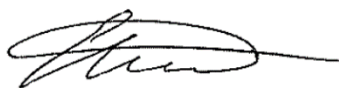


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Иванов С.Л.

Санкт-Петербург – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Открытые горные работы, геотехнология и горное оборудование .....	12
1.2 Карьерные экскаваторы как основное оборудование карьеров .....	24
1.2.1 Виды экскаваторов, применяющихся на карьерах .....	24
1.2.2 Факторы, влияющие на работу экскаватора типа ЭКГ .....	27
1.2.3 Особенности процесса экскавации .....	29
1.3 Оценка производительности экскаватора с учетом влияющих факторов .....	31
1.3.1 Горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации экскаватора .....	33
1.3.2 Качество подготовки забоя и горной массы .....	35
1.3.3 Организация ведения горных работ.....	37
1.3.4 Климатические факторы .....	38
1.3.5 Управление экскаватором.....	39
1.3.6 Техническое состояние экскаватора .....	41
1.4 Нагрузки на рабочее оборудование карьерных экскаваторов.....	42
1.4.1 Усилия, действующие на систему рабочего оборудования карьерного экскаватора .....	42
1.4.2 Влияние перегрузок на состояние экскаватора .....	44
1.5 Ресурс карьерного экскаватора как единой системы. Мероприятия по восстановлению ресурса экскаватора .....	44
1.5.1 Энергетический подход к оценке ресурса карьерного экскаватора .....	45
1.5.2 Структура мероприятий технического обслуживания и ремонта .....	46
1.5.3 Уточнение графика проведения мероприятий ТОиР как инструмент восстановления ресурса экскаватора .....	49
1.6 Оценка факторов нагружения средствами моделирования.....	51
1.6.1 Физическое моделирование .....	51
1.6.2 Численное моделирование .....	52

1.7 Выводы по Главе 1. Задачи исследования.....	54
<b>ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ПРИВОДОВ ПОДЪЕМА И НАПОРА ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-18Р .....</b>	<b>57</b>
2.1 Влияние технологических факторов эксплуатации на работу карьерного экскаватора.....	57
2.2 Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора для нормальных условий.....	60
2.2.1 Нагрузки на приводе подъема .....	60
2.2.2 Нагрузки привода напора.....	68
2.2.3 Значение крутящих моментов .....	71
2.2.4 Изменение работы, совершаемой двигателями подъема и напора.....	73
2.3 Оценка нагрузок при радиально-линейной траектории.....	77
2.4 Определение коэффициента расходования ресурса.....	81
2.5 Корректировка графика ТОиР по результатам наработки для повышения срока службы экскаватора.....	83
2.6 Выводы по Главе 2.....	84
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ.....</b>	<b>85</b>
3.1 Планирование эксперимента.....	85
3.2 Физическое моделирование процесса экскавации .....	85
3.2.1 Подбор критериев подобия для лабораторного эксперимента .....	85
3.2.2 Описание стенда, подготовка оборудования и проведение серии предварительных экспериментов .....	88
3.2.3 Результаты физического моделирования копания ковшом экскаватора .	94
3.3 Численное моделирование процесса экскавации .....	96
3.3.1 Создание модели и ее калибровка.....	96
3.3.2 Изменение величины усилия копания при заданной насыпной плотности .....	104
3.3.3 Изменение величины усилия копания при заданной кусковатости .....	105

3.3.4 Изменение величины усилия копания при заданных насыпной плотности и кусковатости экскавируемого сырья .....	106
3.4 Выводы по Главе 3 .....	108
<b>ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА УЧЕТОМ ТРАЕКТОРИИ КОПАНИЯ И КУСКОВАТОСТИ УГЛЯ .....</b>	<b>109</b>
4.1 Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы .....	109
4.2 Коэффициент расходования ресурса как инструмент по восстановлению ресурса экскаватора .....	112
4.3 Подбор траектории копания (обратная задача) .....	115
4.4 Оценка изменения усилия копания с прибором машинного зрения в реальном времени.....	116
4.5 Отработка забоя на угольных разрезах с дифференцированной отработкой смежных забойных блоков.....	120
4.6 Выводы по Главе 4.....	123
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>125</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертации .....</b>	<b>149</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>	<b>151</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Программа для ЭВМ: «Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы» .....</b>	<b>153</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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. Hendricks, 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 кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665458, Приложение Б).

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 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, Приложение А).

### **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 результатов** обусловлена представительным объемом достоверной статистической информации, построении 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:

1. XXI Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (06-07 апреля 2023 года, г. Екатеринбург).

2. IX Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2023: актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (14-16 ноября 2023 года, г. Пермь).

3. XXII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (02-05 апреля 2024 года, г. Екатеринбург).

4. 82-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (22-26 апреля 2024 года, г. Магнитогорск).

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

6. X Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2024: актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (12-14 ноября 2024 года, г. Пермь).

7. XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (01-07 декабря 2024 года, г. Санкт-Петербург).

8. XXIII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (03-04 апреля 2025 года, г. Екатеринбург).

9. 83-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (21-25 апреля 2025 года, г. Магнитогорск).

10. XI Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2025: повышение эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (11-13 ноября 2025 года, г. Пермь).

**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 (пункты списка литературы № 43, 44, 65, 75-78, 102, 116, 118-122, 124), 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, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 97, Приложение Б).

### **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.

## ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Открытые горные работы, геотехнология и горное оборудование

В России открытым способом добывается более 65 % угля, до 80-90 % руд черных и цветных металлов, золота, алмазов и строительных материалов [68].

Согласно В.В. Ржевскому при добыче полезных ископаемых на карьерах все работы делят согласно основным производственным процессам: буровзрывная подготовка, выемка и погрузка, транспортировка и складирование как для пустых пород, так и полезных ископаемых [94].

Подготовка массива к выемке включает в себя геолого-маркшейдерские работы, разметку блоков, бурение скважин или шпуров под заряды, зарядка и массовые взрывы для дробления массива. Далее производится выемка и погрузка отбитой горной массы (руда и вскрыша). Разработка ведется экскаваторами, фронтальными погрузчиками или драглайнами с последующей погрузкой в транспорт или перегрузочные устройства для дальнейшей транспортировки. Доставка полезного ископаемого на переработку и пустых пород в отвалы осуществляется автомобильным, железнодорожным, конвейерным или смешанным видом транспорта. Финальной операцией является формирование отвалов пустых пород и складов сырья.

Технология ведения открытых горных работ определяется углом падения залежи. Как правило выделяют:

- пологие и горизонтальные залежи (угол падения до  $8-10^\circ$ ) – пустые породы складироваться в выработанном пространстве (рисунок 1.1, а);
- наклонные залежи (угол падения от  $8-10^\circ$  до  $25-30^\circ$ ) – выемка пустых пород лежачего бока залежи не производится (рисунок 1.1, б);
- крутые залежи (угол падения более  $30^\circ$ ) – производится выемка вмещающих пород и всячего, и лежачего боков (рисунок 1.1, в);
- сложные залежи (характеризуются переменным углом падения) [93, 94, 98].

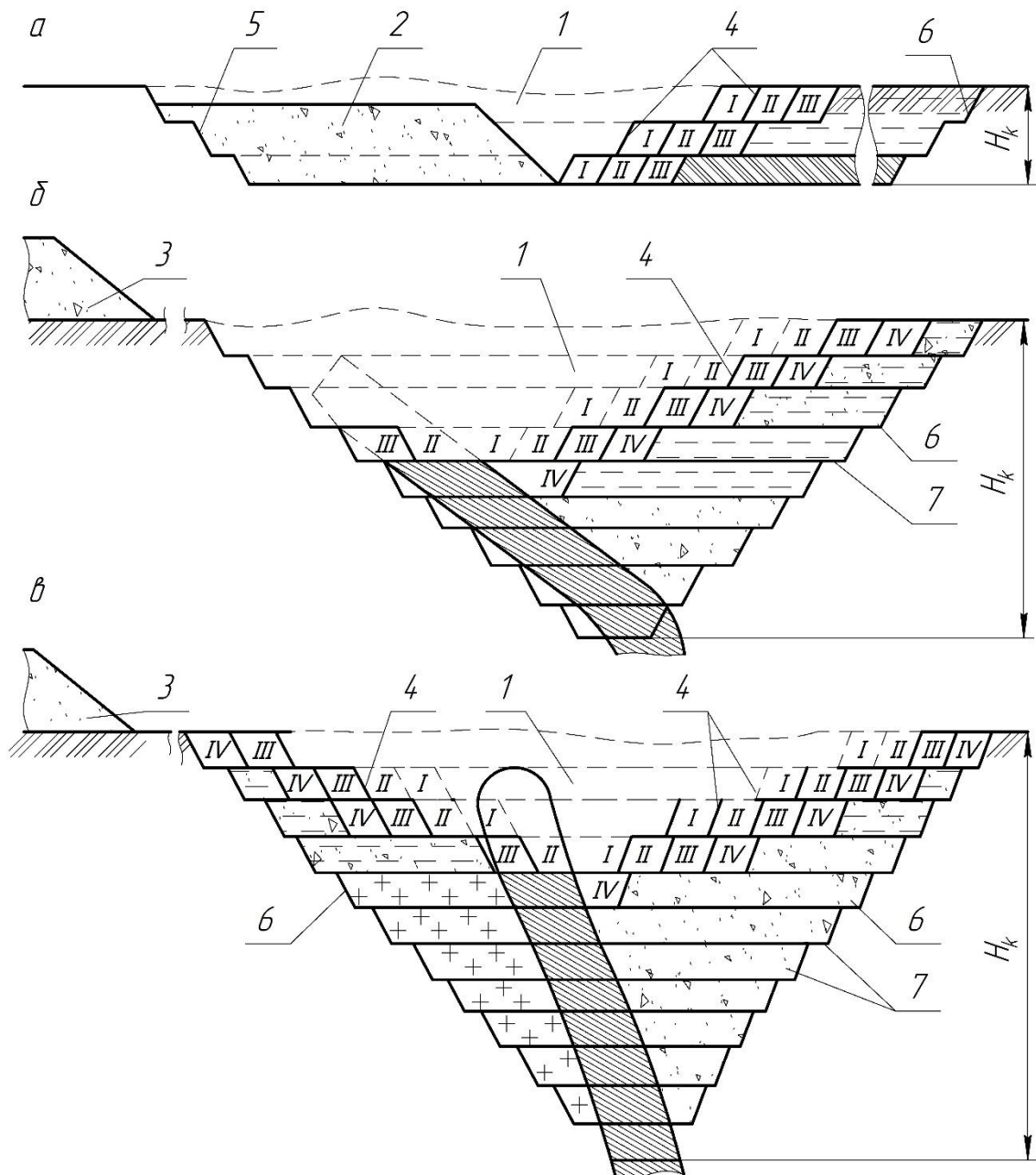


Рисунок 1.1 – Схемы открытой разработки залежей [93]:

I-IV – последовательность развития работ на уступах;

а – горизонтальная залежь; б – наклонная залежь; в – крутая залежь;

1 – выработанное пространство; 2 – внутренние отвалы; 3 – внешние отвалы;

4 – рабочий борт; 5 – нерабочий борт; 6 – конечный контур карьера;

7 – бермы

Для угольных месторождений характерны горизонтальные и пологие залежи, в плане угольные пласты имеют значительные размеры, при этом мощность пластов чаще всего различна, и они имеют сложное строение [60, 73].

Е.Ф. Шешко [91] разработана классификация систем открытой разработки, в которой эти системы подразделяют на группы согласно технологиям вскрышных работ на:

Группа А – системы с поперечным перемещением породы в отвал без транспортных средства:

А-0 – с незначительным объемом вскрышных работ, когда способы перемещения породы в отвал не имеют существенного значения;

А-1 – с непосредственной перевалкой вскрышных пород;

А-2 – с кратной экскаваторной перевалкой вскрышных пород;

А-3 – с забойными отвалообразователями;

Группа Б – системы с продольным (фронтальным) перемещением породы в отвалы при помощи транспортных средств:

Б-4 – с транспортированием породы на внутренние отвалы на сравнительно короткие расстояния по путям с благоприятным профилем;

Б-5 – с транспортированием породы на внешние отвалы на более значительное расстояние обычно по путям с неблагоприятным профилем;

Б-6 – с транспортированием породы частично на внутренние и частично на внешние отвалы;

Группа В – комбинированные системы:

В-7 – с частичным транспортированием породы на внутренние или внешние отвалы;

В-8 – с частичным бестранспортным перемещением породы на внутренние отвалы [91].

Б.Р. Ракишевым предложена классификация технологий открытой разработки полезных ископаемых, представленная на рисунке 1.2 [89].

