

На правах рукописи



**БЕЗКОРОВАЙНЫЙ ПАВЕЛ ГЕННАДЬЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЯМАЯ ЛОПАТА  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА**

**Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Екатеринбург – 2024**

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

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

Официальные оппоненты:

**Хорешок Алексей Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева»

**Шибанов Даниил Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится «10» апреля 2025 г. в 13-30 часов 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/bezkorovainyi-pavel-gennadevic>

Автореферат разослан «30» января 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



А. Е. Пелевин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Мировая практика развития горного оборудования для открытых горных работ доказала целесообразность дальнейшего увеличения выпуска карьерных гидравлических экскаваторов.

Гидравлические экскаваторы равной вместимости ковша по сравнению с канатными обладают рядом преимуществ: меньшей в 1,8...2,2 раза металлоемкостью, большими в 1,3...1,5 раза усилиями копания. В силу своих кинематических особенностей они обеспечивают возможность селективной добычи полезных ископаемых, зачистку подошвы уступа, уменьшение динамических воздействий при разгрузке горной массы в транспортные средства, в некоторых случаях позволяют повысить производительность труда на открытых горных работах.

Совместное применение гидравлических экскаваторов с рабочими оборудованьями «прямая» и «обратная лопата» позволяет повысить высоту уступа, что приведет к увеличению угла откоса борта карьера, и тем самым снизить объем вскрышных пород. Таким образом, гидравлические экскаваторы позволяют решить задачи по снижению металлоемкости горных машин, повышению производительности труда. Учитывая большое количество работающих гидравлических экскаваторов и большой объем перерабатываемой ими горной массы все исследования, направленные на снижение металлоемкости, энергопотребления на совершение рабочих операций, на повышение их производительности являются весьма актуальными.

Тема исследования соответствует направлениям исследований, указанных в паспорте научной специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины», а именно: 14. Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования 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. Виноцкий, Д. П. Волков, П. А. Зыков, Л. И. Кантович, Г. Ю. Козин, А. П. Комиссаров, А. В. Королев, В. Р. Кубачек, О.А. Лукашук, Н. Н. Мельников, В. Г. Мерзляков, П.А. Побегайло, Р. Ю. Подэрни, М. Г. Рахутин, В. И. Русихин, А. В. Самолазов, Б. И. Сатовский, Л. С. Скобелев, Б. В. Слесарев, А.А. Хорешок, Д.А. Шибанов, В. М. Штейнцайг, Р. М. Штейнцайг, а так же ряд зарубежных ученых: Булес П., Висбек З., Вэблер Д., Frimpong S., Hall A., Кельш Х. Р., Le Q. H., Liu J., Rath H., Stefanov Gose.

Анализ публикаций по открытым источникам показал, что фирмы-производители экскаваторов не публикуют методики расчета параметров рабочего оборудования. Методики приходится рассматривать по косвенным

показателям. Имеются публикации по методикам определения рабочей зоны и линейных размеров рабочего оборудования экскаваторов Подэрни Р.Ю., Крикун В.Я., Манасян В.Г., Мельников Н.Н., Неволин Д.Г., А.В. Раннев. В указанных методиках определение рабочей зоны выполняется только по линейным размерам, без учета возможности выполнять копание с учетом реализуемых гидроцилиндрами усилий и устойчивости экскаватора.

**Объектом исследования** являются гидравлические экскаваторы с рабочим оборудованием прямая лопата.

**Предметом исследования** являются методики кинематического и силового анализа рабочего процесса, поиска рациональных параметров.

**Основная идея работы** состоит в разработке нового варианта конструктивной схемы рабочего оборудования, в котором исключены гидроцилиндры поворота стрелы с заменой их на напорный механизм, и придания параметрам стрелы и рукояти рациональных значений, исключающих «излишние запасы прочности».

**Целью работы** является обоснование рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора за счет совершенствования конструкции.

**Задачи работы:**

1. Совершенствование конструкции рабочего оборудования типа «прямая лопата» гидравлического экскаватора;
2. Создание методики определения рациональных параметров рабочего оборудования, основанной на математической модели кинематического и силового анализа;
3. Исследование влияния конструктивных параметров рабочего оборудования на напряженно-деформированное состояние его элементов (рукояти и стрелы).

**Научная новизна полученных результатов заключается:**

- в разработке математической модели определения возможных усилий копания с учетом ограничений по максимальным усилиям на штоках гидроцилиндров и устойчивости экскаватора;
- в разработке математической модели определения границ рабочей зоны;
- в обосновании рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора.

**Теоретическая значимость работы** состоит:

- в разработке новой методики определения возможных усилий копания с учетом ограничений по максимальным усилиям на штоках гидроцилиндров и устойчивости экскаватора;
- в разработке нового подхода к определению рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора, основанного на использовании расчетных модулей анализа напряженно-деформированного состояния.

**Практическая значимость работы** состоит:

- в разработке нового конструктивного решения рабочего оборудования гидравлического экскаватора с напорной балкой;
- в разработке имитационной модели функционирования рабочего оборудования гидравлического экскаватора, которая позволяет определять усилия копания в границах рабочей зоны;
- в разработке методики определения рациональных параметров рабочего оборудования, которая позволит снизить массу металлоконструкций рабочего оборудования и, как следствие, снизить массу и стоимость всего экскаватора, повысить производительность.

**Методология и методы 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. Максимальное усилие на зубьях ковша гидравлического экскаватора определяется с учетом всех предельных усилий на штоках гидроцилиндров рабочего оборудования и устойчивости экскаватора.

2. Конструкция рабочего оборудования гидравлического экскаватора при исключении гидроцилиндров поворота стрелы и использовании механизма с напорной балкой обеспечивает снижение массы стрелы и рукояти, за счет чего возможно увеличение вместимости ковша и, как следствие повышение производительности экскаватора.

3. Исследования напряженно-деформированного состояния элементов рабочего оборудования позволяют выявить закономерности определения рациональных параметров.

**Степень достоверности положений, выводов и результатов исследования** подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, проверкой математических моделей на компьютерном программном обеспечении, расхождение между которыми не превышает 10 %.

**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, 2020-2024), международном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2023), международной научно-практической конференции «Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства» (г. Караганда, 2023-2024).

**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 рабочего оборудования гидравлического экскаватора; в разработке рекомендаций по определению степени совершенства конструктивных схем механизмов рабочего оборудования за счет оценки режимов работы гидравлического экскаватора; в разработке методики поиска рациональных параметров рабочего оборудования с использованием моделирования напряженно-деформированного состояния основных механизмов рабочего оборудования гидравлического экскаватора.

#### **Реализация результатов работы:**

- получен патент на изобретение рабочего оборудования экскаватора, выполненного с напорной балкой, установленной посредством седлового подшипника на двуногой стойке и шарнирно соединенной с верхней частью стрелы, решающее задачи снижения массы стрелы и уменьшения продолжительности рабочего цикла гидравлического экскаватора (представлен Патент № 2772037 С1 Российская Федерация, МПК E02F 3/30. Рабочее оборудование экскаватора: № 2021122144 от 16.05.2022);

- полученные результаты работы обсуждены и рекомендованы к внедрению и использованию при проведении научно-исследовательских и опытно-промышленных работ ТОО «KazTechPro» (представлен «Акт внедрения», от 26.12.2023); рассмотрены техническим советом и рекомендованы к использованию в производственном процессе технического обслуживания и ремонта технологического оборудования предприятия КФ ТОО «HANZA-FLEX Гидравлик Алматы» (представлен «Акт об апробации результатов, полученных в ходе выполнения диссертации», от 08.01.24); приняты к внедрению в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» для использования в лекционных и практических занятиях базовых и профилирующих дисциплин образовательных программ бакалавриата и магистратуры (представлен «Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс», от 24.04.2024).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных статей, в том числе 5 – в рецензируемых научных изданиях ВАК, 4 – в рецензируемых научных изданиях Scopus / Web of Science, получен 1 патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Материал диссертации изложен на 140 страницах машинописного текста, в том числе содержит 13 таблиц, 52 рисунка, библиографический список из 95 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, поставлены их 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** выполнен обзор конструкций, методик расчета, обоснована актуальность исследования, проведен анализ результатов выполненных работ по теме диссертации, приведены основные направления совершенствования, сформулированы цель и задачи исследования.

