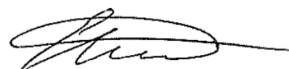


*На правах рукописи*

**Шешукова Екатерина Игоревна**



**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ  
ОТРАБОТКИ ЗАБОЙНОГО БЛОКА УГОЛЬНОГО  
РАЗРЕЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА  
ЭКСКАВАТОРА**

*Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Иванов Сергей Леонидович*

**Официальные оппоненты:**

*Хажиев Вадим Аслямович*

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства», лаборатория эффективной эксплуатации оборудования, заведующий лабораторией;

*Иов Иван Алексеевич*

кандидат технических наук, публичное акционерное общество «Уральский завод тяжелого машиностроения», дирекция конструкторских разработок, отдел расчетов и инженерного анализа, инженер-конструктор, ведущий.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2026 г. в 12:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 17 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ  
Евгений Ростиславович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Ресурс карьерных экскаваторов при отработке угольных месторождений во многом определяется нагруженностью приводов рабочего оборудования, а именно приводов подъема и напора. При этом необходимо, чтобы нагрузки в приводах рабочего оборудования не превышали допустимых значений, но в то же время были достаточно близкими к номинальным значениям для эффективного использования его потенциала. Стандартные режимы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) по поддержанию экскаватора в работоспособном состоянии разработаны на базе нормальных условий его эксплуатации. Однако реальные месторождения характеризуются вариативностью этих условий, в частности, кусковатостью горной массы в забое, ее насыпной плотностью, при этом не учитываются траектории движения ковша в забое, а режимы работы каждой машины принимают одинаковыми вне зависимости от вышеуказанных условий эксплуатации. Вместе с тем, отсутствуют методики оценки коэффициентов пропорциональности выработки ресурса в зависимости от траектории копания и свойств экскавируемой горной массы, что затрудняет принятие обоснованных решений при корректировке межремонтных интервалов и выборе рационального режима экскавации. В свою очередь это ведет к неоправданным потерям из-за преждевременных выходов из строя горного оборудования и избыточного обслуживания. Обоснованный же выбор рациональных режимов работы карьерного экскаватора позволит производить добычу с максимальной эффективностью, как по объему добычи, так и повысить ресурс экскаватора.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросами обоснования рациональных режимов работы карьерных экскаваторов, а также их надежности и технического обслуживания занимались ученые: В.Г. Ананин, Л.И. Андреева, К.Ю. Анистратов, И.Н. Антоненко, А.Ю. Болотнев, Г.А. Боярских, П.В. Буянкин, В.С. Великанов, П.Б. Герике, Н.Г. Домбровский, М.Ю. Дрыгин, С.Л. Иванов, П.В. Иванова, И.А. Иов, Л.И. Кантович, А.П. Комиссаров, П.И. Кох, В.П. Кочетков, Т.И. Красникова, И.Э. Крюков, Ю.А. Лагунова, К.Ю. Летнев, Д.Е. Махно, В.И. Морозов, Р.Ю. Подэрни, М.Г. Потапов, Г.Я. Пятибратов, В.И. Русихин,

Е.М. Садовников, В.П. Свиначук, В.А. Хажиев, А.А. Хорешок, А.И. Шадрин, Д.А. Шибанов, С. Hendrics, R. Hall, S. Frimpong, Y. Li, Muhammad Azeem Raza, Hongjin Wu, Mohammad Babaei Khorzoughi, Kwame Awuah-Offei и др.

Ими рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования с точки зрения совершенствования технического обслуживания и ремонта горных машин, а также эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов.

Однако вопросы изменения траектории копания, плотности и кусковатости горной массы через оценку нагрузок приводов рабочего оборудования в рассматриваемых условиях, а также корректировку периодичности циклов проведения мероприятий технического обслуживания и ремонта отдельного карьерного экскаватора с учетом его работы в цикле для заданных условий эксплуатации изучены не достаточно, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Объект исследования** – процесс отработки забоя электрическим одноковшовым экскаватором по различным траекториям копания с учетом плотности и кусковатости горной массы.

**Предмет исследования** – приводы подъема и напора карьерного экскаватора как взаимосвязанные элементы единой системы.

**Цель работы** – повышение ресурса электрического одноковшового экскаватора на угольных разрезах.

**Идея работы** – повышение ресурса одноковшового экскаватора на угольных разрезах достигается учетом траектории отработки забойного блока, плотности и кусковатости экскавируемой горной массы.

**Задачи исследования:**

1. Провести теоретический анализ по оценке нагруженности приводов подъема и напора карьерного экскаватора при различных траекториях копания в цикле его работы для условий угольных разрезов.

2. Теоретически обосновать порядок оценки коэффициента пропорциональности загрузки приводов подъема и напора карьерного экскаватора и выявить закономерность его изменения для условий работы экскаватора отличных от нормальных.

3. Провести физическое моделирование процесса копания для оценки усилия сопротивления копанию ковша экскаватора модельного материала с различным гранулометрическим составом.

4. Провести численное моделирование процесса копания для оценки усилия сопротивления копанию ковша экскаватора с различными, независимо изменяемыми, параметрами кусковатости и насыпной плотности горной массы.

5. Разработать рекомендации по выбору рациональной траектории копания с учетом кусковатости и насыпной плотности горной массы, а также корректировке периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта экскаватора по величине изменения коэффициента расходования ресурса для конкретных условий эксплуатации.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработана и экспериментально верифицирована математическая модель нагруженности приводов подъема и напора одноковшового экскаватора в цикле, а также совершаемой им работы как в зависимости от геометрии траектории копания и физико-механических свойств экскавируемой горной массы.

2. Экспериментально установлены закономерности изменения усилия копания в зависимости от кусковатости и насыпной плотности горной массы, описываемые степенной функцией с линейным и степенным ограничением на соответствующие коэффициенты.

3. Для оценки интенсивности расходования ресурса приводов экскаватора в конкретных условиях его применения предложен безразмерный коэффициент расходования ресурса как универсальный масштабируемый коэффициент, связывающий интенсивность деградации приводов с комплексным воздействием параметров реальных условий эксплуатации, связывающий интенсивность выработки ресурса и соответствующее его изменение, а также проведение корректировку межремонтных интервалов.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пунктам: 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», 16 «Техническое обслуживание и ремонт горных машин и оборудования с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий их эксплуатации».

