаватора может быть увеличена соответственно также примерно на 9 %.

Таким образом, применения труб 820×6 для верхнего пояса стрелы и исключения вантовых раскосов в рациональной конструкции обеспечит уменьшение массы на 7880 кг и увеличение производительности на 9 %, условие прочности обеспечивается, напряжение в элементах верхнего пояса не более 160 МПа, что ниже допустимого напряжения (200 МПа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических исследований изложены новые научно обоснованные технические решения актуальной научно-практической задачи повышения эффективности работы экскаваторов-драглайнов за счет совершенствования рабочего оборудования, имеющие существенное значение для горнодобывающей отрасли России.

В диссертации решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности работы экскаваторов-драглайнов за счет применения ковша с рациональными параметрами подвески ковша, движения на разгрузку по рациональной траектории, снижения массы и повышения надежности стрел на основе исследования их напряженно-деформированного состояния.

Основные выводы, научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлена зависимость потерь горной массы при транспортировании ковша экскаватора-драглайна от параметров подвески (упряжи) ковша и траектории движения ковша в зону разгрузки;

2. Определены рациональные параметры стрелы экскаватора-драглайна по критерию массы и ограничению обеспечения прочности.

3. Составлена методика расчета усилий в подъемных канатах и тяговых канатах, углов их наклона с учетом провисания, разработаны алгоритм и программа для ЭВМ.

4. Разработана методика определения рациональных параметров

упряжи ковша по критерию уменьшения просыпания породы обратно в забой при транспортировании ковша в отвал, включающая математические модели кинематического и силового анализа, реализованные по составленному алгоритму в виде компьютерной программы.

5. Результатами исследований доказано влияние на объем горной массы в ковше, доставляемой к месту выгрузки, параметров забоя, характеристики транспортируемой горной массы, размеров подъемных и тяговых цепей разгрузочного каната, положения осей крепления подъемных и тяговых цепей, разгрузочного каната к ковшу, положения ковша при отрыве после копания из забоя и в зоне начала разгрузки.

6. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025692750 от 24.11.2025. Определение параметров подвески ковша экскаватора-драглайна: заявка № 2025691637 от 11.11.2025 / Брозовский С.Ю., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

7. Разработана методика определения рационального конструктивного исполнения и параметров стрелы по критерию массы и ограничениям по прочности и устойчивости на основе применения программных продуктов по исследованию напряженно-деформированного состояния конструкций.

8. Результатами исследований для базовой модели экскаватора ЭШ-20.90 доказано, что верхний пояс трехгранной стрелы драглайна работает только на растяжение, знакопеременных усилий не выявлено, поэтому не требуется устанавливать для верхнего пояса ванты с предварительным натяжением, конструкция стрелы упростится, снижается также затраты на обслуживание.

9. Расчетами доказана, наряду с исключением вант предварительного сжатия верхнего пояса, возможность уменьшения толщины труб верхнего пояса с 9 до 6 мм и за счет этого снижения массы стрелы на 7,88 т при сохранении требуемой прочности.

10. За счет снижения массы стрелы можно увеличить объем ковша по условию сохранения опрокидывающего момента поворотной части экскаватора относительно роликового круга, расчетное увеличение производительности на 9 % по сравнению с базовой моделью.

11. Получен Акт внедрения диссертационной работы С.Ю. Брозовского от 02.10.2025, в соответствии с которым ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы 1 500 000 руб.

**Основные положения диссертационной работы
изложены в следующих публикациях:**

Публикации в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. **Брзозовский С.Ю.**, Франц Т.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Анализ нагруженности стрелы экскаватора драглайна // Горное оборудование и электромеханика. № 1, 2024. С. 11-17. (doi: 10.26730/1816-4528-2024-1-11-17).
2. **Брзозовский С.Ю.**, Шестаков В.С., Адамков А.В., Буялич К.Г. Разработка методики определения параметров подвески ковша экскаватора драглайна // Горное оборудование и электромеханика. № 6, 2024. С. 26-32. (doi: 10.26730/1816-4528-2024-6-26-32).
3. **Брзозовский С.Ю.**, Шестаков В.С. Обоснование рациональных параметров упряжи ковша экскаватора-драглайна // Горное оборудование и электромеханика. № 6 (170), 2025. С. 5-12. (doi: 10.26730/1816-4528-2023-6-5-12).

Публикации, индексируемые в международной базе Scopus/ Web of Science:

4. Шестаков В.С., **Брзозовский С.Ю.**, Давыдов П.В. Исследования нагруженности стрелы экскаватора-драглайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. Научно-технический журнал. №1-1, 2024. С 167-178. (doi: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_167).

Публикации в прочих научных изданиях:

5. **Брзозовский С.Ю.**, Шестаков В.С. Расчет усилий в канатах драглайна при входе ковша в зону растяжки. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В.Р. Кубачека. Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург, 2023. С. 237-240.

6. **Брзозовский С.Ю.**, Шестаков В.С. Оптимизация стрелы драглайна // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В.Р. Кубачека. Сборник трудов XXII Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург, 2024. С. 268-271.

7. **Брзозовский С.Ю.** Исследования напряженно-деформированного состояния стрелы драглайна / С.Ю. Брзозовский, В.С. Шестаков, А.П. Комиссаров // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 95-летнему юбилею кафедры подъемно-транспортных машин и

роботов, Екатеринбург, 13 декабря 2024 года. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2025. – С. 152-156. – EDN JRHCLD.

8. **Брозовский С.Ю.**, Шестаков В.С. Влияние подвески на положение ковша драглайна // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Чтения памяти В.Р. Кубачека. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. Екатеринбург, 2025. С. 292-295.

9. Шестаков В.С. Исследования влияния параметров подвески ковша экскаватора-драглайна / В.С. Шестаков, А.П. Комиссаров, **С.Ю. Брозовский** // Машиностроение и техносфера XXI века : Сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции, Севастополь, 15 – 21 сентября 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 449-452. – EDN TJCEFM.

Свидетельство о государственной регистрации:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025692750 от 24.11.2025. Определение параметров подвески ковша экскаватора-драглайна: заявка №2025691637 от 11.11.2025 / **Брозовский С.Ю.**, Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

Подписано в печать 04.02.2026 г. Печать на ризографе.
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники издательства УГГУ.