Рабочее оборудование гидравлического экскаватора существенно отличается от канатного экскаватора типа «прямая лопата» как по линейным размерам, так и по конструктивному исполнению. Благодаря значительно

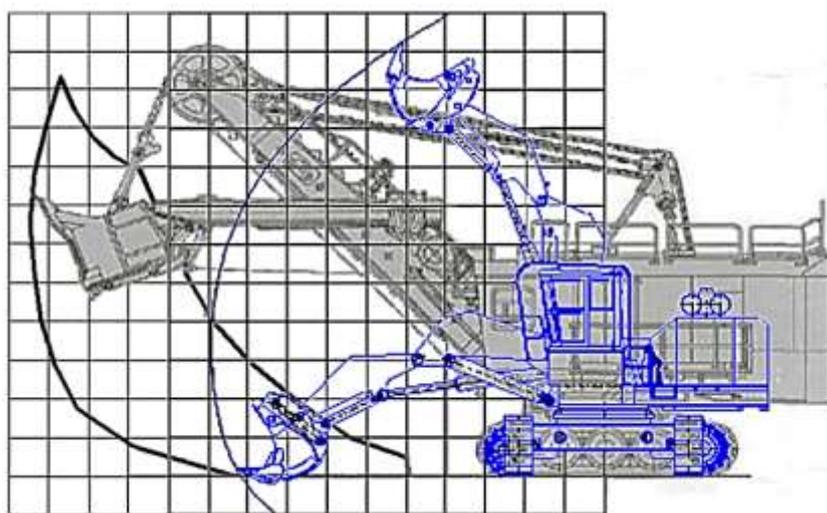


Рисунок 1– Сравнение рабочих зон экскаваторов ЭКГ-5 и ЭГ-110

меньшим габаритным размерам и массе машины обеспечиваются меньшие давления на подошве забоя и большая скорость передвижения экскаватора. Также возможно работать на площадках с уклоном до  $10\text{—}12^\circ$ , что недопустимо для тяжелых мехлопат. На рисунке 1 приведено сравнение рабочих зон и габаритных размеров

канатного ЭКГ-5 массой 200 т и гидравлического экскаватора ЭГ-110 массой 110 т примерно равных вместимостей ковшей ( $5\text{ м}^3$  и  $5,5\text{ м}^3$ ). Экскаватор ЭГ-110 при массе практически в два раза меньшей, чем ЭКГ-5 обеспечивает несколько большую по высоте рабочую зону, меньшая же по ширине рабочая зона не является недостатком, так как высокая маневренность экскаватора обеспечивает быстрое перемещение в точку копания.

При выполнении диссертационного исследования рассмотрен опыт эксплуатации нескольких моделей гидравлических экскаваторов на карьерах и строительных площадках Республики Казахстан. При эксплуатации в течение 4-х лет экскаваторов производства фирмы Hitachi EX1200 (вместимость ковша  $6\text{ м}^3$ ) и Komatsu PC 750-7 (вместимость ковша  $5,3\text{ м}^3$ ) выявлены трещины в стреле и рукояти (рисунок 2 а,б,в). Анализ показал, что у некоторых моделей фирм Hitachi, Komatsu появляются трещины еще до достижения заявленного паспортного ресурса долговечности.



Рисунок 2 – Трещины в рабочем оборудовании гидравлических экскаваторов:  
 (а) рукояти Hitachi EX1200, (б) стрелы Komatsu PC 750-7,  
 (в) рукояти Komatsu PC 750-7

Учитывая вышеизложенные факты, в качестве прототипа для проведения исследований был выбран карьерный гидравлический экскаватор ИЗ-Картэкс ЭГ-110 (емкость ковша 5,5 м<sup>3</sup>). Выбор этого экскаватора обосновывается наличием полной конструкторско-технологической документации (включая чертежи рабочего оборудования), доступностью большого объема данных по опыту эксплуатации такого экскаватора.

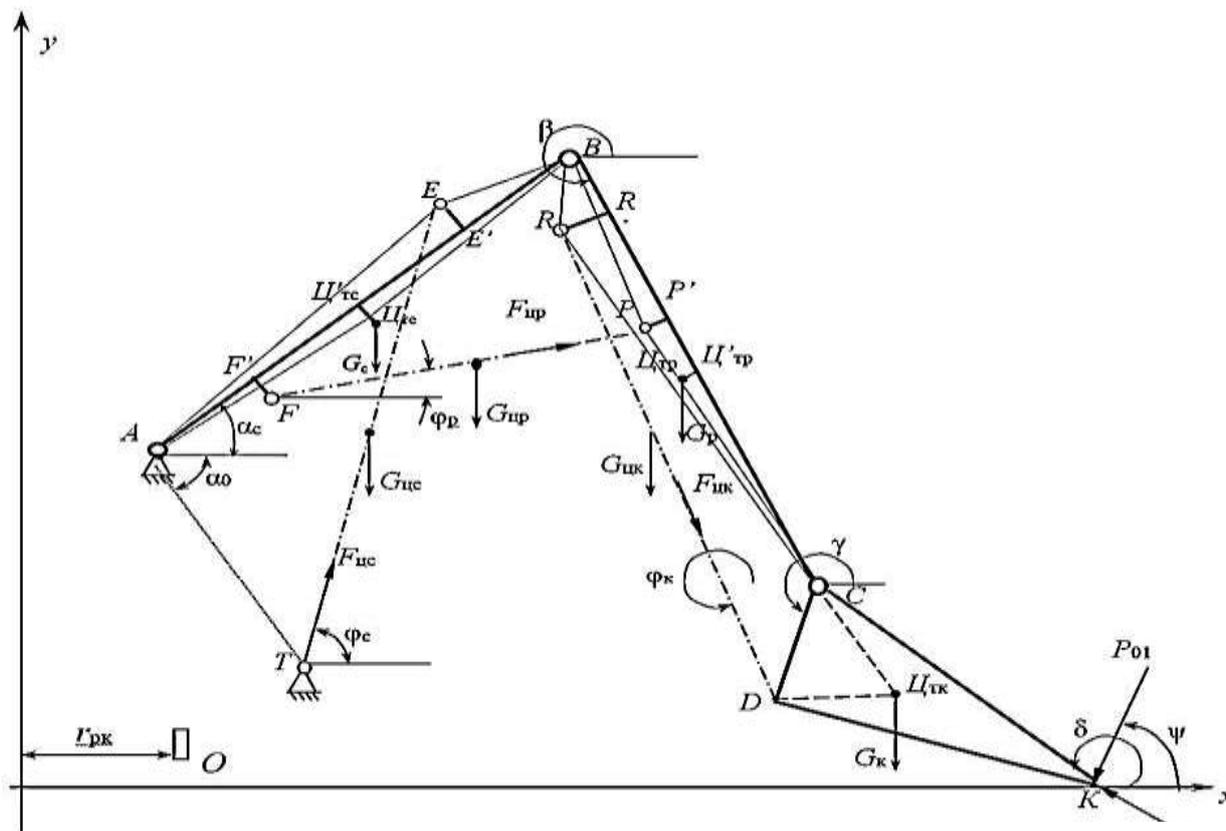
У экскаватора ЭГ-110 фирмы ОАО Ижорские заводы дефектов рабочего оборудования не выявлено.