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработан алгоритм оценки силовых характеристик в цикле работы экскаватора в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях эксплуатации, а выявленные закономерности их изменения позволили установить, что отработку забойного блока следует проводить по средней радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части 70-80°.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что усилие копания от изменения плотности и кусковатости горной массы оценивается произведением степенных функций с рациональными положительными показателями, меньшими единицы, при конкретной величине условной стружки, отнесенным к базовой величине усилия копания для нормальных условий функционирования экскаватора.

3. Разработана и зарегистрирована «Программа для оценки кинестатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665458).

4. Результаты диссертационной работы приняты к использованию в деятельности ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» при разработке эксплуатационной и ремонтной документации в виде рекомендаций по выбору рационального режима работы карьерного экскаватора с учетом траектории копания, плотности и кусковатости экскавируемого сырья и использовании коэффициента расходования ресурса, позволяющего проводить корректировку периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта единичного экскаватора с учетом условий его функционирования (акт внедрения от 12.03.2026).

#### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач использовался комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований в области карьерных экскаваторов; анализ влияния траектории отработки уступа на нагруженность рабочего

оборудования, моделирования процесса копания ковшем экскаватора для изучения влияния насыпной плотности и кусковатости горной массы на изменение величины усилия копания; оценку сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также методологии исследования, включающей методы математической статистики, геометрического и кинематического анализа, теоретической механики.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Снижение коэффициента расходования ресурса экскаватора на угольном разрезе на 25% достигается отработкой забойного блока по радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части 70-80°.

2. Для условий угольного разреза изменение усилия копания горной массы экскаватором ЭКГ-18Р находится в степенной зависимости от плотности и кусковатости: уменьшение плотности или кусковатости на 25 % ведет к снижению усилия на 25 % и 32 %, соответственно, а при их увеличении – усилие копания возрастает на 33 % и 35 %.

**Степень достоверности** обусловлена представительным объемом достоверной статистической информации, построением теории на известных, проверяемых фактах.

**Апробация результатов диссертации** проведена на 10 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 8 международных; за последние 3 года принято участие в 10 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 8 международных: XXI, XXII и XXIII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (2023, 2024, 2025 гг., Екатеринбург), Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2023: актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (2023, 2024, 2025 гг., Пермь), Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (2024, 2025 гг., Магнитогорск), XX Всероссийская конференция-курс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные про-

блемы недропользования» (2024 г., Санкт-Петербург), Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (2024 г., Санкт-Петербург).

**Личный вклад автора** заключается в участии автора на всех этапах процесса исследования, непосредственном участии в проведении исследования по оценке нагрузок приводов рабочего оборудования экскаватора и научных экспериментах, личном участии в апробации результатов исследований, разработке алгоритма оценивания нагруженности приводов рабочего оборудования, подготовке публикаций по выполненной работе.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени описаны в 15 печатных работах, в том числе в 5 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 152 наименования, и 3 приложений. Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 25 таблиц.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, определены цель, задачи, а также научная новизна, представлены теоретическая и практическая значимость исследования.

**В первой главе** представлен обзор состояния изученности темы диссертационного исследования. Дан анализ влияния различных факторов на производительность системы приводов подъема и напора карьерного экскаватора. Представлены существующие подходы к проведению технического обслуживания и ремонта экскаваторов.

**Во второй главе** разработан алгоритм и математическая модель оценки силовых характеристик рабочего оборудования в цикле работы экскаватора, проведена оценка нагрузок на рабочее

оборудование при линейно-наклонной и радиально-линейной траектории. Определен коэффициент расходования ресурса  $k_{pp}$ .

**В третьей главе** приведен план эксперимента. Дано описание стенда и описан подбор критериев подобия физического моделирования реальному объекту. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований. Создана численная модель процесса, проведен численный эксперимент копания ковшом при разных величинах кусковатости и насыпной плотности. Представлены аппроксимированные степенными функциями результаты численного моделирования.

**В четвертой главе** разработаны рекомендации по выбору рационального режима работы карьерного экскаватора с учетом траектории копания, плотности и кусковатости горной массы, а также корректировке периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта.

**В заключении** изложены основные выводы по результатам проведенных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Снижение коэффициента расходования ресурса экскаватора на угольном разрезе на 25% достигается отработкой забойного блока по радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части 70-80°.**

На разрезах Кузнецкого угольного бассейна для вскрышных и добычных работ применяются экскаваторы типа ЭКГ различного типоразмера; коэффициент вскрыши варьируется от 5,75 до 13,6 м<sup>3</sup>/т.

Анализ теоретических исследований показал, что особое влияние на работоспособность экскаватора при ведении открытых горных работ оказывают такие факторы, как траектория копания, насыпная плотность и кусковатость горной массы, а также структура мероприятий технического обслуживания и ремонта (ТОиР). В качестве нормальных условий приняты значения базовых параметров согласно техническим условиям ТУ 34122-003-74816237-2009 для разработки экскаватором ЭКГ-18Р.

На основе базы циклов работы экскаватора ЭКГ-18Р для нормальных условий эксплуатации определены характерные временные

периоды укрупненных рабочих процессов: от 0 с до 10,25 с – экскавация; от 10,25 с до 15,0 с – перемещение рабочего оборудования с одновременным поворотом платформы под разгрузку; 15,0-26,75 с – перемещение рабочего оборудования с одновременным поворотом платформы в исходное положение для начала нового цикла.