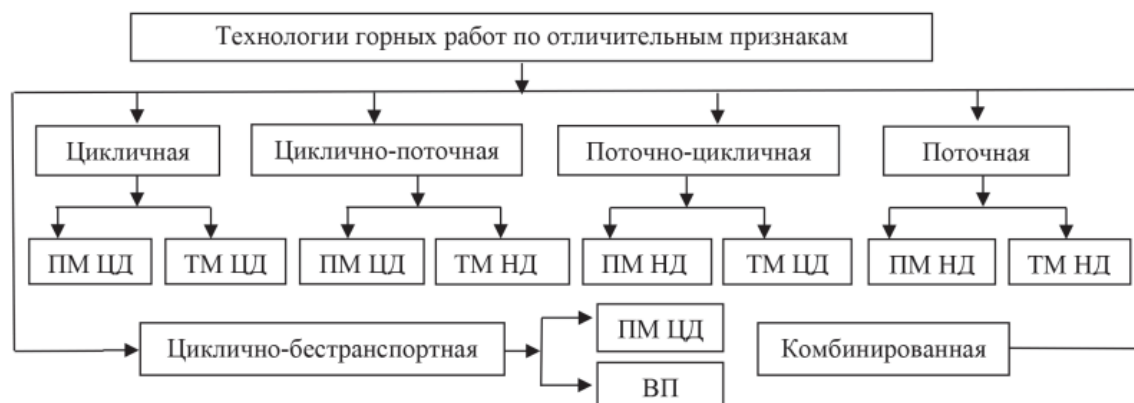


Рисунок 1.2 – Структура технологий открытой разработки полезных ископаемых [89]: ПМ – выемочно-погрузочные машины, ТМ – транспортные машины, ЦД – циклическое действие, НД – непрерывное действие, ВП – выработанное пространство

Технологии добычи полезных ископаемых по типу технологического потока при открытых горных работах можно разделить на следующие группы [89]:

- циклическая технология представлена отдельными машинами циклического действия на операциях как погрузки, так и транспорта (экскаватор – автосамосвал, экскаватор – железнодорожный состав), которые просты в организации, но могут давать неравномерный поток поступающей горной массы [90];

- поточная технология представлена непрерывными машинами и комплексами (роторные экскаваторы и конвейеры), обеспечивающими устойчивый поток горной массы и высокую производительность;

- комбинированная технология (циклично-бестранспортная, циклично-поточная и поточно-циклическая) представлена комбинацией экскаваторов и транспорта с перегрузочными пунктами и конвейерами, снижающими транспортные издержки и повышающими эффективность добычи горной массы [41, 87, 89, 99].

В таблице 1.1 представлено сравнение основных технологических схем по типу технологического потока.

Таблица 1.1 – Сравнение основных технологических схем по типу технологического потока (составлено автором)

Признак	Технология открытой разработки		
	Цикличная	Поточная	Комбинированная
Непрерывность потока	Прерывистый, зависит от рейсов техники	Близок к непрерывному	Повышенная по сравнению с чисто цикличной технологией
Основное оборудование	Экскаваторы, автосамосвалы, железнодорожный транспорт	Роторные экскаваторы, конвейеры, отвалообразователи	Экскаваторы и конвейеры через перегрузочные пункты
Капиталовложения и гибкость	Ниже стартовые, высокая гибкость трасс	Выше капиталовложения, меньше гибкость трасс	Средние капиталовложения, баланс гибкости и себестоимости
Область применения	Средние и малые карьеры, сложный рельеф	Крупные карьеры с большими объемами вскрыши и руды	Крупные и средние карьеры, стремящиеся снизить транспортные расходы

Также работы по добыче полезных ископаемых открытым способом делят на отдельные группы в зависимости от технологии подготовки/выемки горной массы.

Так буровзрывные технологии позволяют эффективно дробить крепкие породы и формировать уступы с требуемыми параметрами. Технология заключается в формировании глубоких и коротких скважин с последующим помещением в них взрычатых веществ и дифференцированным, короткозамедленным взрыванием.

Безвзрывные (механические) технологии применяются при разработке мягких или средних по крепости пород с уменьшенными вибрациями, шумом и малой зоной влияния подготовительных работ. При такой технологии применяются высокопроизводительные экскаваторы, гидромолоты, фрезы и карьерные комбайны, которые взаимодействуют с горным массивом без предварительного рыхления [68].

Также существуют специализированные методы селективной выемки тонких рудных прослоев, в том числе раздельное бурение и взрывание, которое направлено на сокращение разубоживания руды.

Для угольных месторождений при открытой разработке обычно применяют несколько типичных технологических схем, отличающихся способом перемещения вскрыши и угля и составом оборудования.

Экскаваторно-автомобильная схема отличается тем, что вскрыша и уголь отрабатываются экскаваторами (иногда драглайнами), погрузка производится в автосамосвалы, вывоз вскрыши происходит во внешние или внутренние отвалы, а уголь направляется на склад или обогатительную фабрику. Такая схема отличается высокой маневренностью и широко применяется на средних и малых разрезах, а также в сложных горно-геологических условиях и при расчленённом рельефе.

При экскаваторно-железнодорожной схеме погрузка вскрышных пород и угля производится экскаваторами в железнодорожные составы с последующей доставкой во внешние отвалы и на переработку. Она эффективна на крупных разрезах с большими плечами транспортирования и устойчивыми объёмами добычи, но требует развитой железнодорожной инфраструктуры.

Циклично-бестранспортная схема заключается в том, что вскрышные породы выбираются карьерными экскаваторами и через перегрузочные пункты подаются конвейерами на отвалообразователи, которые формируют внутренние и внешние отвалы без участия автомобильного и железнодорожного транспорта. Такая схема снижает трудоёмкость и себестоимость вскрышных работ в несколько раз по сравнению с чисто транспортными схемами и особенно эффективна при возможности размещения отвалов в выработанном пространстве.

При применении роторно-конвейерной схемы роторные экскаваторы непрерывного действия отрабатывают мягкие и слабоскальные вскрышные породы и угольные пласты, а горная масса поступает на ленточные конвейеры и далее на отвалы или перегрузочные узлы.

Комбинированные схемы являются сочетанием вышеописанных технологий. В таких схемах используют оборудование и транспорт разного типа на отдельных

участках для оптимизации затрат и обеспечения гибкости технологического потока.

Для сложностроенных и крутых пластов применяют бестранспортные способы с перевалкой вскрыши в выработанное пространство, а также блоковую отработку с внутренними отвальными ярусами [14].

Открыто-подземные технологии сочетают открытую добычу угля с шнекобуровой или иной подземной выемкой пограничных и забалансовых запасов, снижая потери и повышая полноту использования месторождения [48].

Выемка породы в карьере осуществляется заходками (последовательной отработки полосы породы), которые подразделяются на:

- продольные (рисунок 1.3, а), осуществляются вдоль фронта горных работ, применяются при любом виде выемочного и транспортного оборудования;
- поперечные (рисунок 1.3, б), осуществляются поперек фронта горных работ;
- диагональные (рисунок 1.3, в), осуществляются под углом к направлению фронта горных работ.

Поперечные и диагональные заходки применяются только при конвейерном и автомобильном способах транспортирования вскрыши и угля.

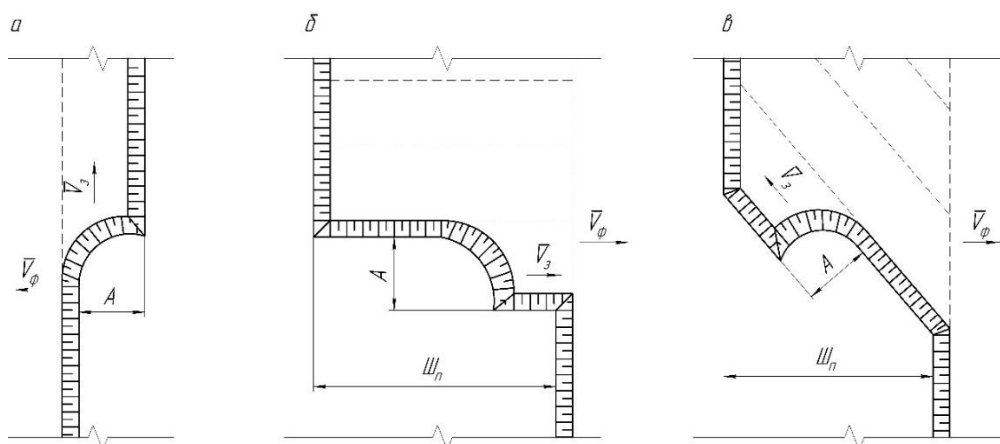


Рисунок 1.3 – Типы заходок:

а – продольная; б – поперечная; в – диагональная (стрелками показаны направления перемещения забоя и фронта горных работ); Ш<sub>п</sub> – ширина панели

Основными параметрами заходки является высота ( $H$ ) и ширина ( $A$ ), которые зависят от применяемого оборудования. Высота заходки равна высоте уступа ( $H_y$ ), при выемке экскаватором они определяются высотой его копания. Также при выемке экскаватором, согласно максимальному использованию его рабочих параметров при прямолинейном движении вдоль фронта горных работ, заходки делят по ширине на [107]:

- нормальные  $A_n$  (рисунок 1.4, а), максимальное использование параметров экскаватора;
- узкие  $A_y$  (рисунок 1.4, б), неполное использование параметров экскаватора;
- широкие  $A_{ш}$  (рисунок 1.4, в), характеризуется зигзагообразным движением экскаватора вдоль фронта горных работ.

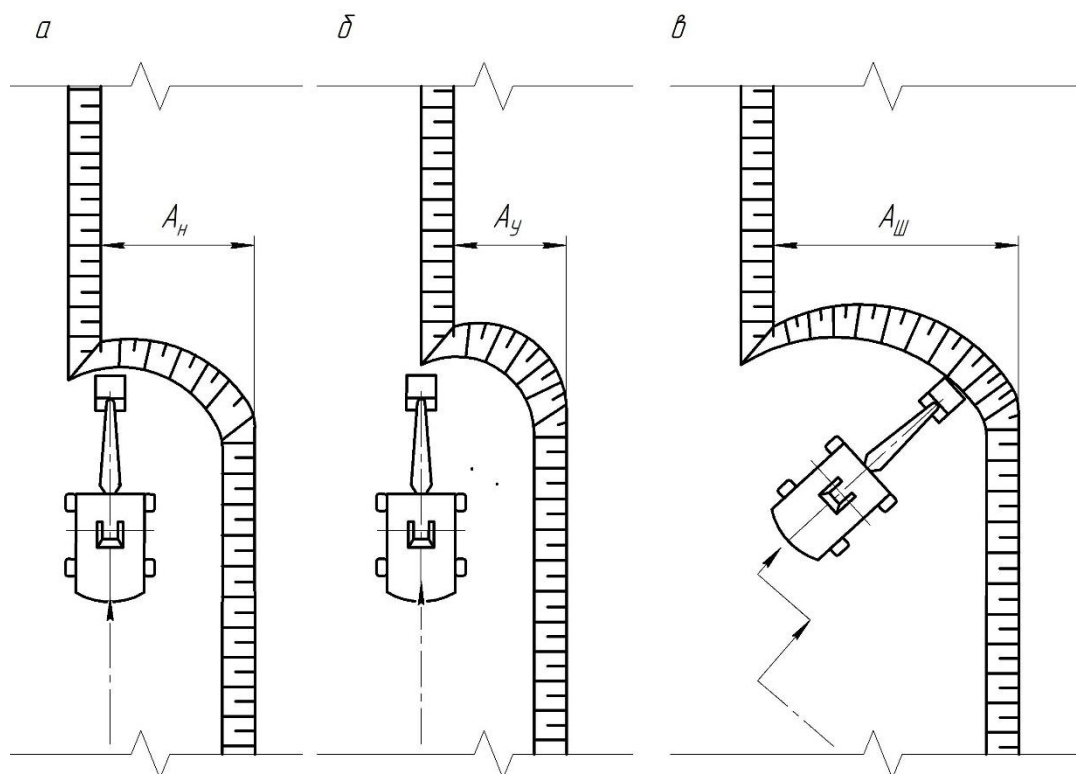


Рисунок 1.4 – Заходки (составлено автором):

а – нормальной ширины; б – узкие; в – широкие

Способы выемки породы различными видами экскаваторов определяют согласно взаиморасположению забоя и экскаватора. При верхнем черпании забой расположен выше экскаватора, при этом разделяют нижнюю (рисунок 1.5, а) и верхнюю погрузку (рисунок 1.5, б), когда транспорт расположен на нижней и верхней площадке уступа, соответственно.

При нижнем черпании (рисунок 1.5, в) экскаватор расположен на верхней площадке уступа, при этом погрузка осуществляется только на верхней площадке. Такой способ характерен только для драглайнов, гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» и цепных многоковшовых экскаваторов.

Смешанное черпание (рисунок 1.5, г) предполагает собой комбинацию верхнего и нижнего черпаний с отработкой верхнего и нижнего уступа одним экскаватором, установленным на площадке между ними. Может осуществляться драглайнами, цепными полноповоротными экскаваторами и гидравлическими с условием смены рабочего оборудования с прямой на обратную лопату и обратно.