Анализ дефектов рабочего оборудования, приведенных на рисунке 2, позволил сформулировать задачи исследования.

**Во второй главе** описаны особенности процесса экскавации, выполнены кинематический и силовой анализы механизмов гидравлического экскаватора, разработана математическая модель определения координат элементов рабочего оборудования при выдвижении штоков гидроцилиндров, проведена проверка адекватности моделей кинематического и силового анализа, получены выражения для определения усилий на штоках гидроцилиндров стрелы, рукояти и ковша.

Для моделирования рабочего процесса за прототип выбран экскаватор ЭГ-110. Схема к расчету координат представлена на рисунке 3, где ось «Х» – это площадка по уровню стояния, а «У» – это ось экскаватора. Модель кинематического анализа включает выражения расчета координат точек и углов наклона элементов рабочего оборудования, составленных начиная со стрелы, затем, используя полученные координаты шарнира стрела-рукоять

(т. В) выведены координаты точек рукояти, а по координатам рукояти – для ковша. Исходными данными для составления выражений служат координаты точек расчетной схемы и размеры гидроцилиндров стрелы (TE), рукояти (FP) и ковша (RD) в текущем положении (рисунок 3).



A, T, E, F, P, R, B, C, D – шарниры; K – вершина зуба ковша; KCD – схема профиля ковша; CB – рукоять; AB – стрела; TE, FP, RD – гидроцилиндры поворота стрелы, рукояти и ковша;  $G_c, G_r, G_k, G_{tc}, G_{tr}, G_{tk}$  – силы тяжести стрелы, рукояти, ковша, гидроцилиндров стрелы, рукояти, ковша;  $\Pi_{tc}, \Pi_{tr}, \Pi_{tk}$  – центр тяжести стрелы, рукояти и ковша;  $\alpha_c, \beta, \gamma$  – углы наклона к горизонтали стрелы, рукояти, ковша;  $r_{pk}$  – радиус роликового круга

Рисунок 3– Схема к расчету параметров

Изменение размеров гидроцилиндров от минимального до максимального значений позволило получить имитационную модель работы рабочего оборудования. Для доказательства адекватности модели выполнено построение схемы модели в конструкторском пакете Компас 2D в масштабе.

В работе приведены результаты расчета по программе, составленной по приведенным выражениям и замерам на чертеже. Проведенными замерами на фрагменте доказана адекватность математической модели определения координат элементов рабочего оборудования при выдвигании штоков гидроцилиндров – погрешность в пределах точности замеров по чертежу.

Модель может быть использована для решения нескольких задач:

- Формирование закона управления приводами стрелы, рукояти и ковша при движении по требуемым траекториям;
- Для расчета максимальных усилий копания.

В первой задаче был разработан алгоритм изменения подачи насосов, для того чтобы ковш обеспечивал движение по наклонной и горизонтальным траекториям. Такие варианты работы необходимы, например, для

формирования уступа при рекультивации отвалов или при зачистке подошвы уступа.

Разработан алгоритм и составлена программа на алгоритмическом языке для проведения исследований. Вывод результатов предусмотрен в таблицу, на график и в виде рисунка расчетной схемы в масштабе. Проведены расчеты для экскаватора с ковшем  $5,5 \text{ м}^3$  при скорости движения ковша по траектории  $1 \text{ м/с}$ . Результаты расчета и графики изменения скоростей показаны на рисунках 4 и 5.

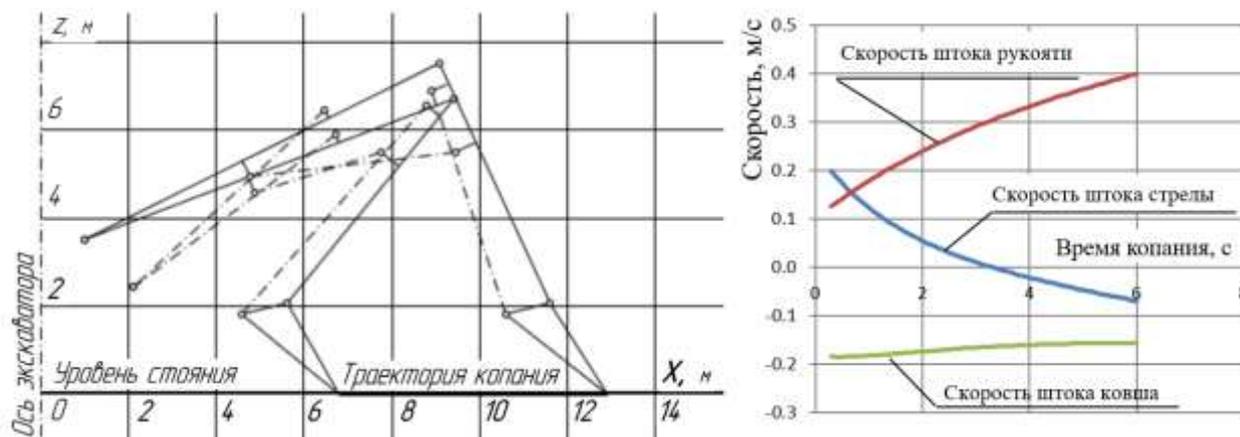


Рисунок 4 – Положения рабочего оборудования и график скоростей для первого варианта

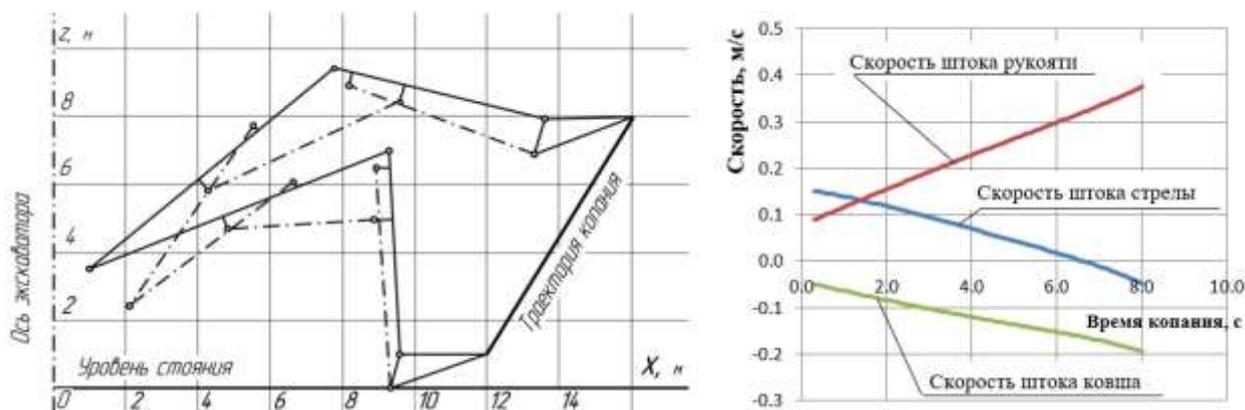


Рисунок 5 – Положения рабочего оборудования и график скоростей для второго варианта

Для расчета возможного усилия копания использован алгоритм поиска допустимого решения модели силового анализа. Вначале поиска на зубьях ковша задается очень большое значение касательной составляющей усилия сопротивления копанию  $P_{01}$ , заведомо большее усилия копания рассматриваемого экскаватора. По заданному  $P_{01}$  определяют усилия на штоках гидроцилиндров стрелы  $F_{цс}$ , рукояти  $F_{цр}$  и ковша  $F_{цк}$ . Усилия на штоках сравнивают со значениями усилий при срабатывании предохранительных клапанов. Причем, при положительных расчетных значениях сравнение выполняют с усилиями, определенными по давлению в поршневой полости, а при отрицательных – в штоковой полости гидроцилиндра. В случае срабатывания предохранительного клапана

уменьшают  $P_{01}$  и расчеты повторяют до тех пор, пока усилия на штоках всех гидроцилиндров не будут меньше усилий при срабатывании предохранительных клапанов.