Для оценки нагруженности рабочего оборудования в процессе экскавации разработан алгоритм оценки нагрузок приводов подъема и напора, а также схема загрузки оборудования экскаватора (рисунок 1) с указанием действующих на рабочее оборудование сил. На основе данной схемы и уравнения равновесия относительно точки  $O_1$  усилие в канатах подъемной лебедки определяется по формуле (1):

$$F = \begin{cases} \frac{(G_{p1}l_{p1} + G_k l_k + G_{gm} l_{gm} - G_{p2} l_{p2}) \cos \alpha + (F_{kop} l_{kop} + F_{tr} l_{tr}) \cos(90 + \alpha - \beta)}{\cos(\gamma + \alpha) l_F} K_d & \text{если } \varphi \leq 90^\circ \\ \frac{(G_{p1}l_{p1} + G_k l_k + G_{gm} l_{gm} - G_{p2} l_{p2}) \cos \alpha + (F_{kop} l_{kop} + F_{tr} l_{tr}) \cos(90 + \alpha - \beta)}{\cos(90 + \gamma - \alpha) l_F} K_d & \text{если } \varphi > 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

где  $l_{p1}$  и  $l_{p2}$  – расстояние между седловым подшипником и центром тяжести частей рукояти перед седловым подшипником  $G_{p1}$  и за ним  $G_{p2}$ , соответственно;  $l_k$  – расстояние между седловым подшипником и центром тяжести ковша  $G_k$ ;  $l_{gm}$  – расстояние между седловым подшипником и центром тяжести горной массы  $G_{gm}$ ;  $l_{kop}$  – расстояние от седлового подшипника до направления действия силы сопротивления движению ковша при разрушении забоя  $F_{kop}$ ;  $l_{tr}$  – расстояние от седлового подшипника до направления действия силы трения ковша о забой  $F_{tr}$ ;  $l_F$  – расстояние от седлового подшипника до направления действия усилия в канатах подъемной лебедки  $F$ ;  $\alpha$  – угол между положением оси рукояти и горизонталью;  $\beta$  – угол траектории отработки уступа;  $\gamma$  – угол между канатом и вертикалью;  $K_d$  – коэффициент динамичности. Механизм подъема обладает значительной податливостью и большим временем стопорения. Коэффициент динамичности для этого механизма обычно не превышает 1,2-1,3, в расчетах  $K_d$  принимается равным 1,2.

Рабочее оборудование экскаватора представляет собой двухзвенный механизм со степенью подвижности, равной двум, что предполагает наличие двух приводов – лебедок подъема и напора для придания ковшу заданной траектории движения.

Сила в канатах подъемной лебедки раскладывается на подъемное усилие  $F^п$ , перпендикулярное оси, проходящей через зубья ковша, и ось поворота рукояти, и напорное усилие  $F^н$ , направленное вдоль этой оси. Траектория движения ковша экскаватора разделена на дискретное количество точек с шагом, например, равным 0,5 м, для каждой точки найдено значение усилия в канатах подъемной лебедки. Указанные подходы и математические выражения легли в основу математической модели оценки нагруженности приводов подъема и напора экскаватора.

На рисунке 2 представлено изменение величины подъемных усилий, создаваемых подъемной лебедкой экскаватора, в цикле при обработке забоя по линейно-наклонной траектории с углом наклона  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной. Зеленым цветом (1) представлены суммарные усилия сопротивления (весовые составляющие, силы сопротивления движению и сила трения), синим (2) – подъемная составляющая усилия в канатах лебедки подъема, красным (3) – результирующая этих сил, величина представляет собой неучтенные сопротивления. На рисунке 3 по аналогии с рисунком 2 представлены изменения напорной составляющей  $F^н$  усилия в канатах лебедки подъема экскаватора. Здесь приведены величины сил, спроецированных на условную линию, проходящую через центр поворота и точку копания. Цветовая гамма и цифровые обозначения соответствуют обозначениям на рисунке 2. Однако, в отличие от последнего, для напорной составляющей линия (3) указывает величину напорного усилия, необходимого для осуществления процесса копания по заданной траектории. При этом принято, что положительные значения – это усилия, направленные от забоя (втягивание рукояти).

Для комплексной оценки нагрузок выбраны восемь характерных точек с привязкой ко времени цикла. Полученные в точках величины нагрузки соотносились к единому (базовому) значению. Базовыми значениями выбраны усилия в точке разгрузки (15 с), одинаковые для всех рассматриваемых траекторий  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ . Для усилия подъема нагрузка составляет 342287 Н, для усилия напора – 145275 Н. В таблицах 1 и 2 представлены полученные соотношения, а также их суммарные значения по всем восьми характерным точкам цикла. Видно, что наименьшие усилия для составляющей подъема

имеют место при крайней ближней траектории с углом  $60^\circ$ , а для составляющей напора – при крайней ближней с углом  $80^\circ$ .

В зависимости от выбранной траектории при отработке забойного блока вместе с усилиями существенно изменяются значения крутящих моментов на валах двигателей лебедок подъема и напора экскаватора. На рисунке 4 представлены графики взаимосвязи величин этих крутящих моментов в цикле при рассматриваемых выше траекториях движения ковша экскаватора, при этом красным цветом (1) обозначен процесс копания, желтым (2) – перемещение ковша в точку разгрузки, зеленым (3) – возвращение в исходное положение. Характер получившихся фигур во всех рассматриваемых случаях обладает очевидным подобием. Начало цикла на графике совпадает с точкой начала координат. Синие вертикальные и горизонтальные линии соответствуют значениям момента отсечки двигателей подъема и напора соответственно. При выборе крайней дальней траектории забойного блока и траекториях с углом наклона  $60^\circ$  крутящий момент на двигателе напора превышает момент отсечки, что позволяет сделать вывод о нежелательности выбора таких траекторий копания.

Если проводить комплексный анализ нагрузок при рассматриваемых траекториях, необходимо оценить работу двигателей рабочего оборудования за весь цикл работы карьерного экскаватора. Результаты полученных значений работы за цикл, совершаемой двигателями подъема и напора карьерного экскаватора при рассматриваемых траекториях движения ковша с различными углами наклона, отнесенных к базовым величинам (для подъема 7500 кДж, для напора 1500 кДж) представлены в таблице 3.

Уходя от идеализированного подхода, необходимо рассмотреть работу экскаватора в момент отработки забоя при траектории копания ковшем по радиальной траектории. Однако полная отработка забоя при постоянном радиусе не представляется возможной из-за соображений безопасности проведения работ (образование навеса). В этом случае, если высота обрабатываемого уступа больше высоты напорного вала экскаватора, необходимо при достижении рукоятью горизонтального положения продолжить траекторию движения ковша в виде линейной траектории с углами наклона к горизонту от  $60^\circ$  до  $80^\circ$  вплоть до вершины уступа.

Для полного анализа рассматриваемых траекторий копания забойного блока были определены следующие характеристики (таблица 4): единичный (максимально возможный) объем выемки горной массы ковшом с одного установка экскаватора при ширине отработываемого забоя, равной ширине ковша (3 м), величина условной стружки и количество циклов, необходимое для выемки единичного объема, а также потребная средняя работа на один цикл и удельная работа для выемки одного кубометра горной массы.