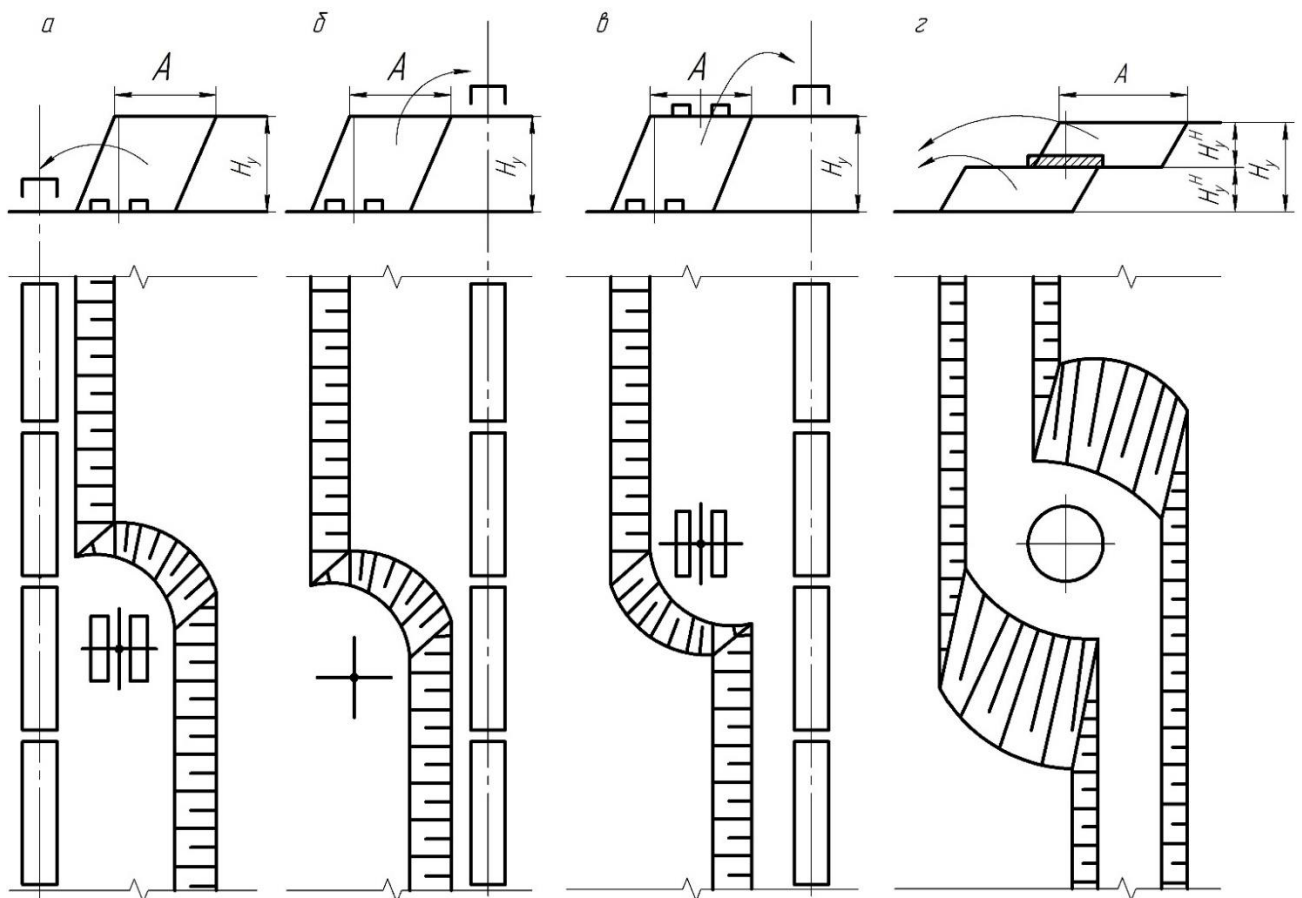


Рисунок 1.5 – Способы выемки и погрузки породы:

а – верхним черпанием с нижней погрузкой; б – верхним черпанием с верхней погрузкой; в – нижним черпанием с погрузкой на горизонте установки экскаватора; г – смешанным нижним и верхним черпанием (при перевалке породы во внутренний отвал) [107]

Для электрических экскаваторов типа ЭКГ применимы только две схемы – 1.5, а и 1.5, б.

При ведении горных работ на угольных разрезах определены типовые технологические схемы ведения горных работ при разработке уступа экскаватором типа прямая лопата с применением автомобильного транспорта:

- технология разработки уступа без предварительного рыхления (рисунок 1.6, а);
- технология разработки уступа за один проход с применением буровзрывных работ (рисунок 1.6, б);
- технология разработки уступа за два прохода с применением буровзрывных работ (рисунок 1.6, в).

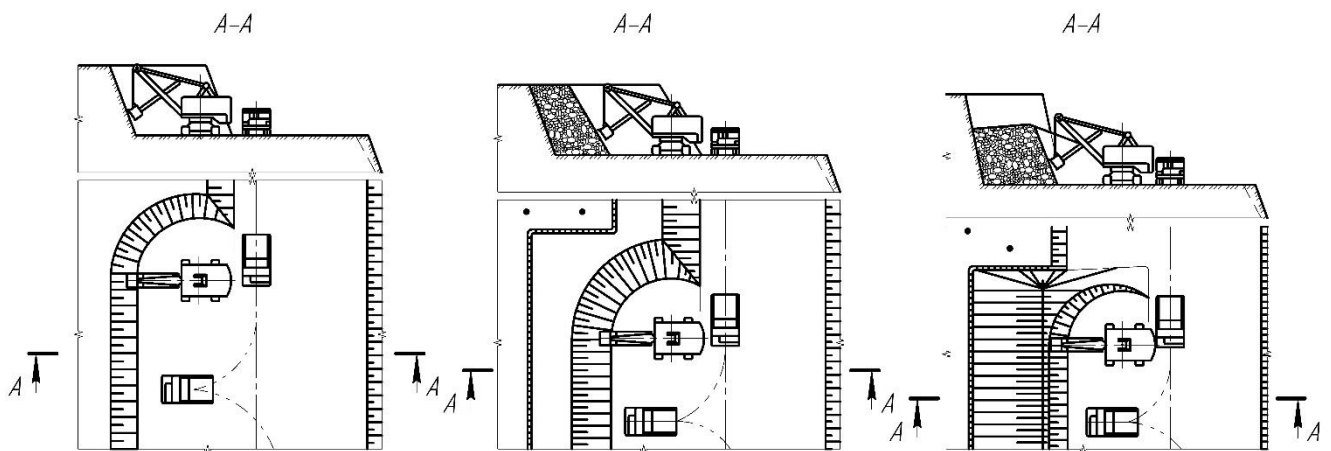


Рисунок 1.6 – Технологии разработки уступа экскаватором типа прямая лопата с применением автомобильного транспорта на угольных разрезах:

а – без предварительного рыхления, б – за один проход с применением буровзрывных работ, в – за два прохода с применением буровзрывных работ [108]

При этом с одного положения экскаватор может обработать зону, ограниченную его минимальным и максимальным радиусами черпания, именуемую забойным блоком (рисунок 1.7).

Одним из крупнейших угольных месторождений России и мира является Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс). Добыча угля ведется как подземным, так и открытым способом. Всего на территории бассейна насчитывается около 55 угольных разрезов, геологические характеристики некоторых представлены в таблице 1.2.

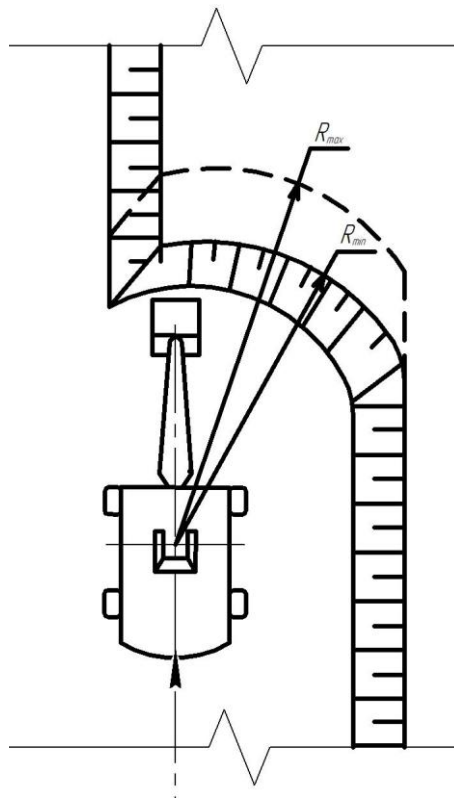


Рисунок 1.7 – Забойный блок (составлено автором)

Таблица 1.2 – Геологическая характеристика Кузнецкого угольного бассейна (составлено автором)

	Мощность залежи, м	Угол падения залежи, °
Кедровский угольный разрез		
Кемеровский	До 6	5-40
Волковский (нижняя пачка)	До 13	5-40
Волковский (верхняя пачка)	До 19	5-40
Моховский угольный разрез		
Моховское поле	1,7-9,2	3-18
Сартакинское поле	3-13	13-18
Караканское поле	2-10	20-30
Бачатский угольный разрез	1-66	50-85
Краснобродский угольный разрез		
Краснобродское поле	1,5-20	25-80
Новосергеевское поле	1,5-15	50-90
Вахрушевское поле	0,9-18,9	30-80
Талдинский угольный разрез		
Талдинское поле	2-20	9-24
Таежное поле	1-17	5-20
Ерунаковское	0,8-13	2-9

Угольные пласты разрезов Кузнецкого угольного бассейна характеризуются разнообразием углов залегания, сложны по своему строению и имеют существенный процент вскрыши. Поэтому большой объем работ направлен не только на добычу угля, но и на проведение вскрышных работ. Коэффициент вскрыши при открытой добыче угля на Кузбассе варьируется от 4 до 9 м<sup>3</sup>/т, среднее значение составляет 6,5 м<sup>3</sup>/т.

Вскрышные и добычные работы ведутся экскаваторами типа ЭКГ различного типоразмера. В таблице 1.3 представлена численность парка экскаваторов типа ЭКГ компании АО «УК «Кузбассразрезуголь» на разрезах Кузнецкого угольного бассейна.

Таблица 1.3 – Парк экскаваторов типа ЭКГ АО «УК «Кузбассразрезуголь» (составлено автором)

Типоразмер по объему ковша, м <sup>3</sup>	10-12	15-25	30-40
Количество экскаваторов	45	22	3

Основные параметры и показатели горных работ на примере филиала компании АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Краснобродский угольный разрез» представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры работы филиала «Краснобродский угольный разрез» (составлено автором)

	Краснобродское поле	Новосергеевское поле	Вахрушевское поле
Высота уступов, м	16	16	15
Ширина заходки, м	9,2-44	23,5-40	12-18
Ширина рабочих площадок, м	37-56	37-52	41-45,6
Угол откоса уступа, °:			
- по наносам	60	60	55
- по коренным	75	75	75
- по навалам	45	45	45
Высота яруса отвала, м	30	20-50	30-110

## **1.2 Карьерные экскаваторы как основное оборудование карьеров**

### **1.2.1 Виды экскаваторов, применяющихся на карьерах**

Самым известной горной машиной, применяемой на открытых горных работах угольных месторождений, заслуженно является экскаватор. Данный вид горной машины применяется на всех стадиях добычи угля открытым способом.

Экскаваторы, применяемые на карьерах, в первую очередь делят на одноковшовые и многоковшовые. Многоковшовые экскаваторы – роторные или цепные относят к машинам непрерывного действия, с их помощью разрабатывают в основном мягкие породы. Из-за своей конструкции и размеров они маломобильны, обладают низкой маневренностью, а также показывают низкую эффективность в условиях отрицательных температур.

При ведении открытых горных работ все одноковшовые экскаваторы можно отнести к двум основным группам, которые принципиально отличаются друг от друга и зависят от применяемого привода: электрические и гидравлические.

Гидравлический экскаватор является мощной машиной, которая за счет установленного дизельного двигателя развивает большие усилия на рабочем оборудовании. Также преимуществами экскаваторов гидравлического типа привода является его «независимость» от питания внешней сети, точность движения механизмов и быстрота переключения между режимами работы. Конструктивно гидравлические экскаваторы достаточно компактны, что позволяет использовать их в труднодоступных местах, поэтому они являются предпочтительными при селективной добыче сырья. Помимо этого, к ним поставляют различное сменное оборудование, которое можно использовать при проведении открытых горных работ (например, гидромолот для разрушения негабаритных кусков горной породы).

Также существуют строительные экскаваторы, которые имеют объем ковша от 0,4-0,5 до 3,0-4,0 м<sup>3</sup> [101]. При ведении открытых горных работ на крупных угольных разрезах строительные экскаваторы используются для вспомогательных работ или при необходимости проведения селективной выемки.

Однако, несмотря на свои преимущества, гидравлические экскаваторы имеют ряд недостатков, которые напрямую исходят из его типа привода. Во-первых, дизельный двигатель при своей работе имеет высокий уровень шума и вредные выхлопы как для человека, так и для окружающей среды в целом. Во-вторых, эксплуатация гидравлического привода при низких температурах требует дополнительных затрат на предварительный прогрев или использование специального арктического топлива. И в-третьих, гидравлический привод уступает по стоимости энергии электроприводу.

Экскаваторы с электрическим типом привода имеют значительно меньший уровень шума и совсем не производят выбросы в атмосферу в отличие от гидравлических. Их работа в значительно меньшей степени зависит от температуры окружающей среды. Кроме того, устройство электродвигателя проще и обеспечивает высокий ресурс работы и минимальное количество отказов.

Однако главным и, пожалуй, единственным существенным недостатком электрического экскаватора является его ограниченная мобильность из-за необходимости подключения к сети. В рамках работы экскаватора на одном карьере этот недостаток в значительной степени нивелируется.

Согласно ГОСТ Р 55165-2012 к горно-шахтному оборудованию, а именно экскаваторам одноковшовым карьерным с вместимостью ковша свыше 4 м<sup>3</sup> [32], относят экскаваторы типа ЭКГ и ЭШ.

ЭШ (экскаватор шагающий) или драглайн – это экскаватор типа «обратная лопата», ковш которого движется в направлении от забоя к экскаватору. Движение ковша производится системой подъемных и тяговых канатов.

Экскаваторы типа «драглайн» обладают большей массой и габаритами, низкой маневренностью, имеют ограниченную глубину копания, что снижает область их применения, которая сводится к разработке рыхлых и мягких горных пород, либо для ряда подготовительных вскрышных работ.

ЭКГ (экскаватор карьерный гусеничный) – это экскаватор типа «прямая лопата». Движение ковша и рукояти производится посредством системы канатов и лебедок подъема и напора.

Угольные месторождения разрабатываются, как правило, экскаваторами типа ЭКГ и гидравлическими экскаваторами [85]. Однако, большинство гидравлических экскаваторов, используемых на карьерах, производят за рубежом, при этом рынок ЭКГ представлен рядом отечественных производителей (например, ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова», АО «Уралмашзавод» и другие), которые поставляют экскаваторы не только в Россию, но и за рубеж [40].