Получены выражения для определения усилий на штоках гидроцилиндров стрелы, рукояти и ковша (1), (2), (3).

Усилие на штоках гидроцилиндров стрелы:

$$F_{\text{шц}} = \frac{G_c(x_{\text{шце}} - x_A) + G_p(x_{\text{штр}} - x_A) + G_k(x_{\text{штк}} - x_A) + G_{\text{шц}} \left( \frac{x_T + x_E}{2} - x_A \right) + G_{\text{шр}} \left( \frac{x_F + x_P}{2} - x_A \right) + G_{\text{шк}} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_A \right) + P_y(x_k - x_A) + P_x(y_k - y_A)}{L_{AT} \sin(\pi - \alpha_0 - \varphi_c)} \quad (1)$$

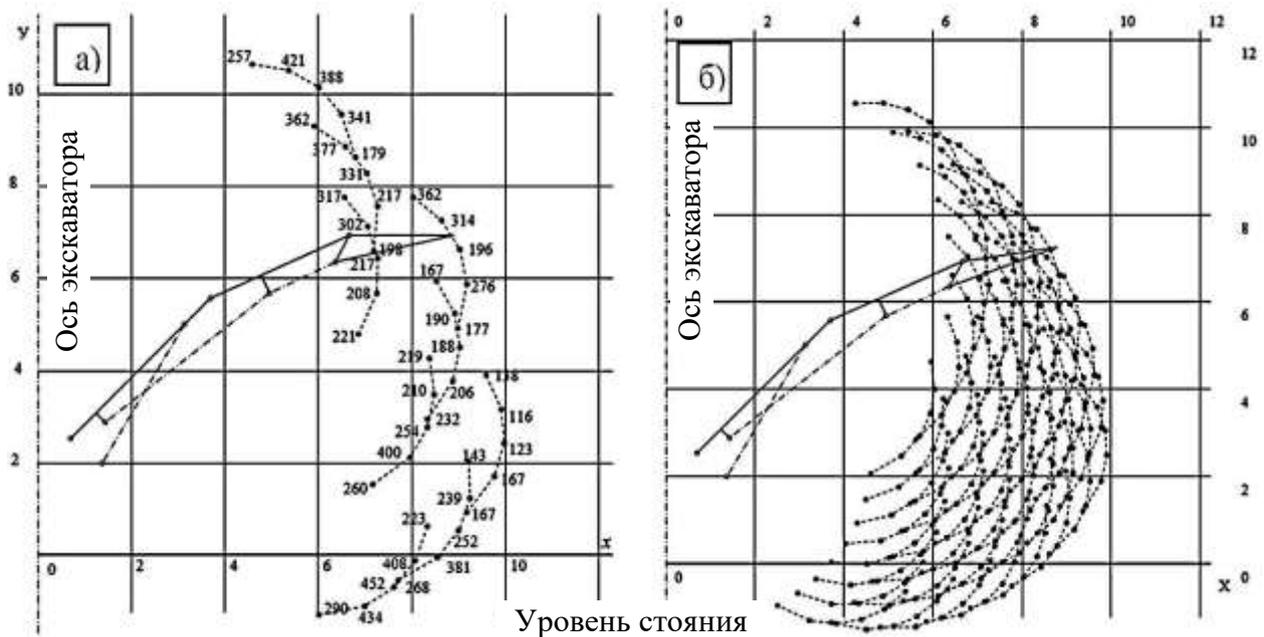
Усилие на штоках гидроцилиндров рукояти:

$$F_{\text{шр}} = \frac{G_p(x_{\text{штр}} - x_B) + G_k(x_{\text{штк}} - x_B) + G_{\text{шк}} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_B \right) + P_y(x_k - x_B) + P_x(y_k - y_B) + 0,5G_{\text{шр}}(x_p - x_B)}{L_{BP} \sin \angle FPB} \quad (2)$$

Усилие на штоках гидроцилиндров ковша:

$$F_{\text{шк}} = \frac{G_k(x_{\text{штк}} - x_C) + P_y(x_k - x_C) + P_x(y_k - y_C) - 0,5G_{\text{шк}}(x_D - x_C)}{L_{CD} \sin \angle RDC} \quad (3)$$

Математическая модель и алгоритм реализованы программой для ЭВМ на алгоритмическом языке *Visual Basic for Application*. Объем программы ~3000 строк.



$L_{\text{шц min}}=3,1 \text{ м}; L_{\text{шц max}}=3,9 \text{ м}; L_{\text{шр min}}=3,35 \text{ м}; L_{\text{шр max}}=4,2 \text{ м}; L_{\text{шк min}}=1,55 \text{ м}; L_{\text{шк max}}=2,4 \text{ м};$   $L_{\text{шц min}}=3,1 \text{ м}; L_{\text{шц max}}=3,9 \text{ м}; L_{\text{шр min}}=2,5 \text{ м}; L_{\text{шр max}}=4,2 \text{ м}; L_{\text{шк min}}=1,55 \text{ м}; L_{\text{шк max}}=2,4 \text{ м};$

Рисунок 6 – Результаты расчета траекторий и усилий на зубьях ковша в пределах рабочей зоны (а) и расчета рабочей зоны (б)

В программе реализован вывод результатов в табличной форме с дублированием на график и в виде рисунка, на котором в масштабе изображается схема экскаватора и рабочая зона с возможными усилиями копания (рисунок 6 (а), (б)).

Разработанная математическая модель, алгоритм и программа позволяют выполнять анализ конструктивных параметров экскаватора. Так, на диаграммах (рисунок 7) видно, что в некоторых точках ограничивающих усилия копания является максимальное усилие гидроцилиндра стрелы  $F_{цс.мах}$ , в остальных точках - максимальное усилие гидроцилиндра ковша  $F_{цк.мах}$ .