Анализ полученных значений показал, что если сравнивать линейно-наклонную траекторию с углом  $60^\circ$  с радиально-линейной, последняя позволяет производить выемку горной массы в 2 раза большего объема с одного установка экскаватора. При этом средняя работа за цикл приводов рабочего оборудования примерно одинакова. Выбор в данном случае радиально-линейной траектории копания дает положительный эффект за счет снижения интенсивности выработки ресурса.

Очевидно, что интенсивность выработки ресурса для разных траекторий при отработке забойного блока будет отличаться друг от друга. Показателем интенсивности выработки ресурса может быть соответствующий коэффициент, однако для его определения необходима база для сравнения, в качестве которой выбрана базовая мощность 249 кВт для двигателя подъема и 76,2 кВт для двигателя напора. Рабочее оборудование экскаватора ЭКГ-18Р приводится в движение двумя двигателями подъема и одним – напора. Базовая мощность всей системы будет равна 574,2 кВт, как сумма мощностей.

Из постулатов энергетических теорий, описывающих процесс разрушения твердого тела, и понятия «энергоресурс машины» следует, что интенсивность расходования ресурса привода экскаватора пропорциональна потребляемой им мощности. Тогда, зная продолжительность цикла работы экскаватора, можно оценить потребную мощность приводов рабочего оборудования. Если определить значение средней мощности в цикле при рассматриваемых условиях и отнести эту величину к базовой мощности оборудования (при работе экскаватора в нормальных условиях), учитывая, что энергоресурс объекта есть величина постоянная и не зависящая от величины и характера нагрузки, можно получить коэффициент расходования ресурса приводами рабочего оборудования (2):

$$k_{pp} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{nN_6}, \quad (2)$$

где  $N_i$  – мощность приводов экскаватора за цикл при заданных условиях, кВт;  $n$  – количество циклов;  $N_6$  – базовая мощность, кВт – средняя мощность приводов экскаватора за базовый цикл, определяемая как сумма базовых мощностей, кВт.

Коэффициент расходования ресурса показывает, насколько интенсивно расходуется ресурс экскаватора в рассматриваемых условиях эксплуатации, в отличие от базовых. Этот коэффициент необходимо использовать при назначении сроков проведения мероприятий ТОиР, а точнее, для корректировки периодичности проведения этих мероприятий. Для этого необходимо величину наработки экскаватора каждого вида работ для базовых условий разделить на коэффициент расходования ресурса. При этом  $k_{pp}$  может быть больше 1.

При отработке забоя ковшем экскаватора по радиально-линейной траектории коэффициент расходования ресурса приводов рабочего оборудования экскаватора уменьшается по сравнению с отработкой по линейно-наклонной траектории, при этом увеличение угла линейной части траектории также ведет к уменьшению указанного коэффициента (таблица 4). Пример реализации корректировки периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта экскаватора по величине изменения коэффициента расходования ресурса представлен на рисунках 5-6, а также в таблицах 5-6.

На основании результатов проведенных исследований разработаны рекомендации по выбору рациональной траектории копания с дифференцированной отработкой смежных забойных блоков и с дифференцированной отработкой смежных забойных блоков по средней траектории, и снижением  $k_{pp}$  до 0,82.

**2. Для условий угольного разреза изменение усилия копания горной массы экскаватором ЭЖГ-18Р находится в степенной зависимости от плотности и кусковатости: уменьшение плотности или кусковатости на 25 % ведет к снижению усилия на 25 % и 32 %, соответственно, а при их увеличении – усилие копания возрастает на 33 % и 35 %.**

Осуществление оценки изменения усилия копания отдельно от плотности и кусковатости горной массы на реальном объекте невозможно. Выявление этой зависимости необходимо для проведения

теоретической оценки совокупности влияния этих двух факторов. Эту задачу возможно решить только численным моделированием, но для его осуществления требуется предварительно провести физическое моделирование этих процессов.

Для лабораторного эксперимента выбран коэффициент линейного масштаба  $k_l = 20$  и создана модель ковша экскаватора ЭЖ-18Р в масштабе 1:20. Учитывая нормальные условия работы экскаватора (ТУ 34122-003-74816237-2009), средний размер куска был выбран равным 0,005 м. Исходя из возможностей лабораторного оборудования и средней расчетной величины усилия копания, определен масштабный коэффициент усилия  $k_F$ , равный 32000.

Для соблюдения адекватности эксперимента другие критерии определяются в соответствии с законом Кулона. Зная критерии подобия, включая коэффициент линейного масштаба  $k_l = 20$  и масштабный коэффициент усилия  $k_F = 32000$ , определен масштабный коэффициент насыпной плотности  $k_p$  (3):

$$k_p = k_F / k_l^3 = 4, \quad (3)$$

тогда сама насыпная плотность должна находиться в пределах 350-400 кг/м<sup>3</sup>, в качестве модельного материала выбран керамзит фракции 0-0,005 м по ГОСТ 32496-2013 с насыпной плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup>. Данный материал выбран из соображений дальнейших перспектив аналогичных исследований с другой кусковатостью.

Задача эксперимента состояла в оценке усилий сопротивления, возникающих при отделении масштабной моделью ковша экскаватора от условного массива на прямолинейном участке траектории. Силы трения ковша о модельный материал и масса модельного материала в ковше были нивелированы условиями проведения эксперимента. Усилие при перемещении ковша фиксировалось динамометром при заданной величине условной стружки.

Первоначально эксперимент проводился при наклоненном к горизонту под 30° коробе и для тех же условий, но с коробом, установленным горизонтально. Сравнение результатов экспериментов показало, что усилия копания совпадают в пределах точности проводимых измерений. Дальнейшие эксперименты проводились при горизонтальном положении короба.