Экскаваторы типа ЭКГ применяются на таких предприятиях как: СП Айхальский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирнинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», АО «Лебединский ГОК», Талнахская обогатительная фабрика (ТОФ) и ряда других [6, 8]. Экскаваторы типа ЭКГ являются наиболее универсальными по диапазону применения машинами [73] и находят широкое применение на угольных разрезах Сибири и Дальнего Востока (Красногорский, Междуреченский, Ерунаковский, Черемховский, Черногорский и другие).

По конструкции напорного механизма экскаваторы типа ЭКГ делят на две группы: с канатным напорным механизмом и с речным напорным механизмом.

Речный напорный механизм позволяет создавать большие напорные усилия, прост в конструкции, удобен и понятен в управлении. Однако все необходимое напорное оборудование у такого механизма располагается на стреле, что создает дополнительный изгибающий момент. Оборудование механизма канатного напора расположено на поворотной платформе.

Основной модельный ряд экскаваторов типа ЭКГ и их характеристики [2] представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики основного модельного ряда экскаваторов типа ЭКГ [2]

Характеристики	ЭКГ-12К	ЭКГ-15	ЭКГ-18Р	ЭКГ-20К	ЭКГ-32Р	ЭКГ-35К
Вместимость основного ковша, м <sup>3</sup>	12	15	18	20	32	35
Полезная нагрузка в ковше, т	24,0	32,5	38,0	40,0	57,6	57,6
Радиус копания*, м	18,6	22,6	21,8	22,6	24,0	24,0
Высота копания*, м	15,0	16,4	16,0	17,0	17,3	17,3
Радиус разгрузки*, м	16,5	20,0	19,0	19,5	20,2	20,2

## Продолжение Таблицы 1.5

Характеристики	ЭКГ-12К	ЭКГ-15	ЭКГ-18Р	ЭКГ-20К	ЭКГ-32Р	ЭКГ-35К
Высота разгрузки*, м	9,4	10,0	10,0	10,5	10,5	10,5
Продолжительность рабочего цикла**, с	26	28	27	27	30	30
Мощность***, кВт	700	1250	700	700	1700	1700
Эксплуатационная масса, т	410	672	710	700	950	950

\*указаны наибольшие значения радиуса и кинематической высоты

\*\*для угла поворота на разгрузку 90°

\*\*\*номинальная мощность двигателя

### 1.2.2 Факторы, влияющие на работу экскаватора типа ЭКГ

При добыче полезных ископаемых оборудование и машины, применяемые на открытых горных работах, подвержены негативному влиянию внешних факторов на их состояние. Работы проводятся в сложных климатических условиях, которые осложняются различными факторами (например, образование пыли).

Работоспособность карьерных экскаваторов (независимо от модели и завода-изготовителя) со временем имеет тенденцию к снижению из-за роста плановых и внеплановых ремонтных простоев. Пумпур Е.В. и др. [79] предлагает оценивать «весомость» влияющих условий через коэффициенты деградационных процессов ( $K_{дп}$ ), показывающие, как ускоряется ухудшение состояния техники при отклонении факторов от номинала.

Наиболее выраженное влияние оказывает «технический возраст»: при отклонении на 10 %  $K_{дп}$  составляет около 1,02, а максимум достигает 1,9 при «техническом возрасте» экскаватора порядка 14 лет. Также существенное влияние оказывают горно-геологические и горнотехнические условия: при переходе к более тяжелым породам (V группа)  $K_{дп}$  возрастает до 1,5, что отражает рост нагрузок и ускорение деградации узлов. Погодно-климатический фактор выражается слабее: при отклонении этого фактора на 10 % коэффициент  $K_{дп}$  составляет 1,01, но в «северных» условиях при высоком индексе погоды его влияние может достигать 1,11; среди ключевых факторов воздействия автор также отмечает солнечную радиацию, экстремальные температуры, влажность, ветер и осадки, включая туманы и метели.

Качество подготовки забоя и горной массы влияет на сопротивление копанию, характер которого является одним из основных факторов отказов рабочего оборудования. При ухудшении подготовки (рост доли негабарита и увеличение уклонов площадки) коэффициент  $K_{дп}$  возрастает до 1,21, а рост отказов при увеличении выхода негабарита описывается экспоненциальной зависимостью.

Несомненно, важен уровень и качество подготовки машиниста, управляющего экскаватором. Машинист отвечает не только за эксплуатацию машины, но и за регулярный осмотр ее состояния. При снижении уровня опыта машиниста (до стажа около 1 года)  $K_{дп}$  может достигать 1,9, тогда как для группы со стажем более 10 лет влияние заметно ниже (примерно 1,2 при отклонении на те же 10 %).

Немаловажной проблемой является качество и своевременность проведения технического обслуживания и ремонта экскаваторов. Несмотря на разные условия эксплуатации, для одного типоразмера/модели машин применяется единый график проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту, также качество и объем проведенных работ часто остается без необходимого контроля.

Однако, автор выделяет выбор правильной стратегии технического обслуживания и ремонта как возможный антидеградационный фактор. Например, комбинированная стратегия с *CM&R* (добросовестное обслуживание и ремонт) способна снижать скорость деградации ( $K_{дп} = 0,89$ ), тогда как переход от более прогрессивного подхода *Preventive maintenance* к менее прогрессивному *Reactive maintenance* ухудшает это состояние ( $K_{дп} = 1,13$ ).

На рисунке 1.8 представлена диаграмма изменения значений коэффициента деградационных процессов при отклонении рассматриваемых факторов влияния от номинала на 10 % и его максимальном значении.

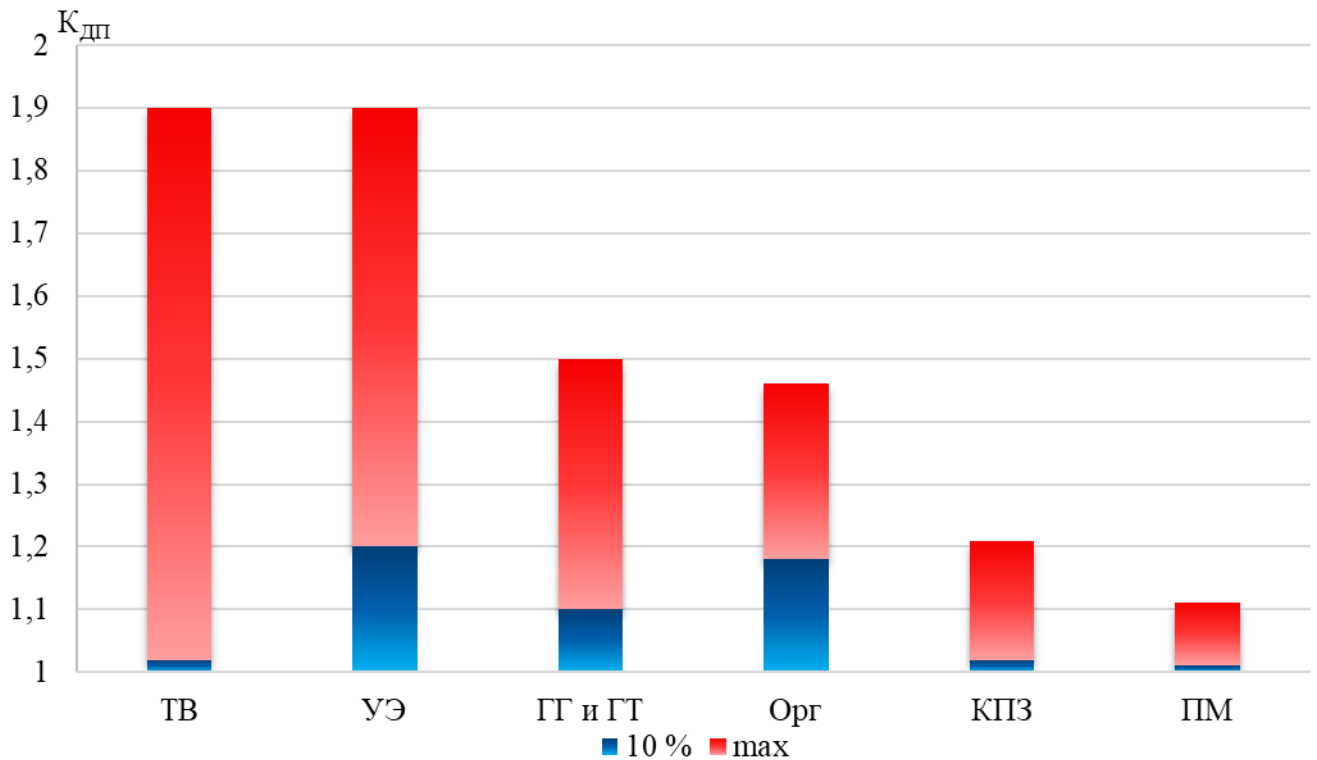


Рисунок 1.8 – Значение коэффициента деградационных процессов  $K_{дп}$  при отклонении рассматриваемого фактора от номинала на 10 % и его максимальном значении: ТВ – технический возраст; УЭ – фактор управления экскаватором; ГГ и ГТ – горно-геологический и горнотехнический фактор; Орг – организационный фактор; КПЗ – качество подготовки забоя и горной массы; ПМ – погодно-климатический фактор (составлено автором)

Как видно из рисунка 1.6 наибольшим диапазоном изменения деградационных процессов обладает фактор ТВ (технический возраст), еще одним значимым фактором является фактор УЭ (управление экскаватором). Именно эти два фактора имеют максимальное значение, увеличивая коэффициент деградационных процессов до 1,9.

### 1.2.3 Особенности процесса экскавации

Цикл работы экскаватора подразумевает под собой повторяющиеся друг за другом этапы [83]:

- процесс копания – забор в ковш экскавируемого сырья за счет движения рабочего оборудования от подошвы к вершине уступа;

- разворот поворотной платформы и позиционирование рабочего оборудования в точку разгрузки;
- процесс разгрузки сырья с помощью механизма открывания днища ковша;
- разворот поворотной платформы и позиционирование рабочего оборудования в исходное положение для начала нового цикла.

Главной задачей при проведении процесса экскавации является определение рационального режима работы экскаватора: произвести выемку максимального возможного объема горной породы и при этом не привести к перегрузкам и поломкам в системах экскаватора. Здесь ключевую роль играют множество факторов: категория породы, ее насыпная плотность и кусковатость, высота обрабатываемого забоя, толщина срезаемой стружки, траектория движения ковша в забое, климатические условия, квалификация машиниста, качество и своевременность проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту и многое другое.

Учет всех приведенных выше факторов является непростой, но важной задачей, которую пытаются решить не одно поколение ученых и исследователей.

Рекомендационные режимы работы экскаватора, которые в стандартной форме предъявляются заводом-изготовителем в руководстве по эксплуатации, определяются для **нормальных условий эксплуатации**, которые для экскаватора ЭКГ-18Р соответствуют следующим требованиям:

- породы III категории по сложности экскавации (ЕНВ) с предварительным рыхлением взрывом.
- плотность горной массы в разрыхленном состоянии  $1800 \text{ кг/м}^3$ .
- полезная нагрузка в ковше 380 кН.
- вместимость ковша  $20 \text{ м}^3$ .
- высота забоя 15 м.
- время цикла 26,75 с при повороте для разгрузки на  $90^\circ$ .
- средневзвешенный размер куска в поперечнике от 100 до 300 мм.
- в забое не должно быть невзорванных участков, в том числе в подошве уступа.

- допустимый угол наклона экскаватора при работе – не более 5°.
- наличие негабаритной по ковшу фракции (более 2/3 наименьшего размера зева ковша) – не более 2 %.
- машинист экскаватора должен иметь опыт работы на карьерных экскаваторах с вместимостью ковша более 4 м<sup>3</sup> не менее 5 лет.
- качественные показатели забоя по ОСТ 24.072.11-80.
- окружающая среда не взрывоопасна и не пожароопасна.
- температура окружающего воздуха от -40 °С до +40 °С для климатического использования У1.
- высота над уровнем моря – не более 1000 м.
- колебание напряжения подводимого к экскаватору тока – в пределах от 5 % до +10 %.

В дальнейшем будем называть эти условия работы экскаватора **НОРМАЛЬНЫМИ**.

Однако, даже при наличии таких условий работы, в реальности при эксплуатации экскаватора они не соблюдаются. В таком случае, велики риски преждевременной выработки ресурса машины или наступления внезапного отказа.

### **1.3 Оценка производительности экскаватора с учетом влияющих факторов**

Производительность экскаватора является важнейшим технико-экономическим показателем эффективности его работы. Она определяется объемом горной породы, извлекаемой экскаватором в единицу времени (час, смену, сутки, месяц и год). Основной при расчетах является часовая производительность, с помощью которой определяют сменную, суточную, месячную и годовую производительности.

При оценке производительности экскаватора различают теоретическую, техническую и эксплуатационную производительности.

Теоретическая часовая производительность  $Q_{\text{теор}}$  оценивается объемом извлекаемой горной породы при непрерывной работе экскаватора (1.1):

$$Q_{\text{теор}} = \frac{3600E}{t_{\text{ц}}^{\text{т}}}, \quad (1.1)$$

где  $E$  – вместимость ковша экскаватора, м<sup>3</sup>;

$t_{\text{ц}}^{\text{т}}$  – теоретическая продолжительность цикла, с.

Она определяется для каждого типа экскаватора при одинаковых условиях: высота забоя принимается равной высоте напорного вала, разгрузка породы производится в отвал с углом поворота 90°, при этом коэффициенты наполнения ковша и разрыхления породы равны единице.