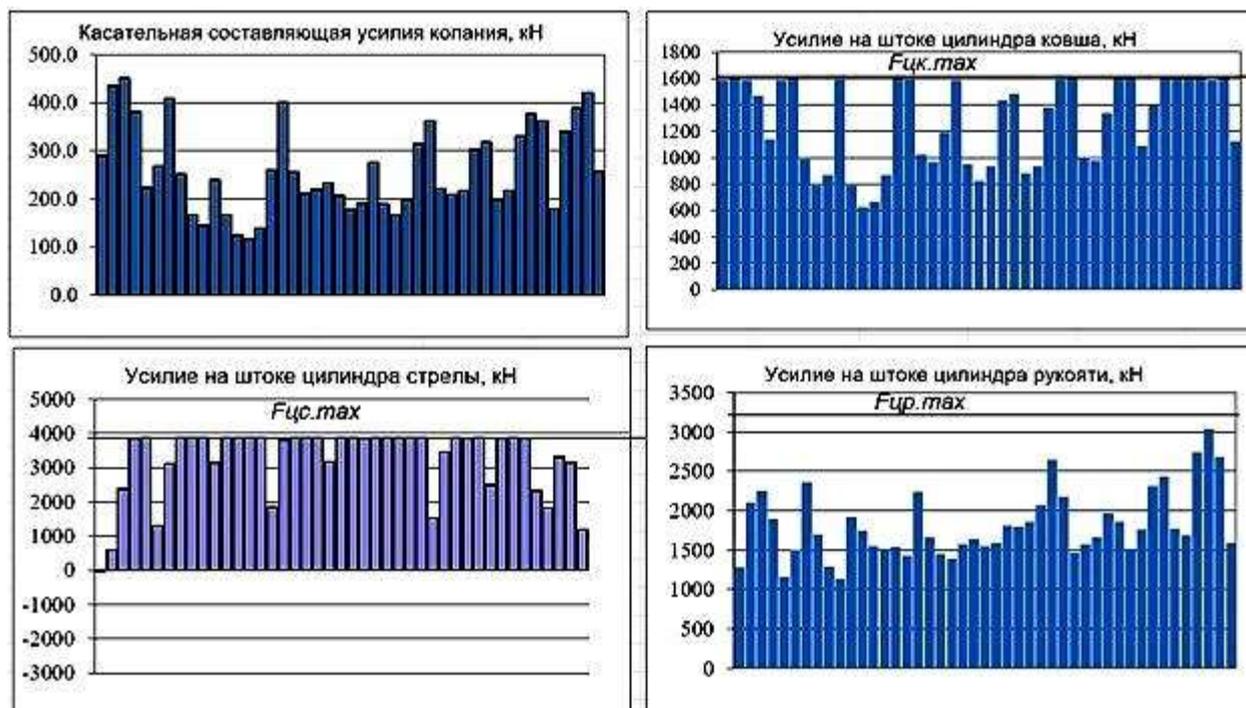


Рисунок 7 – Результаты расчета усилий

Если значения расчетных усилий будут недостаточны для заполнения ковша, то нужно увеличивать давление лимитирующего гидроцилиндра.

Для экскаватора ЭГ-110 проведены расчеты усилий копания и усилий при транспортировании, выявлено, что реакции в пяте стрелы и шарнире «рукоять-стрела» от усилий при транспортировании на 5-30 % превышают реакции от усилий при копании.

1. Составленные для разработанной схемы рабочего оборудования с напорной штангой математическое описание и алгоритм обеспечивают:

- построение рабочей зоны;
- определение возможного усилия на зубьях ковша;
- определение усилий во всех звеньях рабочего оборудования при копании.

2. Алгоритм поиска возможного решения позволяет определять значения усилий на штоках гидроцилиндров, в напорной штанге и уточнять параметры гидроцилиндров для обеспечения необходимого усилия копания.

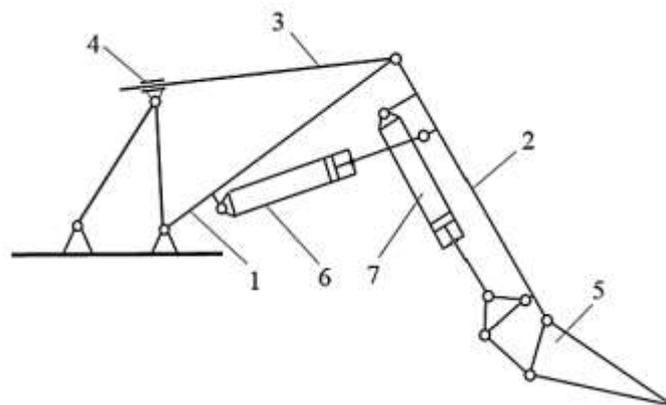
3. Предложенный алгоритм расчета усилий позволяет проводить поиск рациональных параметров рабочего оборудования на этапе эскизного проектирования.

4. Рабочий процесс предлагаемого рабочего оборудования остается таким же, что и базовой модели, копание чаще всего выполняется поворотом ковша, поэтому не происходит изменения динамических характеристик процесса копания.

На рисунке 7 показана зависимость максимального усилия копания от усилий гидроцилиндров, первое положение, выносимое на защиту, доказано.

В третьей главе рассмотрена возможность совершенствования конструкции рабочего оборудования, разработаны математическая модель определения кинематических параметров и математическая модель определения усилий при копании новой модели, проведена проверка адекватности математической модели определения координат элементов рабочего оборудования.

В существующих моделях удержание в нужном положении и поворот стрелы осуществляется гидроцилиндрами, при этом от них на стрелу действуют усилия изгиба и сжатия. На стрелу также действуют усилия со стороны рукояти и усилий от гидроцилиндров поворота рукояти. Причем, все указанные нагрузки действуют на нижние листы стрелы. Для исключения действия усилий гидроцилиндров поворота стрелы разработана схема, показанная на рисунке 8.



Стрела 1, рукоять 2, напорная балка 3, установленная посредством седлового подшипника 4 на двуногой стойке и шарнирно соединенная с верхней частью стрелы 1, ковш 5, гидроцилиндры поворота рукояти 6 и поворота ковша 7.

Рабочее оборудование экскаватора работает следующим

Рисунок 8 – Схема рабочего оборудования с напорной балкой

образом. Копание производится ковшом 5 при повороте его относительно оси крепления к рукояти гидроцилиндром поворота ковша 7. Рукоять при копании поворотом ковша удерживается в неподвижном положении гидроцилиндром поворота рукояти 6, а стрела 1 удерживается напорной штангой 3. Для расчета возможного усилия копания требуются выражения для расчета усилий на штоках и в напорной штанге.

Для предлагаемой схемы также разработана модель кинематического и силового анализа, аналогичная базовой модели (4), (5), (6).

Усилие в напорной штанге  $F_{ш}$ :

$$F_{ш} = \frac{G_c(x_{цтс} - x_A) + G_p(x_{цтп} - x_A) + G_k(x_{цтк} - x_A) + G_{ш} \left( \frac{x_T + x_B}{2} - x_A \right) + G_{цп} \left( \frac{x_F + x_P}{2} - x_A \right) + G_{цк} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_A \right) + P_y(x_k - x_A) + P_x(y_k - y_A)}{L_{AB} \sin \angle TBA} \quad (4)$$

Усилие на штоках гидроцилиндров рукояти определяется по условию равновесия относительно шарнира  $B$ :

$$F_{цп} = \frac{G_p(x_{цтп} - x_B) + G_k(x_{цтк} - x_B) + G_{цк} \left( \frac{x_R + x_D}{2} - x_B \right) + P_y(x_k - x_B) + P_x(y_k - y_B) + 0,5G_{цп}(x_p - x_B)}{L_{BP} \sin \angle FPB} \quad (5)$$

Усилие на штоках гидроцилиндров ковша определяется по условию равновесия относительно шарнира  $C$ :

$$F_{цк} = \frac{G_k(x_{цтк} - x_C) + P_y(x_k - x_C) + P_x(y_k - y_C) - 0,5G_{цк}(x_D - x_C)}{L_{CD} \sin \angle RDC} \quad (6)$$

Составлены алгоритм расчета усилий и программа для ЭВМ. Для определения возможных усилий копания использован метод поиска допустимого решения.

Суть алгоритма: на зубьях ковша вначале задается очень большое усилие копания, по нему рассчитываются усилия на штоках гидроцилиндров и в напорной штанге. Если в одном из механизмов усилие превышает максимальное, то уменьшается усилие на зубьях. Такое уменьшение усилий выполняется до тех пор, пока на штоках всех гидроцилиндров и в напорной штанге усилия будут не более допустимых.