Были проведены 6 серий равноточных измерений по 10 опытов в каждой. Полученные значения позволили выявить закономерность изменения величины усилия копания при толщине условной стружки для заданного гранулометрического модельного материала. По результатам эксперимента изменение усилия копания  $F_M^6(t)$  ковшем экскаватора модельного материала, эквивалентного горной массе со средней величиной куска 0,1 м, для заданной величины условной стружки при физическом моделировании (4):

$$F_M^6 = 416,34t + 0,78 \quad (4)$$

Полученная зависимость применима для теоретической оценки реальным усилиям копания  $F_H^6(t)$  при экскавации в нормальных условиях, с учетом коэффициента подобия  $k_F$  (5):

$$F_H^6 = k_F F_M^6 \quad (5)$$

Например, для условной стружки 0,2 м усилие сопротивления копанию составит 166 кН в заданных условиях, при этом расчетная величина, полученная по стандартной методике при указанных условиях, будет равна 161,8 кН, что говорит об адекватности созданной модели и верном выборе критериев подобия.

В работе проведено моделирование процесса экскавации в программе *Ansys Rocky DEM* с оценкой величины усилия копания ковшем модельного материала разной насыпной плотности при прочих равных условиях, соответствующих условиям физического моделирования. Проанализировав и аппроксимировав полученные данные (рисунок 7), была определена функция изменения величины усилия копания от значения насыпной плотности и величины условной стружки, которая представляет собой степенную функцию с линейным ограничением на произведение коэффициентов (6):

$$F_{чм\rho} = (0,0481\rho + 142,16)t^{(0,99-7\cdot 10^{-4}\rho)} \quad (6)$$

Применительно к различной кусковатости (рисунок 8) при прочих равных условиях функция изменения величины усилия копания представляет собой степенную функцию со степенным ограничением на произведение коэффициентов (7):

$$F_{чмd} = 519,7 \cdot 10^3 d^{1,56} t^{1,06d^{0,065}} \quad (7)$$

Представив оценку влияния кусковатости и насыпной плотности горной массы на усилие копания посредством коэффициентов

как показательных функций, отнесенных к базовой величине для номинальных условий, можно оценить влияния изменения одновременно двух искомых факторов через выражение (8):

$$F_{pd} = \frac{k_F F_{чмр} F_{чмд}}{F_M^6} \quad (8)$$

Для проверки полученных результатов на соответствие реально протекающим процессам был поставлен физический эксперимент с модельным материалом с насыпной плотностью 275 кг/м<sup>3</sup>, и кусковатостью 0,005-0,01 м при величине условной стружки 0,034 м. Усилие копания при скорости движения ковша 0,5 м/с составило 12,06 Н, для этих же условий усилие, полученное по выражению (8), составило 13 Н, что подтверждает верность принятых решений и возможность применения представленного подхода.

При оценке уровня влияния факторов изменения насыпной плотности и кусковатости было определено, что уменьшение по отдельности плотности или кусковатости на 25% ведет к снижению усилия на 25% и 32% соответственно, а при их аналогичном увеличении усилие копания возрастает на 33% и 35%.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации дано научно-обоснованное решение задачи по обоснованному выбору рациональных траекторий копания с учетом плотности и кусковатости горной массы забойного блока на угольных разрезах для повышения ресурса электрического одноковшового экскаватора, что имеет существенное значение для техники и технологии ведения горных работ.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Разработка и экспериментальное верифицирование математической модели нагруженности приводов подъема и напора одноковшового экскаватора в цикле работы как функции от геометрии траектории копания и физико-механических свойств экскавируемой горной массы позволило установить закономерности изменения работы приводов и ввести коэффициент пропорциональности для адаптации нормативных показателей в виде коэффициента расходования ресурса  $k_{pp}$ .

2. Для оценки интенсивности выработки ресурса приводов экскаватора в конкретных условиях его применения предложен безразмерный коэффициент расходования ресурса как универсальный масштабируемый коэффициент  $k_{pp}$ , связывающий интенсивность деградиационных процессов приводов с комплексным воздействием факторов реальных условий эксплуатации, позволяющий устанавливать соответствующее изменение ресурса экскаватора, а также обоснованно проводить корректировку межремонтных интервалов.

3. Экспериментально установлены закономерности изменения усилия копания в зависимости от кусковатости и насыпной плотности горной массы, описываемые степенной функцией с линейным и степенным ограничением на соответствующие коэффициенты, позволяющие оценивать величину усилия копания экскаватора для конкретных условий экскавации реального забоя решением обратной задачи, предотвращая перегрузки приводов данных последнего использованием данных о кусковатости в забое на основании машинного зрения.

4. На основе численного моделирования выявлены функции изменения величины усилия сопротивления копанию от величин насыпной плотности и кусковатости горной массы, применение которых показало, что уменьшение плотности или кусковатости на 25 % ведет к снижению усилия на 25 % и 32 % соответственно, а при их аналогичном увеличении усилие копания возрастает на 33 % и 35 %.

5. Разработаны рекомендации по выбору средней радиально-линейной траектории копания с углом наклона  $70-80^\circ$  при дифференцированной отработке смежных забойных блоков со снижением  $k_{pp}$  до 0,82, а также корректировке периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта единичного экскаватора с учетом условий функционирования посредством коэффициента расходования ресурса приводами подъема и напора.

6. Разработан алгоритм, позволяющий оценить силовые характеристики в цикле работы экскаватора в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях эксплуатации, разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ, что подтверждено получением свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024665458 «Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы».

7. Результаты диссертации приняты к использованию в деятельности ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» при разработке эксплуатационной и ремонтной документации в виде: рекомендаций по выбору рационального режима работы карьерного экскаватора с учетом траектории копания, плотности и кусковатости горной массы; коэффициента расходования ресурса приводами подъема и напора, использование которого позволяет обоснованно проводить корректировку периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта единичного экскаватора с учетом условий функционирования.

8. Перспективным направлением дальнейших исследований является продолжение изучения приводов подъема и напора, а также приводов хода и поворота карьерного экскаватора в целом как единого объекта с планированием выработки рациональной структуры и периодичности мероприятий ТОиР в конкретных условиях эксплуатации.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Иванов, С.Л. Классификация средств разрушения негабарита при ведении открытых горных работ / С.Л. Иванов, **Е.И. Шешукова**, Е.С. Недашковская // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 138-143. DOI 10.26160/2658-3305-2023-19-138-143.

2. Структура системы технического обслуживания и ремонта горных машин / Е.С. Недашковская, **Е.И. Шешукова**, А.С. Корогодин [и др.] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 25. – С. 155-162. DOI 10.26160/2658-3305-2024-25-155-162.