Теоретическая продолжительность позволяет количественно оценить преимущество конкретной модели экскаватора, так как для каждой конкретной модели эта величина постоянна и может быть изменена лишь усовершенствованием конструкции.

Техническая производительность позволяет оценивать эффективность непрерывной работы экскаватора в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях работы (1.2):

$$Q_{\text{тех}} = \frac{3600EK_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}^{\text{ф}}K_{\text{р}}}, \quad (1.2)$$

где  $K_{\text{н}}$  – коэффициент наполнения ковша;

$t_{\text{ц}}^{\text{ф}}$  – фактическая продолжительность цикла в рассматриваемых условиях с учетом передвижения экскаватора в забое, с;

$K_{\text{р}}$  – коэффициент разрыхления породы в ковше.

Эксплуатационная производительность оценивает действительный объем горной породы, извлекаемой экскаватором с учетом организационных и технологических простоев, определяющих качество организации работ в карьере (1.3):

$$Q_{\text{э}} = \frac{3600EK_{\text{н}}K_{\text{и}}}{t_{\text{ц}}^{\text{ф}}K_{\text{р}}}, \quad (1.3)$$

где  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования экскаватора в течение рассматриваемого времени.

Производительность и, соответственно, эффективность работы экскаватора зависит от большого числа факторов: горно-геологические и горнотехнические условия, техническое состояние экскаватора, качество подготовки забоя и горной массы, организация ведения горных работ, климатические факторы и управление экскаватором (квалификация машиниста) [20, 34, 86, 110, 126].

Шибановым Д.А. [53] предложена формула изменения годовой наработки экскаватора от срока его службы (1.4):

$$Q_{\text{год}} = [Q](-5 \cdot 10^{-4}Y^2 + 6 \cdot 10^{-4}Y + 1), \quad (1.4)$$

где  $[Q]$  – базовое значение годовой наработки нового экскаватора при нормальных условиях эксплуатации,

$Y$  – численное значение порядкового номера года эксплуатации экскаватора.

Ивановой П.В. [45] в данную формулу (1.4) определены коэффициенты, учитывающие фактические условия эксплуатации экскаватора (1.5):

$$Q = Q_{\text{э}}TK_{\text{ТОиР}}K_{\text{НГБ}}K_{\text{УП}}K_{\text{ИП}}(-5 \cdot 10^{-4}Y^2 + 6 \cdot 10^{-4}Y + 1), \quad (1.5)$$

где  $T$  – фонд времени, для расчета годовой наработки для нормальных условий принимается равным 8760 ч;

$K_{\text{ТОиР}}$  – коэффициент стратегии ТОиР;

$K_{\text{НГБ}}$  – коэффициент негабарита;

$K_{\text{УП}}$  – коэффициент наклона рабочей площадки;

$K_{\text{ИП}}$  – коэффициент погоды.

Указанные коэффициенты являются функциями изменения производительности от выше обозначенных параметров.

### **1.3.1 Горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации экскаватора**

Понятие горно-геологических условий включает в себя естественные физико-механические свойства горной породы такие как прочность, плотность, кусковатость, трещиноватость, а также состав пород, особенности их залегания, наличие грунтовых вод и газоносность. Эти характеристики напрямую влияют на

величину усилия копания, необходимую для проведения процесса экскавации, а также могут привести к «нестабильности» забоя.

Известна классификация горных пород по трудности экскавации по единым нормам выработки (ЕНВ), которая подразделяет все породы на 5 категорий с разными величинами коэффициентов разрыхления горной породы  $k_p$  и заполнения ковша  $k_n$ , представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Классификация горных пород по трудности экскавации [13]

Категория	Породы	$k_p$	$k_n$
I	Торф и растительный грунт; песок; супесок; суглинок лессовидный; руды марганцево-песчанистые окисные	1,15	1,05
II	Глина бентонитовая; угли бурые и каменные, слабые (мягкие); суглинок тяжелый, плотный; руды ашаритовые, плотные; руды марганцевые, карбонатные, слабые; лёсс с гравием и галькой	1,25	1,05
III	Суглинок тяжелый, плотный; руды марганцевые, карбонатные, слабые; лёсс с гравием и галькой; туф и пемза; угли бурые и каменные, крепкие; сланцы глинистоуглистые; рыхлые, дуниты и перидотиты разрушенные; глина сланцевая, тяжелая, ломовая; бокситы слабые; руды марганцевые, карбонатные, монолитные, плотные; угли каменные, с прослойками углистых сланцев, глин и «плиты»; руды баритовые	1,35	0,95
IV	Суглинок тяжелый, плотный; руды ашаритовые, плотные; руды марганцевые, карбонатные, слабые; лёсс с гравием и галькой; туф и пемза; Угли бурые и каменные, крепкие; сланцы глинисто-углистые; глина сланцевая, тяжелая, ломовая; бокситы слабые; руды марганцевые, карбонатные, монолитные, плотные; угли каменные, с прослойками углистых сланцев, глин и «плиты»; боксит крепкий; сланцы крепкие; известняки крепкие, мраморизированные; граниты крупно и среднезернистые, габбро, сиениты, диориты	1,50	0,90
V	Граниты крепкие мелкозернистые; руды магнетитовые и магнетито-мартиновые, мелкозернистые, крепкие; руды магнетито-гематитовые, мелкозернистые; железняки магнитные с прослойками скарна; руды свинцово-цинковые баритовые	1,60	0,90

Логично, что чем сложнее горно-геологические условия, тем ниже производительность экскаватора. Работа в более сложных условиях приводит к необходимости корректировать работу экскаватора в сравнении с нормальными условиями эксплуатации в сторону более щадящих режимов. Если не соблюдать это правило, то это может привести к перегрузкам в системах экскаватора и к отказу.

Горнотехнические условия определяют особенности выбранной технологии разработки карьера, которые включают в себя большой спектр вопросов: от ширины рабочей площадки до производительности выбранной единицы оборудования.

### 1.3.2 Качество подготовки забоя и горной массы

Качество подготовки забоя и горной массы зависит как от физико-механических свойств горной породы, так и от реализации процесса разработки [135, 136].

Средний размер куска (средняя кусковатость раздробленной породы) влияет на производительность экскаватора, время копания и число рабочих циклов; при увеличении размера куска фракции производительность падает, что видно из рисунка 1.9.

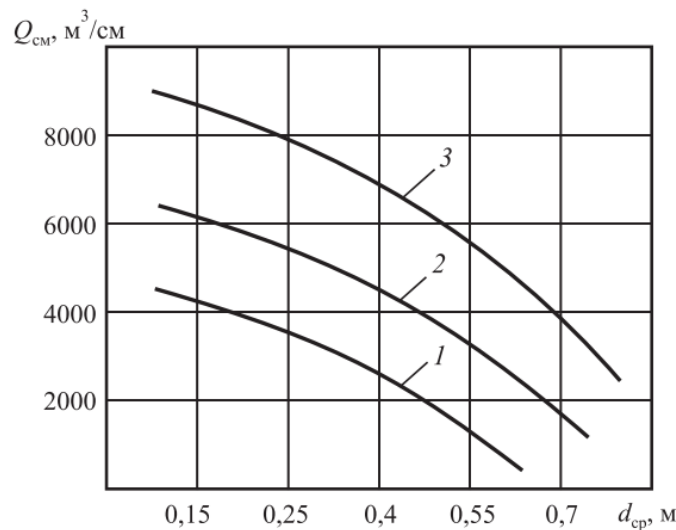


Рисунок 1.9 – Графики зависимости сменной производительности механических лопат от кусковатости разрушенных пород:

1, 2, 3 – экскаваторы с вместимостью ковша 8; 12,5; 20 м³ [22]

Кусковатость и плотность экскавируемого сырья существенно влияют на срок службы экскаватора и его систем, ускоряя износ ковша, стрелы, ходовой части при работе с крупнообломочными или плотными породами [50, 69]. В этой связи набирают популярность исследования, направленные на применение нейронных сетей в технологии интеллектуального анализа [106] для определения гранулометрического состава взорванной горной породы.

Рост выхода негабаритных кусков, требующих вторичного дробления, ведет к снижению производительности экскаватора за счет увеличения времени цикла, падения коэффициента наполнения ковша и дополнительных задержек [100, 103, 104, 109, 150]. Научные исследования показывают устойчивую тенденцию: чем выше доля негабарита в развале, тем ниже фактическая выработка экскаватора по сравнению с потенциалом при нормальных условиях эксплуатации.

Крупные фракции (более 1 м) вызывают неравномерную загрузку ковша, повышают динамические удары и вибрации, что приводит к усталостным трещинам в металлоконструкциях и преждевременному износу зубьев на 20-50 %, сокращает ресурс напорного механизма до 30 % [131, 147].

Красниковой Т.И. [96] установлена взаимосвязь увеличения количества отказов экскаватора  $y$  от увеличения выхода негабарита  $x$ , которая характеризуется экспоненциальной зависимостью (1.6):

$$y = 18,07e^{0,06x}. \quad (1.6)$$

Непроработанная подошва с неровностями, остаточными кусками горной породы и загрязнением приводит к увеличению времени цикла, снижению скорости погрузки и, как следствие, уменьшению сменной выработки [125, 141, 144].

Уклон рабочей площадки влияет на производительность экскаватора косвенно через стабильность позиционирования машины, время маневров и циклов копания; при чрезмерном уклоне растет риск опрокидывания машины, увеличивается время на стабилизацию и позиционирование, что снижает объем выработки. Научные исследования показывают отсутствие прямой зависимости производительности экскаватор от уклона, однако подчеркивают влияние на

увеличенное время по добыче горных пород и на общую эффективность при работе на склонах.

Ивановой П.В. [142] установлен коэффициент, учитывающий процент выхода негабарита для расчета годовой наработки (1.5) для фактических условий эксплуатации (1.7):

$$K_{\text{НГБ}} = 1 - 1,86 \cdot 10^{-2} e^{0,06\text{НГ}}, \quad (1.7)$$

где НГ – процент выхода негабарита, %.

Помимо  $K_{\text{НГБ}}$  также установлен коэффициент  $K_{\text{УП}}$  (1.8), учитывающий реальный угол наклона рабочей площадки  $\alpha$  для фактических условий эксплуатации [47]:

$$K_{\text{УП}} = 1 - 6,45 \cdot 10^{-4} e^{0,83\alpha}. \quad (1.8)$$

### 1.3.3 Организация ведения горных работ

Соответствие мощности экскаватора грузоподъемности и числу самосвалов, минимизация простоев напрямую способствует повышению производительности экскаватора за счет сокращения времени ожидания, оптимизации числа разгрузок ковша и снижения заторов самосвалов при проезде к забою [7]. Исследования показывают, что правильное соотношение единиц машин в экскаваторно-автомобильном комплексе увеличивает выработку экскаватора на 10-20 % и снижает общие затраты на тонну добытого сырья [146].

Периодичность ведения взрывных работ (частота взрывов) влияет на производительность экскаватора через минимизацию простоев на релокацию оборудования, поддержание уровня взорванного запаса и синхронизацию с циклом добычи. При проведении исследований установлено, что снижение частоты взрывов на 14 % при росте среднего объема на 17 % дает прирост скорости погрузки на 11 % за счет сокращения непроизводительного времени [145].

Время проветривания карьера после взрыва снижает годовую производительность экскаватора за счет вынужденных простоев на очистку воздуха от газов ( $\text{NO}_x$ , CO) и пыли и может составлять до 4-6 часов на сессию взрыва [1, 145].

Частые перегоны экскаваторов из-за необходимости проведения взрывных работ или изменения места добычи снижают производительность экскаватора до 65-70 % за рабочую смену [145].

### 1.3.4 Климатические факторы

Почти две трети территории России занимают области с суровым климатом, обильные снегопады и метели затрудняют работу транспорта, снег смешиваясь с полезным ископаемым повышает его смерзаемость. При организации работ на карьерах, работающих в суровых климатических условиях, уменьшают число рабочих дней в году (таблица 1.7), уменьшают время работы на 1-2 часа, соответственно сменная, суточная и годовая производительности экскаватора снижаются [98].

Таблица 1.7 – Число рабочих дней в году, ед. [98]

Районы	Продолжительность рабочей недели, дней		
	7	6	5
Северные	340	290	242
Средние	350	300	250
Южные	355	305	254

Солнечная радиация, низкие и высокие температуры, а также высокая влажность окружающего воздуха негативно влияют на физико-механические свойства конструктивных и эксплуатационных материалов, повышая риск отказа экскаватора, а также на состояние и здоровье машиниста, что сказывается на качестве его работы [62, 63, 64, 139].

Осадки и дождь снижают производительность электрического экскаватора на 7-10 % за каждый час дождя за счет размягчения грунта, тем самым увеличивается время цикла на 0,15 мин и снижается эффективность до 78 %, что приводит к потере суточной производительности [127]. Также дополнительно растет риск проникновения влаги в электронные системы, вызывая коррозию контактов, короткие замыкания и деградацию изоляции, особенно при длительном воздействии, как было указано ранее.

Сильный ветер снижает производительность экскаватора за счет дополнительной ветровой нагрузки на поворотную платформу и рабочее

оборудование, увеличивая момент опрокидывания при боковом воздействии и снижая стабильность при проведении процесса экскавации. Это приводит к ограничению скорости поворота, росту энергопотребления электродвигателей для компенсации и риску усталостных повреждений подшипников оси поворота из-за вихревых нагрузок [132, 140].