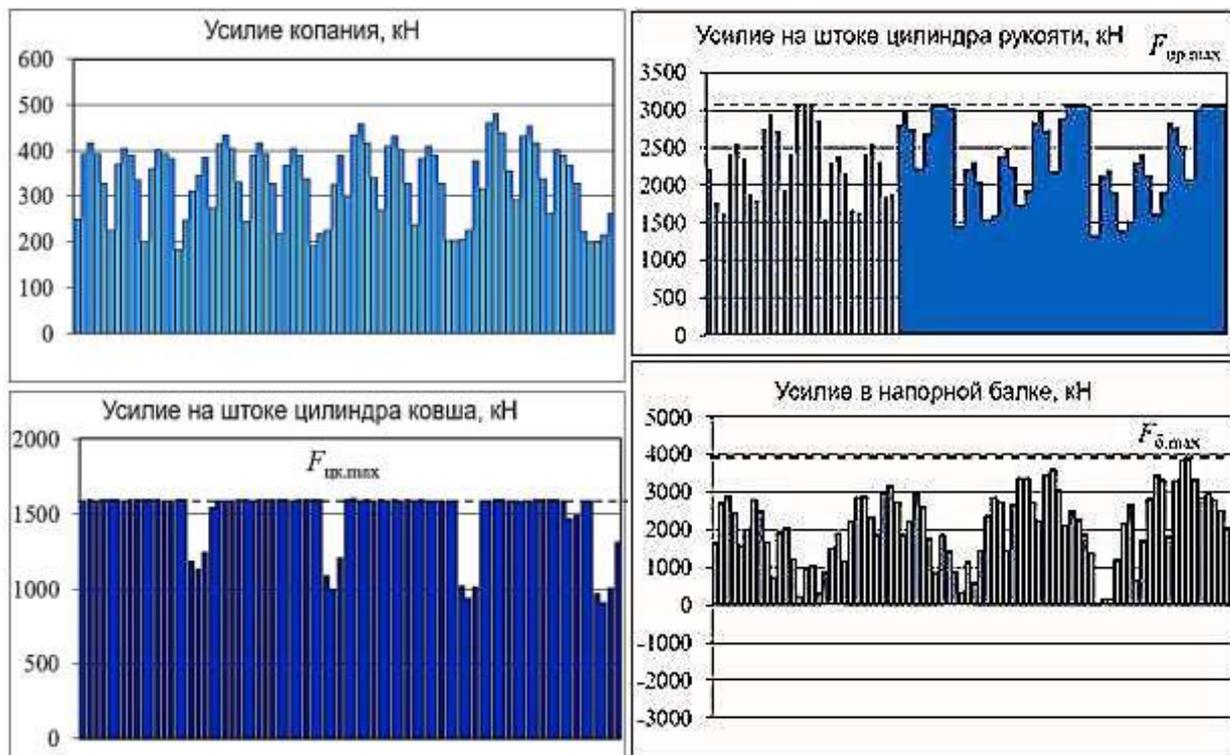


Рисунок 9 – Результаты расчета усилий на зубьях ковша и штоках гидроцилиндров

Результаты выполненных расчетов координат и усилий по разработанной программе на алгоритмическом языке *Visual Basic for Application* приведены на рисунках 9, 10 (значения усилий копания в кН), пунктиром показана траектория движения зуба ковша.

Анализ диаграмм позволяет сделать вывод: максимальные усилия на зубьях ковша определяются значениями максимальных усилий на штоках гидроцилиндров, показанных пунктирными линиями. Если окажется, что усилия на зубьях недостаточно для заполнения ковша, то по результатам вычислений определяются в каких гидроцилиндрах необходимо увеличить максимальное усилие. Так, по графику усилий на штоках гидроцилиндров ковша (рисунок 9) видно, что в большинстве случаев усилия достигли максимальных значений и ограничили усилие копания.

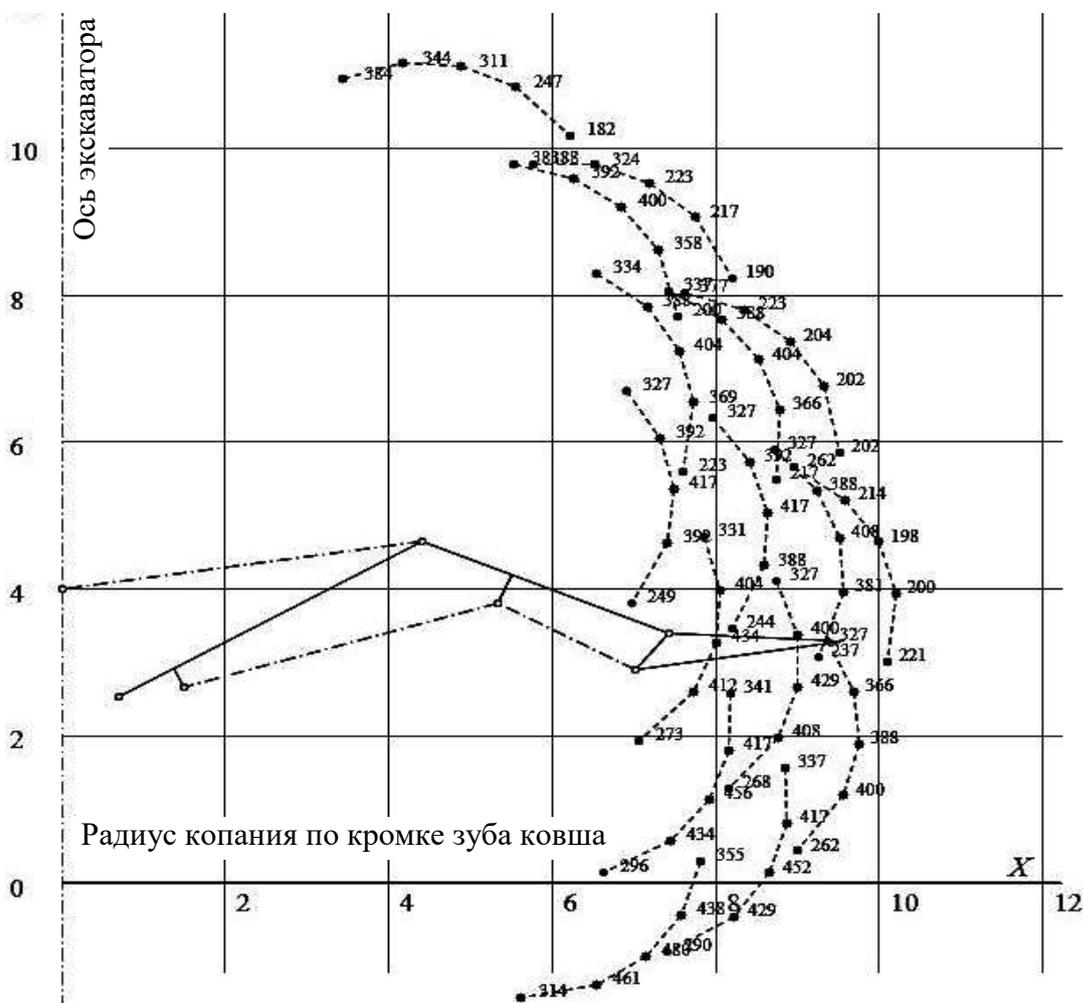


Рисунок 10 – Результаты расчета рабочей зоны и усилий на зубьях

**В четвертой главе** приведены сведения по программным продуктам для исследования напряженно-деформированного состояния, разработан алгоритм поиска рациональных параметров рабочего оборудования, рассмотрено создание моделей конструкций элементов рабочего оборудования, проведены исследования напряженно-деформированного

состояния стрелы и рукояти базовой схемы рабочего оборудования для нескольких вариантов исполнения стрелы и рукояти, выполнены исследования, доказано третье научное положение.