3. Моделирование процесса копания ковшом экскаватора породы при заданной величине стружки / **Е.И. Шешукова**, В.А. Плащинский, А.Э. Салимов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № S21. – С. 3-12. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_21\_3.

4. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 3) / **Е.И. Шешукова**, Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, А.Э. Салимов // Горная промышленность. – 2025. – № 2. – С. 132-138. – DOI 10.30686/1609-9192-2025-2-132-138.

5. Численное моделирование процесса копания ковшом экскаватора методом дискретных элементов / В.А. Плащинский, **Е.И. Шешукова**, А.Э. Салимов [и др.] // Горная промышленность. – 2025. – № 4. – С. 144-150. – DOI 10.30686/1609-9192-2025-4-144-150.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

6. Эффективность функционирования карьерного экскаватора, как эргатической системы / Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, **Е.И. Шешукова**, Е.С. Недашковская // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 144–158. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_144.

7. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 1) / **Е.И. Шешукова**, Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, Е.С. Недашковская // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 143-148. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-3-143-148.

8. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2) / **Е.И. Шешукова**, Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, П.В. Шишкин // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 108-114. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-4-108-114.

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665458. Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы. Заявка № 2024663807 : заявл. 18.06.24 : опубл. 02.07.2024 / **Е.И. Шешукова**, С.Л. Иванов, И.И. Пырсенков; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

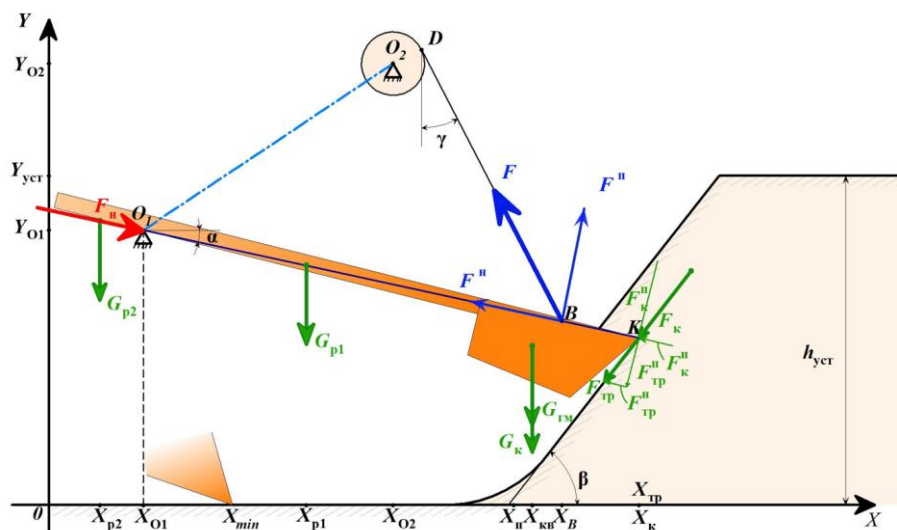


Рисунок 1 - Схема для оценки нагрузок рабочего оборудования экскаватора

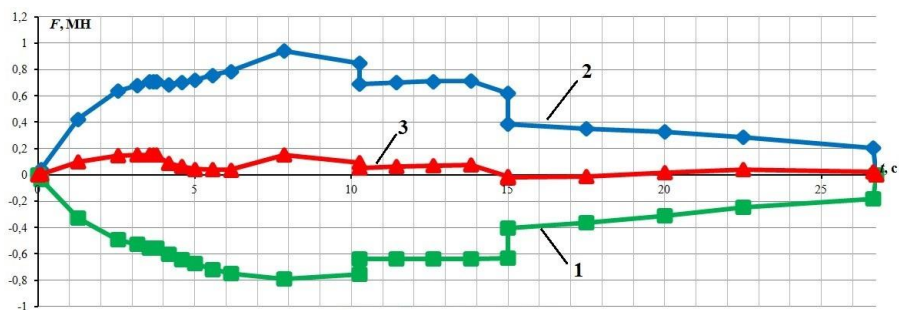


Рисунок 2 - Изменение усилий  $F''$ , создаваемых подъемной лебедкой экскаватора ЭКГ-18Р в цикле при угле  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной

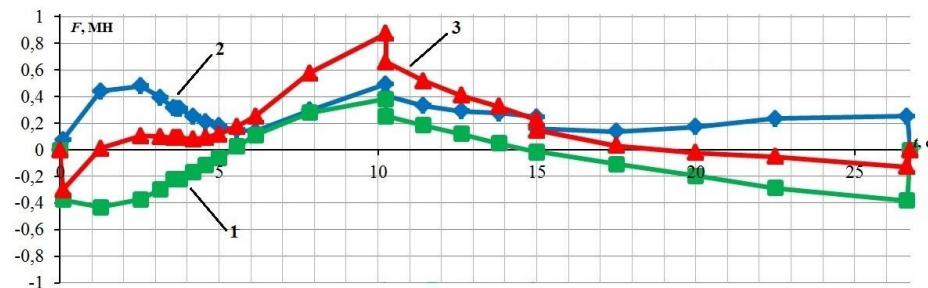


Рисунок 3 - Изменение усилий  $F''$ , создаваемых подъемной лебедкой экскаватора ЭКГ-18Р в цикле при угле  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной

Таблица 1 - Относительная величина суммарного усилия в канатах подъемной лебедки для заданной траектории

Характерные точки цикла	Угол наклона траектории движения ковша ( $\beta$ ), $^\circ$								
	60			70			80		
t, с	ТБ	ТС	ТД	ТБ	ТС	ТД	ТБ	ТС	ТД
3,76	1,626	1,676	1,729	1,640	1,621	1,631	2,007	1,571	1,795
5,0	1,638	1,647	1,662	1,906	1,701	1,836	1,966	1,743	1,969
7,85	2,110	2,158	2,269	2,231	2,291	2,439	2,243	2,360	2,575
10,25(1)	2,019	2,130	2,268	1,958	2,097	2,346	2,113	2,087	2,390
10,25(2)	1,668	1,760	1,875	1,508	1,628	1,824	1,538	1,556	1,797
12,625	1,713	1,747	1,796	1,635	1,699	1,746	1,596	1,669	1,719
15,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
25,0	0,667	0,700	0,790	0,854	0,941	0,990	0,916	0,960	1,129