Ивановой П.В. [74] предложен коэффициент (1.9), учитывающий фактические погодные условия эксплуатации при расчете годовой наработки (1.5):

$$K_{ИП} = 1 - 3,8 \cdot 10^{-2} e^{0,015ИП}, \quad (1.9)$$

где ИП – индекс жесткости погоды, определяемый по выражению (1.10):

$$\begin{aligned} ИП = & (0,75|t_{ср} - 8| + 0,25|t_{абс} - 2|)(1 + 0,015\sigma_A)(1 + 0,07v_B) \times \\ & \times (1 + 0,26\varphi_B)(1 + 0,01R_C)(1 + 0,014n_H)(1 + 0,022\tau_M), \end{aligned} \quad (1.10)$$

где  $t_{ср}$  – среднее значение температуры за месяц, °С;

$t_{абс}$  – абсолютный максимум/минимум температуры, °С;

$\sigma_A$  – средняя непериодическая амплитуда суточных колебаний температуры, °С;

$v_B$  – средняя скорость ветра, м/с;

$\varphi_B$  – среднее значение относительной влажности воздуха, доли единиц;

$R_C$  – среднее значений суммарной солнечной радиации за месяц, ккал/см<sup>2</sup>;

$n_H$  – среднее за месяц значение числа дней с метелями, туманом и пыльной бурей;

$\tau_M$  – продолжительность действия в месяцах отрицательной температуры.

Ивановой П.В. [49] установлено, что при индексе жесткости погоды более 55 единиц (неблагоприятные климатические условия) экскаваторы простаивают около 70 % от общего времени, что значительно сказывается на величине их производительности.

### 1.3.5 Управление экскаватором

Высокая квалификация и большой опыт машиниста способствуют снижению потерь времени при работе экскаватора, а также ведут к минимизации ошибок при его управлении: опытные машинисты увеличивают выработку на 30-83 % за счет

рационального позиционирования, заполнения ковша (коэффициент наполнения 0,85-1,10) и минимизации простоев, снижают энергопотребление на 10-20 % за счет плавного управления электродвигателями, повышают срок службы на 15-25 % благодаря раннему выявлению неисправностей во время качественного ежедневного мониторинга систем [130, 137, 138]. При этом недостаток опыта у машиниста как правило вызывает перегрузки, вибрации и износ, снижая общую эффективность работы на 41-83 % [71, 129, 149].

Хамидовым О.У. [111] при проведении анализа работы машинистов карьерных экскаваторов установлено, что длительность цикла работы экскаватора меняется на 67 % при сравнении работы машинистов высокой и низкой квалификации. Также при работе машинистов с низкой квалификацией на 13 % снижается степень заполнения ковша, средняя продолжительность цикла в забое со скальной вскрышей на 52 % превышает базовое значение, установленное заводом-изготовителем, что может привести к снижению производительности и, соответственно, годовой наработки экскаватора до 34 % [111, 113]. При проведении моделирования для нормальных условий эксплуатации с экскавацией породы III категории время цикла на 30 % превышает базовое значение, что прогнозирует снижение производительности на 23 % из-за влияния эргатического фактора [112].

При эксплуатации экскаватора в нерациональном режиме работы и/или игнорировании рекомендаций по эксплуатации от завода-изготовителя и ответственных служб машинист может самовольно снижать коэффициент наполнения ковша, увеличивать время цикла, повышать риск отказа и последующее за ним время простоя не только экскаватора, но и смежного с ним оборудования, соответственно снижать коэффициент готовности оборудования, и тем самым снижать производительность [38].

Низкая производственно-трудовая дисциплина, включающая в себя нарушения графика работы, несвоевременное и некачественное проведение технического обслуживания и ремонта, игнорирование инструкций старшего по смене, снижает производительность электрического экскаватора, так как приводит к повышению времени простоя оборудования [39].

Для повышения квалификации и опыта машинистов должно проводиться их периодическое обучение. В последнее время активно используют различные машины-симуляторы [54]. Они позволяют проводить обучение и повышение квалификации в безопасной виртуальной среде без риска повреждения оборудования и возникновения аварийных ситуаций [152].

### **1.3.6 Техническое состояние экскаватора**

Техническое состояние экскаватора напрямую влияет на его производительность. При работе экскаватора с течением времени неизбежно наступает старение и изнашивание его механизмов и узлов. Это приводит к увеличению времени цикла и уменьшению объема выемки горной породы, так как системы перестают работать на полную мощность.

Для поддержания экскаватора в работоспособном состоянии необходимо проводить своевременно и качественно работы по техническому обслуживанию и ремонту, регулярно проводить мониторинг и диагностику машины и всех ее узлов, эксплуатировать экскаватор без перегрузок основных систем [58, 105]. При соблюдении этих правил снижается вероятность отказа механизмов и узлов экскаватора.

Для проведения качественного технического обслуживания необходимо иметь потребное количество и качество запасных частей [59].

Рациональный запас запасных частей способствует снижению времени ожидания при замене изношенных деталей, что повышает коэффициент готовности машины и увеличивает эксплуатационную эффективность до 15 % [140]. Недостаток запасных частей приводит к длительным остановам.

Применение оригинального ЗИП повышает надежность узлов, продлевает межремонтные интервалы и минимизирует простои, в то время как контрафакт приводит к частым поломкам и снижению эффективности на 20-30 %. Оригинальные компоненты обеспечивают стабильную работу рабочих органов, поддерживая производительность на уровне 90-95 % от номинальной [123].

Немаловажным фактором является квалификация персонала, производящего техническое обслуживание и ремонт. Исследования показывают, что повышение

компетенций службы технического обслуживания и ремонта позволяет существенно увеличить общую эффективность оборудования и сократить незапланированное время простоев [70, 88].

Ивановой П.В. [142] предложен коэффициент (1.11), учитывающий влияние выбранной стратегии технического обслуживания и ремонта, при расчете годовой наработки (1.5):

$$K_{\text{ТОиР}} = \frac{(\Phi_{\text{КВ}} - T_{\text{орг}} - T_{\text{ТО}}) - T_{\text{в}}}{\Phi_{\text{КВ}}}, \quad (1.11)$$

где  $\Phi_{\text{КВ}}$  – годовой фонд календарного времени;

$T_{\text{орг}}$  – суммарное время простоев по организационным причинам;

$T_{\text{ТО}}$  – суммарное время простоев на проведение плановых работ по техническому обслуживанию и ремонту;

$T_{\text{в}}$  – суммарное время восстановления экскаватора после его отказа, согласно принятой стратегии технического обслуживания и ремонта.

## **1.4 Нагрузки на рабочее оборудование карьерных экскаваторов**

### **1.4.1 Усилия, действующие на систему рабочего оборудования карьерного экскаватора**

При проведении процесса экскавации на рабочее оборудование влияют различные виды механических воздействий и нагрузок, которые можно разделить на следующие основные категории [40, 84, 115]:

- сила тяжести узлов рабочего оборудования и горной породы;
- силы сопротивления грунта копанию и трения ковша о забой;
- динамические нагрузки;
- инерционные силы и моменты сопротивления.

Силы тяжести узлов рабочего оборудования для каждой модели экскаватора индивидуальны и определяются только из его конструкции. Сила тяжести горной породы в ковше зависит от траектории копания ковша в забое и величины срезаемой стружки, а также физико-механических свойств породы.

Силы сопротивления копанию возникают при внедрении ковша в забой. Они направлены со стороны забоя на ковш и противонаправлены его движению. Усилие сопротивления копанию по Домбровскому [35] определяется по формуле (1.12):

$$F_{\text{коп}} = K_F B_k t, \quad (1.12)$$

где  $K_F$  – коэффициент удельного сопротивления копанию, МПа;

$B_k$  – ширина режущей кромки ковша, м;

$t$  – толщина стружки (глубина внедрения ковша в забой), м, находится по формуле (1.13):

$$t_{\text{max}} = \frac{Q K_H}{B_k K_p L_{\text{тр}}} \quad (1.13)$$

где  $Q$  – вместимость ковша, м<sup>3</sup>;

$K_H$  – коэффициент наполнения ковша;

$K_p$  – коэффициент разрыхления породы в ковше;

$L_{\text{тр}}$  – длина пройденного пути по заданной траектории, м.

При этом при предельном заглублении ковша могут произойти наклон и последующее опрокидывание экскаватора.

Сила сопротивления движению ковша при его скольжении по забою при копании (1.14):

$$F_{\text{тр}} = Nf, \quad (1.14)$$

где  $N$  – сила нормального давления;

$f$  – коэффициент сопротивления движению ковша.

Действительные значения динамических нагрузок при расчете механизмов экскаватора обычно не рассматриваются [18], а учитываются динамическим коэффициентом, который для рабочего оборудования при разработке экскаватором забойного блока на угольных разрезах равен 1,2-1,3 [21, 80, 81]. Полный расчет этих параметров производится только при прочностных расчетах, а также при учете углового ускорения при повороте платформы [19].

Инерционная составляющая учитывается только при расчетах поворотных механизмов экскаватора. Что касается инерционных нагрузок при копании, то ковш с породой, напорный механизм и рукоять имеют малую величину моментов

инерции относительно собственных осей вращения, а ускорения при копании пренебрежительно малы, поэтому инерционные составляющие в расчетах нагрузок рабочего оборудования не учитываются [51].

Динамические нагрузки определяются инерционностью механизмов (массой и расстоянием от оси вращения), жесткостью упругих связей, трением в элементах, а также внешней нагрузкой. Коэффициентом динамичности учитывается максимально возможный уровень нагрузок, определяемых отмеченными выше факторами. Таким образом, в дальнейших расчетах динамические нагрузки будут учитываться посредством введения коэффициента динамичности.

#### **1.4.2 Влияние перегрузок на состояние экскаватора**

Перегрузки возникают при механическом стопорении ковша, то есть когда работа производится в упор, что недопустимо [148].

Однако, такие процессы возможны для механизмов экскаватора (напорные, подъемные и тяговые лебедки) при добыче и транспортировании горной породы. Добыча мягких грунтов сопровождается постепенным нарастанием перегрузок, которые могут вырасти до опасных значений. При добыче скальных пород возможны заклинивания исполнительного органа. При возникновении эти процессы называют мягким и резким стопорениями, соответственно.

Для предупреждения образования перегрузок механизма необходимо контролировать величину момента, развиваемого двигателем, и осуществлять ограничение его значения, соотнесенного с допустимой нагрузкой механизма и перегрузочной способностью двигателя, определяемого моментом отсечки.

Величина этого параметра для двигателя подъема ДПЭ560Д-1 УХЛ2 рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-18Р равна 12900 Н·м, а для двигателя напора ДПЭ220Д-2У2 – 7068 Н·м.

### **1.5 Ресурс карьерного экскаватора как единой системы. Мероприятия по восстановлению ресурса экскаватора**

Ресурс карьерного экскаватора представляет собой суммарную наработку машины от начала эксплуатации или после ремонта до достижения предельного

состояния, когда она теряет работоспособность [29, 56]. Это понятие охватывает как конструктивный ресурс, зависящий от параметров и особенностей конструкции, так и остаточный ресурс, оцениваемый по отклонению технических параметров от нормативных.

Низкое качество забоя и агрессивная среда увеличивают интенсивность накопления усталостных повреждений металлоконструкций и ковшей, требуя коэффициентов корректировки для расчета потерь ресурса. Квалификация машиниста и оптимальные режимы копания снижают скорость износа, повышая надежность [16].

### 1.5.1 Энергетический подход к оценке ресурса карьерного экскаватора

Энергетический подход к оценке ресурса карьерного экскаватора основан на анализе энергопотребления главных механизмов в цикле экскавации, позволяя связать горнотехнические условия с износом и остаточным ресурсом через энергоёмкость процесса [23, 61].

Основываясь на термодинамической теории, Коломийцов М.Д. [52] утверждает, что разрушение твердого тела происходит только из-за определенного количества рассеиваемой энергии внутри него, при этом количество такой энергии является константой для одного типа машин, исключая случаи превышения допустимых пределов величины нагрузки. Таким образом, вводится понятие «энергоресурс» – предельное количество энергии, которое может рассеять система до наступления предельного состояния [52].

При этом суммарные потери в системе распределяются в элементах пропорционально их энергоресурсу, то есть при увеличении потерь в приводе увеличивается скорость выработки энергоресурса. Таким образом, можно утверждать, что энергоресурс можно определить по формуле (1.15):

$$K_K = \int_0^{T_p} \Delta P(t) dt = const, \quad (1.15)$$

где  $T_p$  – время наработки объекта;

$\Delta P$  – средние потери мощности в приводе за время  $t$ , Вт.

Для определения величины энергоресурса экскаватора необходимо проведение экспериментальных и/или стендовых испытаний, что требует значительных затрат времени и средств для получения достоверной информации [42]. Однако теоретический расчет потерь мощности наряду со стендовыми испытаниями позволяет давать оценку изменения скорости выработки энергоресурса в различных рассматриваемых условиях без определения его конкретной величины [46], так как в рамках настоящей работы это не является необходимым.

### **1.5.2 Структура мероприятий технического обслуживания и ремонта**

Система технического обслуживания и ремонта представляет собой комплекс организационных и технологических мероприятий для поддержания работоспособности оборудования, предотвращения сбоев и восстановления его ресурса [28, 30, 33]. Она включает планирование, подготовку, выполнение работ и контроль с учетом нормативов их периодичности и объемов. Основные цели технического обслуживания и ремонта – минимизация простоев, повышение надежности и оптимизация затрат [55, 102].

Существуют следующие стратегии технического обслуживания и ремонта оборудования: техническое обслуживание по факту отказа, предупредительное, по состоянию и их комбинация. Эти стратегии эволюционировали от простого ремонта после фактического отказа оборудования к сбору и автоматизированному анализу данных в реальном времени для предупреждения отказов [9].