Наиболее явный путь повышения эффективности это снижение масс стрелы и рукояти по сравнению с базовой моделью и за счет этого увеличение вместимости ковша при условии сохранения неизменным опрокидывающего момента. Поиск рациональных параметров проводится в системе APM WinMachine.

Исследования проведены для базовой модели и нескольких вариантов исполнения стрелы и рукояти, при горизонтальном положении рабочего оборудования при нагрузке на зубьях ковша 400 кН. Используемый для элементов стрелы и рукояти материал – сталь 09Г2С, предел текучести  $\sigma_T=345$  МПа.

Суммарный опрокидывающий момент элементов относительно оси стрелы (точка А рисунка 3)  $M_{\text{опр}}=\Sigma 9,81 \cdot m_i \cdot x_i=176$  кНм. Выводы по результатам расчета напряжений для базовой конструкции:

1. Имеются излишние запасы прочности в верхних листах стрелы и рукояти;
2. Выявлены излишние запасы прочности в вертикальных и поперечных листах, поперечных трубах рукояти;
3. Имеются излишние запасы прочности в вертикальных листах стрелы выше труб;
4. Для проверки выявления возможности снижения массы выполнены расчеты при меньших толщинах листов.

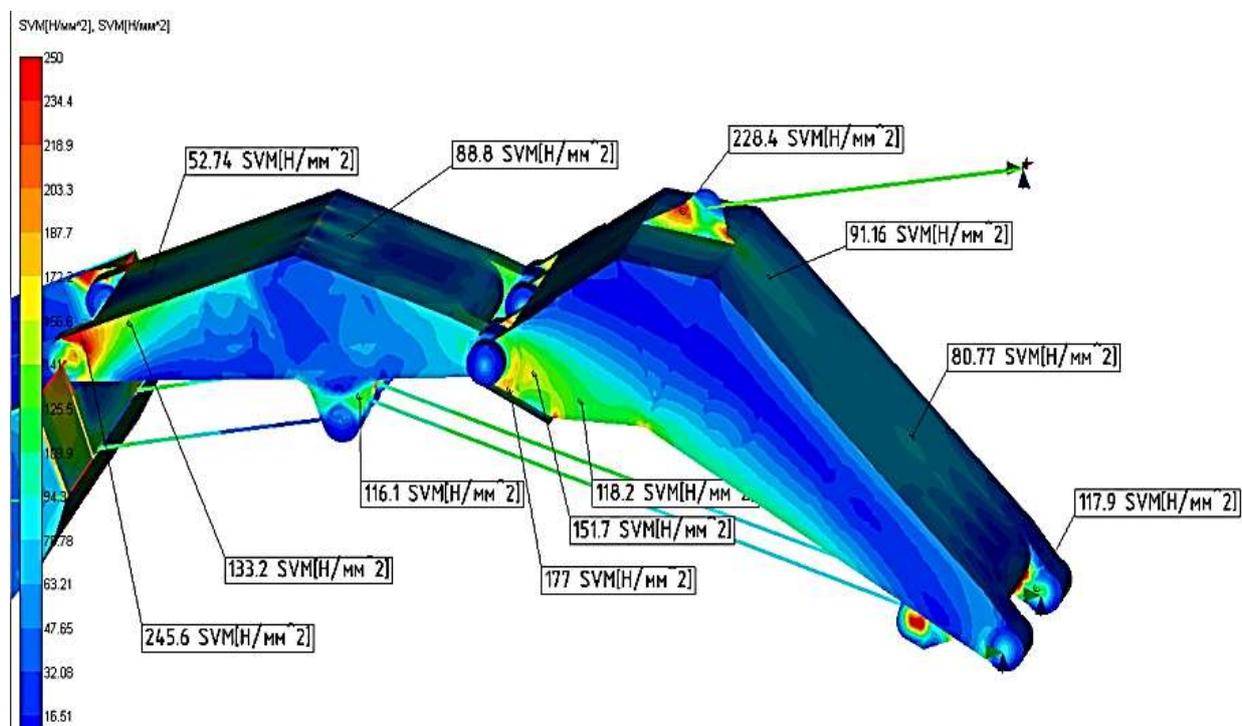


Рисунок 11 – Карта напряжений

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния показывают, что можно уменьшить толщину листов стрелы и рукояти при сохранении расчетных напряжений на том же уровне, что и у базовой модели экскаватора ЭГ-110. Карты напряжений и карта нагрузок приведены на рисунке 11 и рисунке 12.

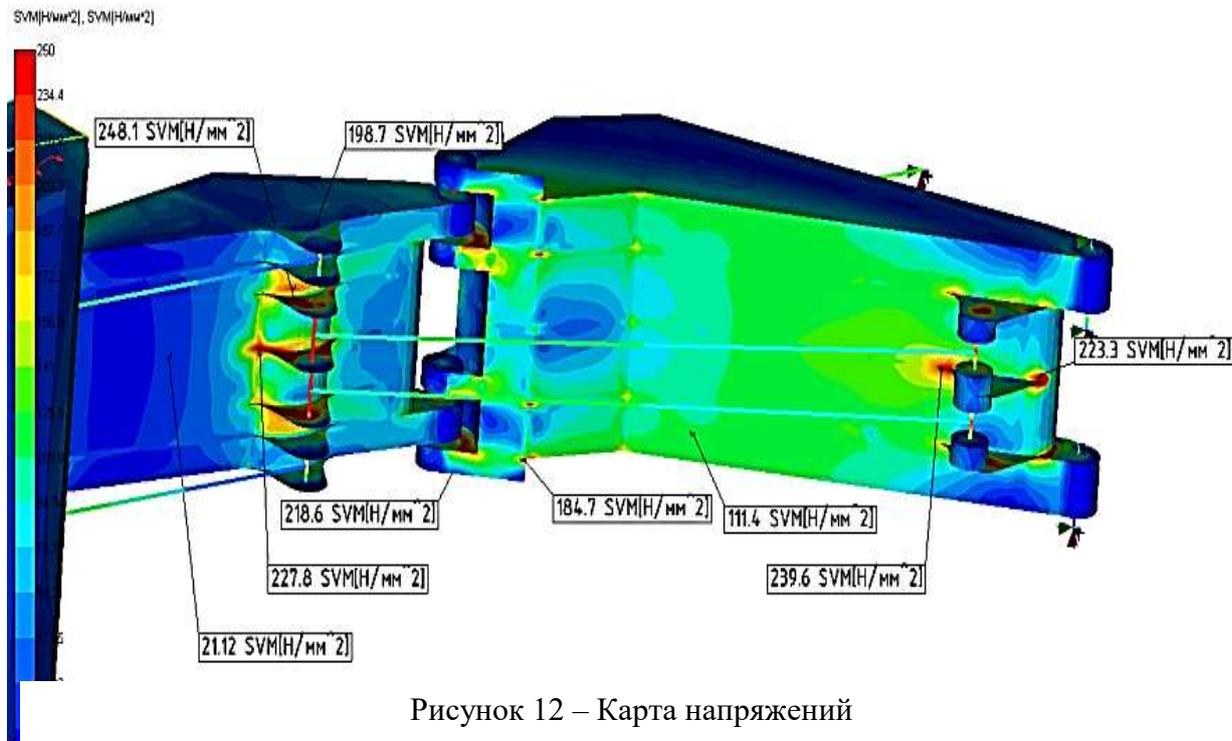


Рисунок 12 – Карта напряжений

Снижение толщин листов уменьшает массу стрелы и рукояти, уменьшится опрокидывающий момент относительно опорно-поворотного круга. Расчет возможного повышения производительности выполнен по условию сохранения противовеса как на базовой модели, можно увеличить за счет вместимости вес ковша.