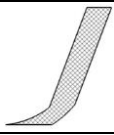

Сумма	12,44	12,82	13,38	12,73	12,97	13,81	13,38	12,94	14,37
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Таблица 2 - Относительная величина напорного усилия

Характерные точки цикла	Угол наклона траектории движения ковша ( $\beta$ ), °								
	60			70			80		
$t$ , с	ТБ	ТС	ТД	ТБ	ТС	ТД	ТБ	ТС	ТД
3,76	0,206	0,418	0,631	0,031	0,381	0,731	0,082	0,381	1,151
5,0	0,283	0,551	0,811	0,051	0,593	1,369	0,346	0,661	1,834
7,85	2,026	2,795	3,961	0,354	2,291	4,198	0,852	1,823	4,529
10,25(1)	4,570	5,292	6,014	2,050	4,282	6,033	0,458	3,257	5,890
10,25(2)	3,326	3,925	4,527	1,332	3,027	4,412	0,438	2,334	4,350
12,625	2,252	2,515	2,806	1,535	2,130	2,730	1,072	1,866	2,690
15,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
25,0	0,866	0,877	0,628	0,357	0,276	0,297	0,175	0,159	0,082

Сумма	14,53	17,37	20,37	6,71	13,97	20,76	4,42	11,48	21,52
-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------

Таблица 3 - Значение работы, совершаемой двигателями подъема и напора соотношенной к базовой величине (для подъема 7500 кДж, для напора 1500 кДж)

Угол наклона	Двигатель	Траектория			Фигура площади сечения забоя
		ТБ	ТС	ТД	
60°	Подъем	0,91	0,87	0,83	
	Напор	1,41	1,83	2,19	
70°	Подъем	1,08	1,00	0,91	
	Напор	0,50	1,03	1,75	
80°	Подъем	1,14	1,07	0,99	
	Напор	0,43	0,57	1,44	

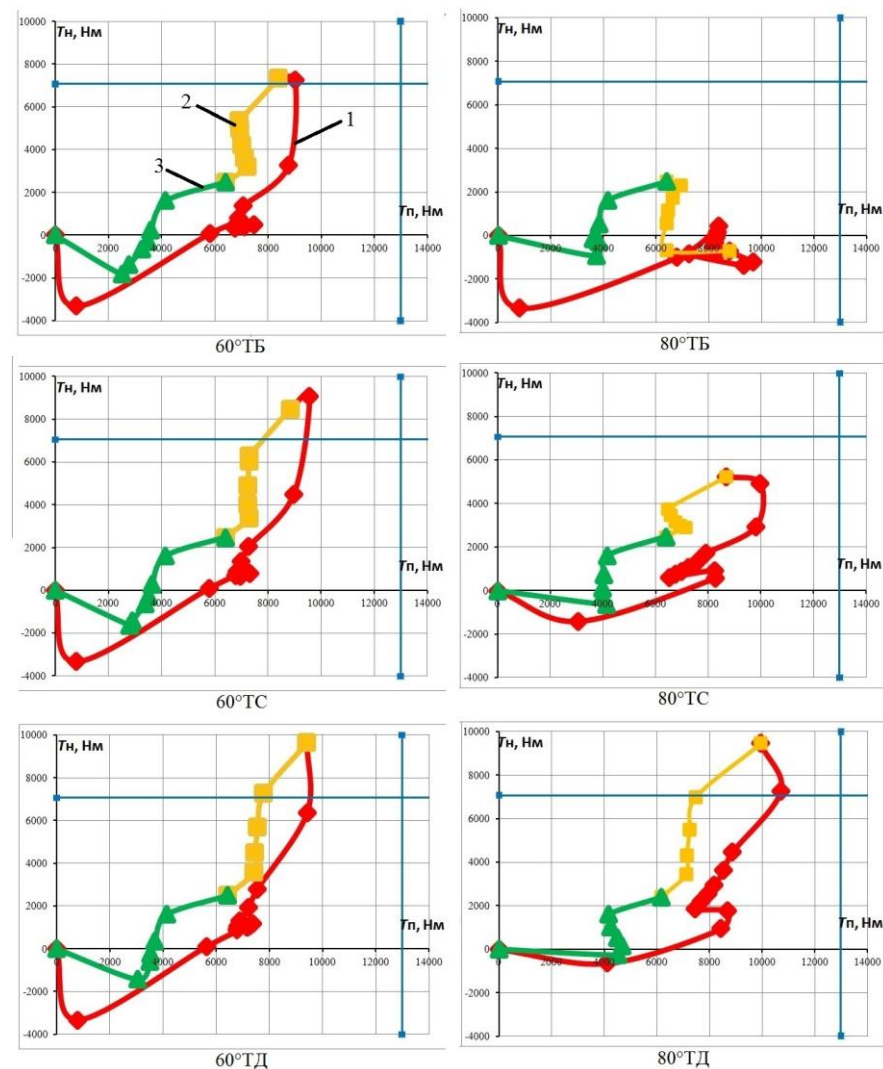


Рисунок 4 - Взаимосвязь подъема и напора в двигателях экскаватора ЭКГ-18Р при разных траекториях обработки уступа

Таблица 4 - Показатели работы приводов подъема и напора с линейно-наклонной и радиально-линейной траекториями при отработке забойного блока

Наименование показателя	Линейно-наклонная			Радиально-линейная		
	Угол наклона траектории			Угол наклона части траектории		
	60°	70°	80°	60°	70°	80°
Отрабатываемый единичный объем, м <sup>3</sup>	57,2	135,2	199,8	114,1	145,6	170,1
Условная стружка, м	0,29	0,31	0,33	0,26	0,26	0,27
Количество циклов $n$ с одного установка, шт	5	10	14	10	15	19
Средняя работа за цикл, кДж	15713	16564	17035	15359	14378	13237
Работа на $n$ циклов, кДж	78565	165648	238490	153599	215684	251517
Удельная работа, кДж/м <sup>3</sup>	1373,5	1225,2	1193,6	1346,2	1481,3	1478,6
Средняя мощность за цикл, кВт	587,4	616	636,8	574,2	537,5	494,8
Коэффициент расходования ресурса $k_{pp}$	1,02	1,07	1,11	1	0,94	0,86

Таблица 5 - Корректировка годового план-графика проведения ППР при  $k_{pp} = 1,11$  по отношению к плановому при  $k_{pp} = 1,0$