Реактивная стратегия технического обслуживания, также известная как «техническое обслуживание по отказу» или «*Run-To-Failure*» (*RTF*), подразумевает отсутствие плановых работ до момента поломки оборудования. Ремонт или замена проводятся только после возникновения неисправности, что делает этот подход простым в реализации без предварительного планирования.

Такая стратегия технического обслуживания оправдана для некритичного оборудования или узлов, где отказ не влияет на общую эффективность и безопасность. Она экономит ресурсы, но требует анализа рисков для предупреждения возникновения отказа других связанных механизмов и узлов [66].

Предупредительная стратегия включает в себя профилактическое техническое обслуживание (*Preventive Maintenance – PM*) и обслуживание по наработке (*Time-Based Maintenance – TBM*). Такая стратегия предполагает регулярное проведение технического обслуживания и ремонта по заранее составленному графику независимо от фактического состояния оборудования. Она направлена на предотвращение отказов путем периодических диагностик, смазки, регулировок и замены изнашиваемых частей до достижения критического состояния оборудования [37].

Такая стратегия существенно снижает количество аварийных простоев, обеспечивает безопасность и безотказность оборудования. Однако, при такой стратегии проводятся работы, направленные на предупреждение отказов всех деталей и узлов оборудования, соответственно становятся нередки частые замены исправных деталей, которые приводят к перерасходу ресурсов, повышая затраты по сравнению с другими стратегиями [36].

Стратегия технического обслуживания по состоянию (*Condition-Based Maintenance – CBM*) подразумевает мониторинг фактического технического состояния оборудования с помощью датчиков, диагностики или визуального контроля, с проведением ремонта только при приближении оборудования к критическому состоянию [24, 27]. Ремонт выполняется только в объеме, установленном по данным о состоянии оборудования, а не по установленному графику.

Применение такой стратегии позволяет снизить объем ремонтов за счет исключения ненужных работ и повышает производительность оборудования, используя ресурс деталей и узлов полностью, это также приводит к экономии на запчастях и планированию простоя, минимизируя затраты и убытки [17, 25, 26]. Однако такая стратегия требует больших начальных капиталовложений в датчики, специальное программное обеспечение и/или квалифицированный персонал, проводящий мониторинг [151].

Анализ достоинств и недостатков указанных выше стратегий привел к созданию комбинированной стратегии технического обслуживания, включающей

в себя обслуживание, ориентированное на надежность (*Reliability-Centered Maintenance – RCM*) и основанное на рисках (*Risk-Based Maintenance – RCM II*) [31]. Эта стратегия основана на функциональном анализе деталей и узлов и их градации по критичности и важности [114]. К некритичному оборудованию применяется первая стратегия, к критичному – вторая или третья в зависимости от условий [9].

В настоящее время зарождается новая система – добросовестного технического обслуживания и ремонта (*Conscientious Maintenance and Repair – CM&R*), которая заключается в стремлении работников обеспечивать исправное состояние оборудования [92].

Общая схема стратегий и подходов к техническому обслуживанию и ремонту представлена на рисунке 1.10.

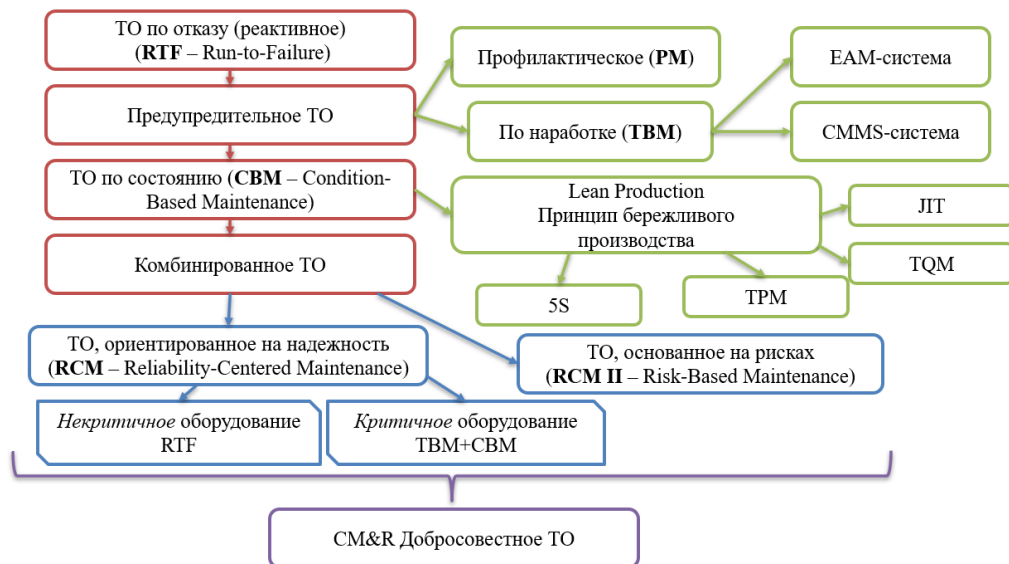


Рисунок 1.10 – Стратегии технического обслуживания и ремонта  
(составлено автором)

Несмотря на свои преимущества, комбинированная стратегия требует значительных начальных капиталовложений и дополнительных специалистов, из-за чего реализацию такой стратегии поддерживают далеко не все горнодобывающие предприятия. Как правило, используется стратегия предупредительного технического обслуживания и ремонта, которую, в свою очередь, пытаются совершенствовать ученые и специалисты [67].

### 1.5.3 Уточнение графика проведения мероприятий ТОиР как инструмент восстановления ресурса экскаватора

Уточнение графика проведения мероприятий технического обслуживания и ремонта служит ключевым инструментом для восстановления ресурса карьерных экскаваторов, позволяя учитывать фактические условия эксплуатации посредством введения соответствующих коэффициентов.

График проведения технического обслуживания и ремонта при планово-предупредительном ремонте создается на основе нормативов наработки.

График устанавливается на год вперед и уточняется ежеквартально после проведения диагностики. Обычно межремонтный период регламентируется в месяцах, что является не очень корректным. Ивановой П.В. предложено составлять график проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту в сутках или часах, что позволяет более точно учитывать остаточный ресурс деталей и узлов карьерного экскаватора, своевременно проводить техническое обслуживание и ремонт машины с учетом меняющихся условий эксплуатации [3, 4].

Пример такого графика представлен на рисунке 1.11.

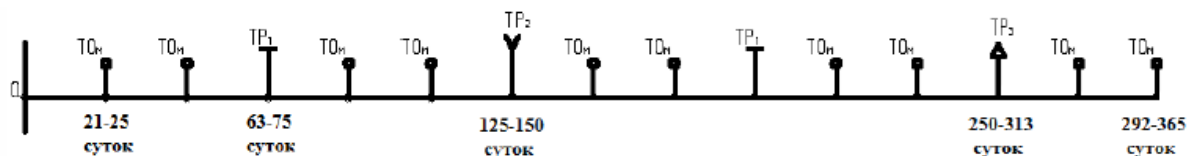


Рисунок 1.11 – Годовой график проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту для нормальных условий [3]

Система планово-предупредительного ремонта включает внутрисменное и межремонтное обслуживание. Внутрисменное обслуживание охватывает ежедневную уборку, чистку, смазку, осмотр и регулировку механизмов для поддержания работоспособности. Межремонтное обслуживание предполагает периодические проверки, промывку, замену масла и быстроизнашивающихся деталей слесарем-ремонтником.

Основные виды ремонта – текущий, средний и капитальный. Текущий ремонт устраняет мелкие дефекты, заменяет отдельные детали и регулирует

механизмы на месте установки. Средний ремонт более обширный, включает разборку узлов и замену деталей. Капитальный ремонт предусматривает полную разборку, замену основных узлов, выверку и восстановление ресурса до уровня нового оборудования.

При текущем ремонте экскаватора устраняют отдельные неисправности в узлах и агрегатах, возникшие в процессе эксплуатации и мешающие нормальной работе. Работы проводят машинист с помощником на месте эксплуатации или с привлечением ремонтной бригады, без полной разборки машины. Выполняют замену или восстановление деталей (кроме базовых), с демонтажем узла или без него. Проводят частичную разборку для осмотра, дефектовки и ремонта составных частей. Проверяют рычажные системы управления, зубчатые и цепные передачи, фрикционные муфты. Регулируют зазоры, подтягивают соединения, меняют манжеты, сальники, устраняют люфты.

При среднем ремонте экскаватора проводят частичную разборку машины, замену или восстановление изношенных узлов и агрегатов, а также регулировку механизмов для продления срока службы. Снимают и ремонтируют отдельные узлы, такие как гидроцилиндры, редукторы, двигатель, с заменой деталей второго порядка (кроме основных базовых). Выполняют дефектовку, шлифовку, наплавку изношенных поверхностей и регулировку зазоров в соединениях. Проводят испытания узлов после ремонта, проверку гидравлической системы и пробный запуск экскаватора. Работы выполняют в ремонтной зоне или на объекте с привлечением бригады специалистов.

При капитальном ремонте экскаватора проводят полную разборку машины, ремонт или замену всех основных узлов и агрегатов, восстановление изношенных деталей с целью возврата ресурса к заводскому состоянию. Выполняют демонтаж всех узлов, полную очистку и дефектовку деталей, ремонт двигателя, гидравлики, редукторов, ходовой части и рабочего оборудования. Заменяют или восстанавливают базовые детали (поршни, валы, подшипники), шлифуют цилиндры, наваривают и протачивают поверхности. Собирают машину с восстановлением всех посадок и зазоров, регулируют системы, проводят

испытания и обкатку для проверки работоспособности. Работы выполняют в специализированных цехах с использованием стендов и оборудования.

## **1.6 Оценка факторов нагружения средствами моделирования**

### **1.6.1 Физическое моделирование**

Эксперименты и исследования на реальных объектах и машинах в горнодобывающем производстве сопряжены с высокими рисками безопасности, значительными финансовыми потерями из-за простоев и сложностями, связанными с воспроизведением необходимых условий.

Проведение экспериментов на действующих карьерах требует остановки производства, что приводит к огромным убыткам, поскольку транспорт и оборудование составляют основную долю себестоимости добычи. Экстремальные условия (пыль, вибрации, перегрузки и климатические факторы) затрудняют точные измерения и часто приводят к поломкам датчиков или прерыванию экспериментов. Кроме того, масштабы машин (самосвалы, экскаваторы) ограничивают возможность контролируемого моделирования аварий или нагрузок без риска для персонала.

Физическое моделирование позволяет воссоздать в лабораторных условиях, на стендах процессы, происходящие в реальных объектах под действием внешних и внутренних нагрузок. Такие модели могут быть масштабными или натурными, в зависимости от задачи. Используются датчики, регистрирующие деформации, напряжения, температуру и другие параметры.

Однако для проведения адекватного физического моделирования необходимо соблюдение критериев подобия натурального и модельного объекта. Критерии подобия обеспечивают физическое сходство модели и реального объекта, позволяя переносить результаты экспериментов с модели на прототип при равенстве безразмерных комплексов параметров.

Теория подобия требует геометрического, кинематического и динамического подобия: формы, скорости перемещений и соотношения сил в модели и натуре должны быть подобны. Безразмерные критерии, такие как число Рейнольдса для потоков или Пуассона для упругих деформаций, определяются из анализа

размерностей и уравнений движения. Равенство этих  $\pi$ -чисел гарантирует, что процессы в модели и объекте протекают по одним законам физики.

Теория подобия базируется на трех теоремах подобия и ряда дополнительных положений [10-12], суть которых заключается в равенстве натуральных и модельных объектов и процессов в случае равенства критериев их подобия, которые должны содержать независимые аргументы (представленные в критериальной форме) и подобие условий однозначности.

Например, напряжение в грунте описывается уравнением Кулона-Мора (1.16):

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \psi + C, \quad (1.16)$$

где  $\tau$ ,  $\sigma$  – предельные касательные и нормальные напряжения, соответственно, Па;

$\operatorname{tg} \psi$  – коэффициент внутреннего трения материала;

$C$  – коэффициент сцепления, Па.

Соответственно, для натурального ( $\tau_n$ ) и моделируемого ( $\tau_m$ ) процесса уравнение (1.16) с учетом некоторых преобразований, будут иметь вид (1.17):

$$\tau_n = \gamma_n l_n \operatorname{tg} \psi_n + C_n \text{ и } \tau_m = \gamma_m l_m \operatorname{tg} \psi_m + C_m \quad (1.17)$$

где  $\gamma = \rho/g$  – объемный вес, Н/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$l$  – обобщенный линейный размер, м.

Эти два уравнения процессов будут подобны при условии (1.18):

$$k_\tau = \frac{\tau_n}{\tau_m}; k_\gamma = \frac{\gamma_n}{\gamma_m}; k_l = \frac{l_n}{l_m}; k_{\operatorname{tg} \psi} = \frac{\operatorname{tg} \psi_n}{\operatorname{tg} \psi_m}; k_C = \frac{C_n}{C_m}, \quad (1.18)$$

их дальнейшее использование и преобразование будут подробно описано в главе 3 настоящей работы.

### 1.6.2 Численное моделирование

В настоящее время численное моделирование является полезным инструментом для изучения различных процессов горного производства [57]. Методы численного моделирования позволяют симулировать экстремальные сценарии (аварии и перегрузки), недоступные при проведении физического

моделирования, также применение таких методов позволяет учитывать реальные параметры материалов и нагрузок [5, 82, 85, 133]. Создание цифровых двойников позволяет прогнозировать поведение оборудования в эксплуатации, снижая риски простоев [134, 143].

Метод конечных элементов разбивает объект на конечные элементы для расчета напряжений, деформаций и устойчивости горных выработок или оборудования. Широко применяется в *ANSYS* или *Abaqus*.