Уменьшен опрокидывающий момент новой модели по сравнению с базовой на  $\Delta M_{\text{опр}} = 66 \text{ кНм}$ , на эту величину можно увеличить вместимость ковша на  $0,367 \text{ м}^3$ .

У базовой модели вместимость ковша  $E_{\text{к.б}} = 5,5 \text{ м}^3$ . У модели с измененными параметрами  $E_{\text{к.б}} = 5,5 + 0,367 = 5,867 \text{ м}^3$ .

Таким образом, предлагаемое рабочее оборудование с напорным механизмом и методика поиска рациональных параметров, основанной на исследованиях напряженно-деформированного состояния, позволяет увеличить производительность экскаватора на  $6,7 \%$ .

Такое увеличение не потребует увеличения мощности приводов, массы противовеса и не приведет к увеличению времени цикла, которое у базовой модели равно  $T_{\text{ц}} = 23 \text{ с}$ .

При сохранении продолжительности цикла увеличение производительности будет пропорционально увеличению вместимости ковша. Относительное увеличение производительности составит  $\Delta\Pi = 1,06$ , увеличение производительности на  $6,7 \%$ .

*Таким образом, второе и третье научные положения, выносимые на защиту, доказаны.*

## **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 карьерных гидравлических экскаваторов за счет совершенствования рабочего оборудования, имеющие существенное значение для горнодобывающей отрасли Республики Казахстан и России.

Основные выводы, научные и практические результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Разработаны математическая модель, алгоритм и компьютерная программа рабочего процесса карьерного гидравлического экскаватора, позволяющие выполнять: кинематический и силовой анализ традиционной схемы (**базовая модель ЭГ-110**) рабочего оборудования с силовыми гидроцилиндрами поворота стрелы, рукояти и ковша, расчет параметров рабочей зоны экскаватора, расчет возможных усилий копания, поиск максимальных значений усилий в элементах, расчет требуемых скоростей напорного механизма для движения ковша на заданной траектории.

2. Предложена новая конструктивная схема рабочего оборудования, в которой исключены гидроцилиндры поворота стрелы, а для перемещения стрелы и ее удержания использован располагаемый на надстройке напорный механизм с напорной балкой, соединенной с проушиной стрелы (Патент на изобретение № RU 2 772 037 C1 E02F 3/30).

3. Составлено математическое описание, предложен алгоритм и разработана компьютерная программа для **новой схемы** рабочего оборудования гидравлического экскаватора, обеспечивающие расчеты рабочей зоны экскаватора, возможных значений усилий копания, требуемых скоростей напорного механизма движения ковша по заданной траектории.

4. Разработана методика поиска рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора на примере ЭГ-110 с использованием модуля расчета напряженно-деформированного состояния, доказана возможность снижения массы рабочего оборудования.

5. Подтверждена эффективность предлагаемой схемы рабочего оборудования: масса рабочего оборудования экскаватора по сравнению с базовой схемой рабочего оборудования снижена на 6,7 т, что позволило при сохранении неизменной массы противовеса увеличить вместимость ковша на 0,367 м<sup>3</sup> (на 6,7 %), соответственно произойдет увеличение производительности также на 6,7 %.

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

***Публикации в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:***

1. Шестаков, В. С. Исследование нагруженности рабочего оборудования гидравлического экскаватора / В. С. Шестаков, И. В. Телиман, **П. Г. Безкоровайный** // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1(171). – С. 18-23. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23.

2. **Безкоровайный, П. Г.** Изменение нагрузок на рабочем оборудовании гидравлического экскаватора при копании крайним зубом / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 5(151). – С. 3-8. – DOI 10.26730/1816-4528-2020-5-3-8.

3. **Безкоровайный, П. Г.** Исследование нагружения рабочего оборудования гидравлического экскаватора при транспортировании ковша / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков, Т. И. Юсупов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11-1. – С. 209-218.

4. **Безкоровайный, П. Г.** Оптимизация рабочего оборудования гидравлического экскаватора / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков, В. И. Нестеров // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 6(158). – С. 3-8. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-6-3-8.

5. **Безкоровайный, П. Г.** Определение рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора с напорным звеном / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 1. – С. 25-35. – DOI 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35.

***Публикации, индексируемые в международной базе Scopus:***

6. Shestakov, V. Determination of the working area of a hydraulic excavator / V. Shestakov, T. Franz, **P. Bezkorovainyy** // E3S Web of Conferences : 18, Ekaterinburg, 02–11 апреля 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 03017. – DOI 10.1051/e3sconf/202017703017.

7. Shestakov, V. Features of the Issues of Modeling the Working Process of a Hydraulic Excavator with a Front Shovel / V. Shestakov, **P. Bezkorovainyy** // Material and Mechanical Engineering Technology. – 2022. – Vol. 3, No. 3. – P. 35-41. – DOI 10.52209/2706-977X\_2022\_3\_35.

8. Calculating Design and Mode Parameters of Mine Hydraulic Excavator Working Equipment Mechanisms / I. Teliman, N. Malybayev, **P. Bezkorovainyy** [et al.] // Material and Mechanical Engineering Technology. – 2022. – Vol. 1, No. 1. – P. 19-26. – DOI 10.52209/2706-977X\_2022\_1\_19.

9. Hydraulic Excavator Bucket Modeling with a Straight Shovel along a Defined Trajectory / **P. G. Bezkorovainyy**, I. V. Teliman, N. S. Malybaev, V. S. Shestakov // Material and Mechanical Engineering Technology. – 2023. – Vol. 1, No. 1. – P. 29-33.

### ***Патенты:***

10. Патент № 2772037 С1 Российская Федерация, МПК E02F 3/30. Рабочее оборудование экскаватора: № 2021122144 : заявл. 27.07.2021: опубл. 16.05.2022 / **П. Г. Безкоровайный**, А. П. Комиссаров, В. С. Шестаков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

### ***Публикации в прочих научных изданиях:***

11. Шестаков, В. С. Определение усилий копания в пределах рабочей зоны гидравлического экскаватора / В. С. Шестаков, **П. Г. Безкоровайный**, Т. П. Франц // 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, 02–03 апреля 2020 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2020. – С. 261-265.

12. **Безкоровайный, П. Г.** Нагрузки на рабочее оборудование гидравлического экскаватора при транспортировании ковша / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 20–21 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 243-246.

13. **Безкоровайный, П. Г.** Анализ применения карьерных гидравлических экскаваторов на разрезах Республики Казахстан / П. Г. Безкоровайный // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 23-25.

14. **Безкоровайный, П. Г.** Оптимизация рабочего оборудования карьерного экскаватора / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков, К. А. Извеков // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 222-225.

15. **Безкоровайный, П. Г.** Оптимизация рукояти гидравлического экскаватора / П. Г. Безкоровайный, В. С. Шестаков // Уральская горная школа - регионам: материалы научно-практической конференции, Екатеринбург, 10 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный

университет, 2023. – С. 132-133.

16. Шестаков, В. С. Совершенствование рабочего оборудования гидравлического экскаватора / В. С. Шестаков, П. Г. Безкоровайный, И. В. Телиман // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 263-267.

Подписано в печать \_\_.\_\_.20\_\_ г. Печать на ризографе.

Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Отпечатано с оригинал-макета

в лаборатории множительной техники издательства УГГУ.