Годовой план-график при $k_{pp} = 1,11$												
	I квартал			II квартал			III квартал			IV квартал		
	янв	фев	мар	апр	май	июнь	июль	авг	сен	окт	ноя	дек
План			ТР1		ТР2		ТР1			ТР3		ТР1
Факт			ТР1		ТР2		ТР1		ТР3		ТР1	

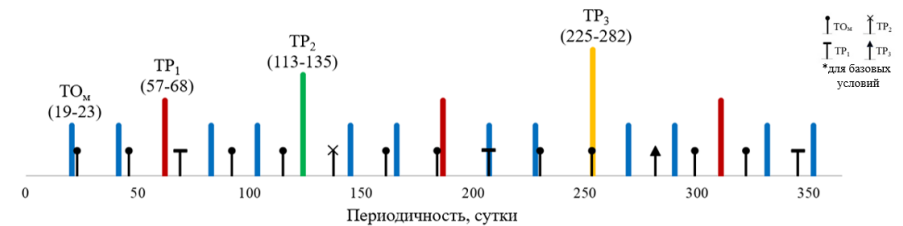


Рисунок 5 - График проведения ППР при  $k_{pp} = 1,11$

Таблица 6 - Корректировка годового план-графика проведения ППР при  $k_{pp} = 0,86$  по отношению к плановому при  $k_{pp} = 1,0$

Годовой план-график при $k_{pp} = 0,86$												
	I квартал			II квартал			III квартал			IV квартал		
	янв	фев	мар	апр	май	июнь	июль	авг	сен	окт	ноя	дек
План			ТР1		ТР2		ТР1			ТР3		ТР1
Факт			ТР1			ТР2		ТР1			ТР3	

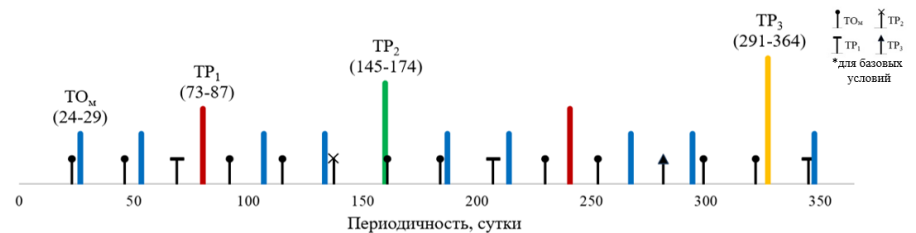


Рисунок 6 - График проведения ППР при  $k_{pp} = 0,86$

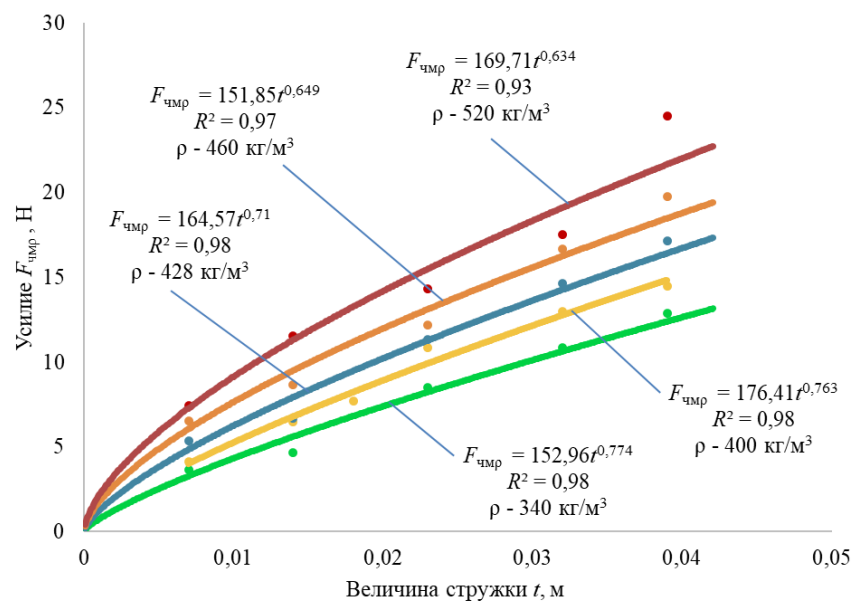


Рисунок 7 - Изменения величины усилия копания  $F_{чмр}$  при моделировании от величины условной стружки  $t$  при заданных значениях насыпной плотности

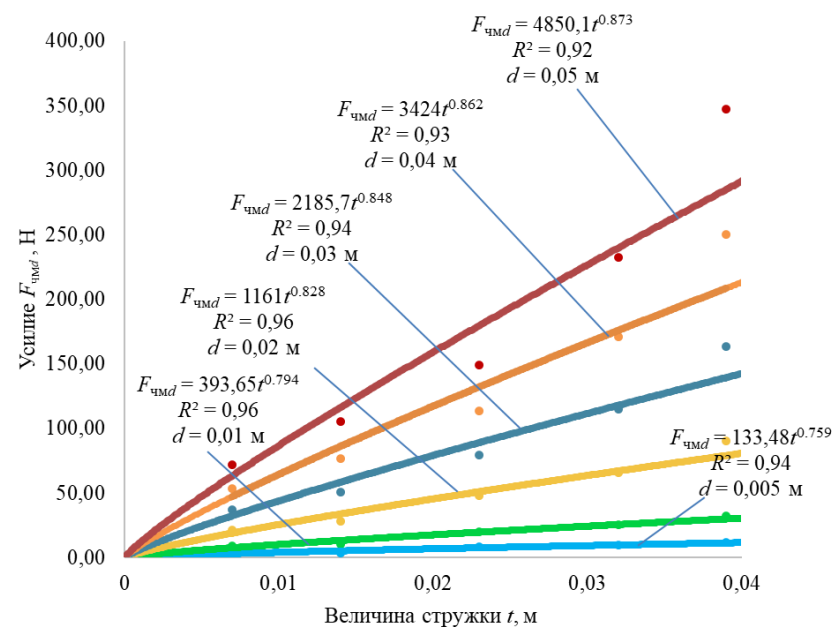


Рисунок 8 - Изменения величины усилия копания  $F_{чмд}$  при моделировании от величины условной стружки  $t$  при заданных значениях кусковатости