Метод дискретных элементов моделирует взаимодействие сыпучих сред и разрушения пород как набор частиц, учитывая столкновения и трение в процессах дробления или транспортировки. Применяется для исследования динамических нагрузок.

Метод конечных элементов предполагает непрерывность среды, разбивая ее на элементы для расчета напряжений в породах и конструкциях, в то время как метод дискретных элементов моделирует отдельные частицы с учетом контактов и сдвигов. Метод конечных элементов эффективен для статических задач устойчивости выработок, метод дискретных элементов – для динамики обрушения или транспорта руды.

Сравнение этих методов представлено в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Сравнение методов численного моделирования (составлено автором)

<b>Сравниваемый аспект</b>	<b>МКЭ (Метод конечных элементов)</b>	<b>МДЭ (Метод дискретных элементов)</b>
Изучаемые объекты	Сплошная среда, непрерывные деформации	Дискретные частицы, большие сдвиги
Примеры применения	Устойчивость выработок, напряжения в массиве	Обрушение пород, сыпучие среды, дробление
Преимущества	Точность для линейных задач, низкие вычисления	Реализм для нелинейных разрушения
Недостатки	Сложности с большими деформациями	Высокие вычислительные затраты
Применяемое программное обеспечение	<i>ANSYS, Abaqus</i>	<i>PFC, EDEM</i>

Известны исследования [95], показывающие возможность применения численного моделирования для выбора системы организации работ в карьерах с

последующим внедрением интеллектуальных геотехнологий в горнотехнические системы.

Применяемо к экскаваторам, известно исследование [117], в котором с помощью математической модели проведено исследование нагруженности стрелы экскаватора-драглайна, итогом которого стало предложение об изменении его конструкции, что позволит уменьшить ее массу на 5,2 %.

В исследовании [72] создана имитационная модель процесса экскавации, на основе которой выполнен вычислительный эксперимент по расчету режимных параметров главных механизмов экскаватора ЭКГ-20А. Данная работа направлена на определение рациональных значений скорости подъема и напора для перемещения ковша при копании с постоянной скоростью.

Однако оценка нагруженности приводов подъема и напора рабочего оборудования экскаватора типа ЭКГ при различных траекториях копания ковшом исследована недостаточно [128]. Также в рассмотренных работах не учитываются насыпная плотность и кусковатость экскавируемой массы, что приводит к выводу о необходимости решения этих вопросов.

На основе такого исследования, можно ввести коэффициент, учитывающий при расчете производительности экскаватора траекторию копания ковшом в забое, а также плотность и кусковатость подготовленной к экскавации горной массы.

### **1.7 Выводы по Главе 1. Задачи исследования**

1. Описаны технологические схемы при открытой добыче полезного ископаемого на угольных месторождениях, способы выемки и погрузки породы при разных видах выемочного и транспортного оборудования. Определено, что для экскаваторов типа ЭКГ применимы схемы верхнего черпания с нижней и верхней погрузкой.

2. Установлено, что экскаваторы типа ЭКГ обладают большой единичной мощностью, универсальностью условий применения. Также определены факторы, влияющие на состояние экскаватора с точки зрения возникновения в нем деградационных процессов, самыми существенными факторами являются «технический возраст» и уровень подготовки машиниста. Определены величины

показателей, определяющих нормальные условия эксплуатации, при этом условия функционирования ЭКГ полностью удовлетворяют нормальным условиям эксплуатации.

3. Обобщены исследования влияния на производительность экскаватора следующих факторов: горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации, качество подготовки забоя и горной массы, организация ведения горных работ, климатические факторы, управление экскаватором и техническое состояние экскаватора. Показаны функциональные зависимости влияния этих факторов на годовую производительность экскаватора.

4. Выявлены характер и величина нагрузки на рабочее оборудование карьерных экскаваторов. Показано, что оценка влияния траектории копания ковша на нагруженность рабочего оборудования карьерного экскаватора исследована недостаточно. Также при расчетах не учитываются изменения насыпной плотности и кусковатости экскавируемой горной породы.

5. Проанализированы по существу имеющие место быть стратегии и подходы к их реализации при проведении технического обслуживания и ремонта экскаватора. Выявлено, что на горнодобывающих предприятиях широко распространена система планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта, однако она не учитывает фактические условия эксплуатации экскаватора, что требует ее усовершенствования и проведения дополнительных исследований.

6. Установлено, что физическое моделирование процессов в лабораторных условиях требует предварительного определения критериев подобия натурального и модельного объектов процессов для обеспечения адекватности результатов моделирования. В этом случае результаты проведенного физического моделирования в полной степени можно использовать для проведения численного моделирования, которое позволяет симулировать экстремальные сценарии, недоступные при проведении физического моделирования, и в дальнейшем учитывать реальные параметры материалов и нагрузок. Для процесса копания

ковшом следует учитывать размеры, плотность, кусковатость экскавируемого материала.

Подводя итог вышесказанному, для решения поставленной в работе цели необходимо выполнение следующих задач:

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.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ПРИВОДОВ ПОДЪЕМА И НАПОРА ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-18Р

### 2.1 Влияние технологических факторов эксплуатации на работу карьерного экскаватора

Как подчеркивалось в первой главе настоящей работы, эффективность функционирования карьерного экскаватора определяется не только конструкцией и энерговооруженностью этой горной машины, но и целым рядом технологических факторов таких как: траектория копания, выход негабарита, средний размер куска, насыпная плотность, структура мероприятий технического обслуживания и ремонта, а также их своевременность и качество проведения.

Особое внимание привлекают такие факторы как насыпная плотность, средний размер куска и выход негабарита, так как они взаимосвязаны и напрямую зависят от качества подготовки забоя. После проведения буровзрывных работ повлиять на средний размер куска и насыпную плотность практически невозможно, соответственно эти факторы следует учитывать как априорные.

При ведении горных работ наличие негабаритов в экскавируемой массе может привести к отказу и поломке экскаватора. Поэтому необходимо применять специальную технику, разрушая негабариты непосредственно в забое или на специальном складе.

На основе анализа материалов, представленных в разделе 1.3.3 первой главы настоящей работы, разрушение негабаритных кусков горной породы осуществляют динамическим, динамостатическим или статическим воздействием.

По природе разрушения влияние на негабарит при его разрушении возможно:

- истиранием (шелушением) – статическим или динамостатическим измельчением горной породы с поверхности с образованием мелкодисперсных частиц;

- раздавливанием (дроблением) – статическим, динамостатическим или динамическим приложением усилия к поверхности негабарита, вследствие которого кусок породы разрушается с образованием большого количества мелких элементов;

- раскалыванием – статическим или динамостатическим воздействием с образованием нескольких крупных кусков горной породы [43].

В зависимости от природы воздействия различают: механическое, световое, химическое, гравитационное, гидравлическое (пневматическое), акустическое, электрическое, термическое воздействие и разрушение взрывом [44].

Негабарит разрушают воздействием сил, действующих снаружи или изнутри (из шпура).

На рисунке 2.1 представлена классификация способов разрушения негабарита при ведении открытых горных работ, дополненная конкретными средствами их реализации [43].

Однако объективно оценивать влияние этого фактора на долговечность горной машины с возможностью сравнения с другими факторами целесообразно в относительном виде. При этом за базу сравнения следует брать **нормальные условия работы** (раздел 1.2.3), то есть условия, оговариваемые заводом-изготовителем.

Идеально нормальным условиям работы соответствует работа экскаватора ЭКГ-18Р в условиях угольного забоя с насыпной плотностью 1250-1370 кг/м<sup>3</sup> и кусковатостью в зависимости от класса от 0 до 0,3 м, при этом в горной массе предполагается отсутствие негабаритных кусков, а управление экскаватором должно осуществляться машинистом 8 разряда, с горизонтально расположенной рабочей площадкой, на которой работает экскаватор, в нормальных климатических и погодных условиях функционирования экскаватора [124].

В дальнейшем в работе, в качестве нормальных, принимаемых за базу сравнения, будем рассматривать процессы функционирования экскаватора ЭКГ-18Р для вышеозначенных условий при работе на угле.

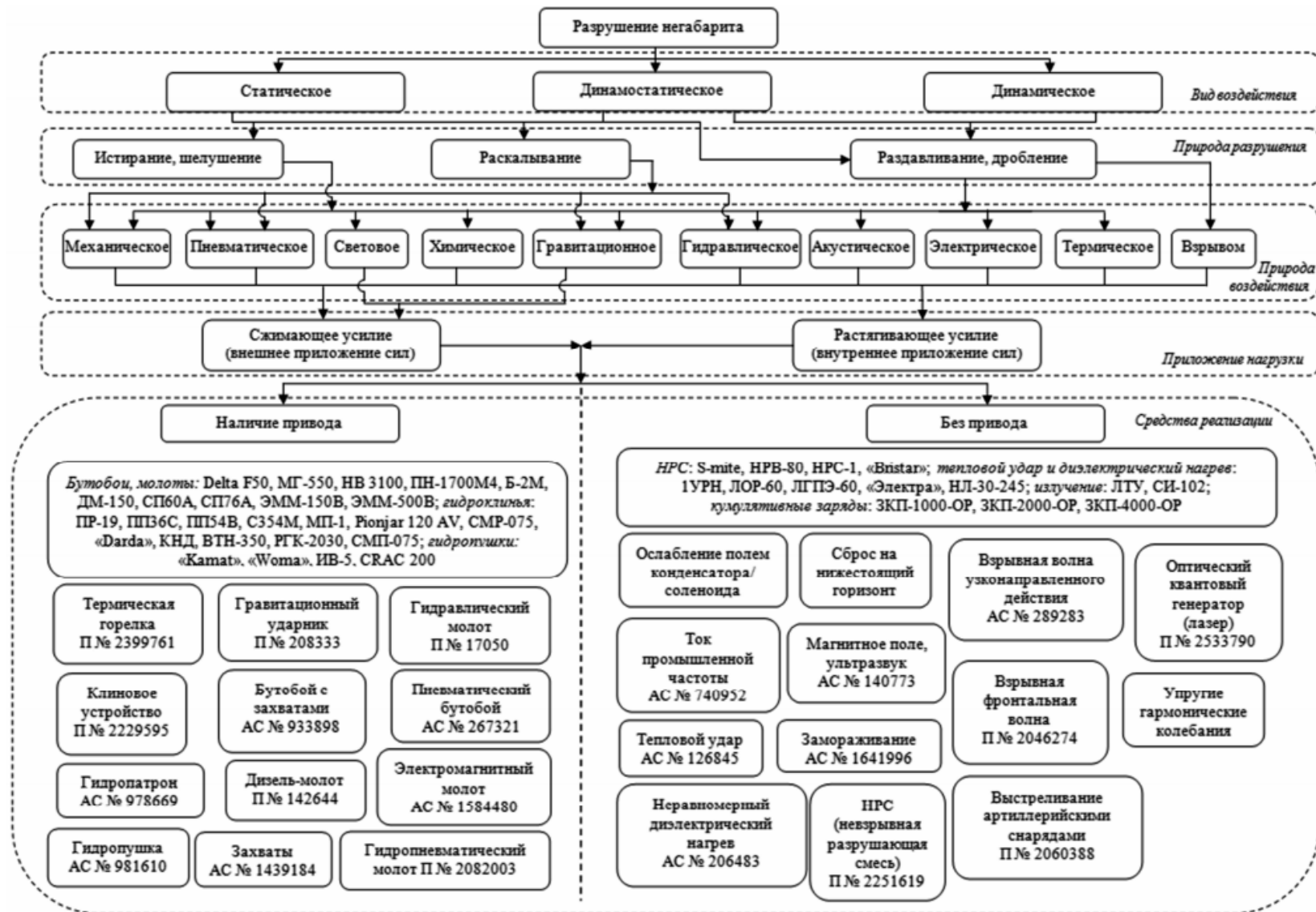


Рисунок 2.1 – Классификация способов разрушения негабарита [43]

## **2.2 Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора для нормальных условий**

### **2.2.1 Нагрузки на приводе подъема**

Как было сказано в разделе 1.5.1 первой главы, необходимо оценивать величину нагрузки в системе рабочего оборудования экскаватора при ведении работ не только для контроля перегрузок в этих механизмах, но и для оценки интенсивности выработки ресурса. Рабочее оборудование экскаватора следует рассматривать как двухзвенный механизм, представляющий собой рукоять с ковшом и седловой подшипник. Данный механизм имеет степень подвижности равную двум, что обуславливает наличие двух приводов – подъема и напора, придающих движению системе и, соответственно, ковшу в забое детерминировано заданную траекторию.

Так как экскаватор является горной машиной циклического действия, для полной оценки и анализа нагрузок рабочего оборудования необходимо понимать какие рабочие процессы составляют цикл работы во времени [121].

Для определения величины цикла работы экскаватора на стенде ООО «ИЗКАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» по разработанной ранее программой машинистом 8 разряда осуществлены 112 циклов работы экскаватора для нормальных условий эксплуатации. Продолжительность переходов в цикле экскавации и сами циклы были проанализированы и усреднены (рисунок 2.2), что позволило определить временные промежутки (переходы) работы экскаватора в цикле:

- ◆ от 0 до 10,25 с – процесс копания;
- ◆ от 10,25 до 15,0 с – поворот платформы и позиционирование рабочего оборудования для разгрузки;
- ◆ от 15,0 до 26,75 с – поворот платформы и позиционирование рабочего оборудования в исходное положение для начала нового цикла [122].

Общее время цикла составляет 26,75 с.

Для оценки влияния заданной траектории движения ковша экскаватора на загрузку приводов подъема и напора на рисунке 2.3 представлена схема рабочего оборудования экскаватора с указанием действующих сил и сил сопротивления.

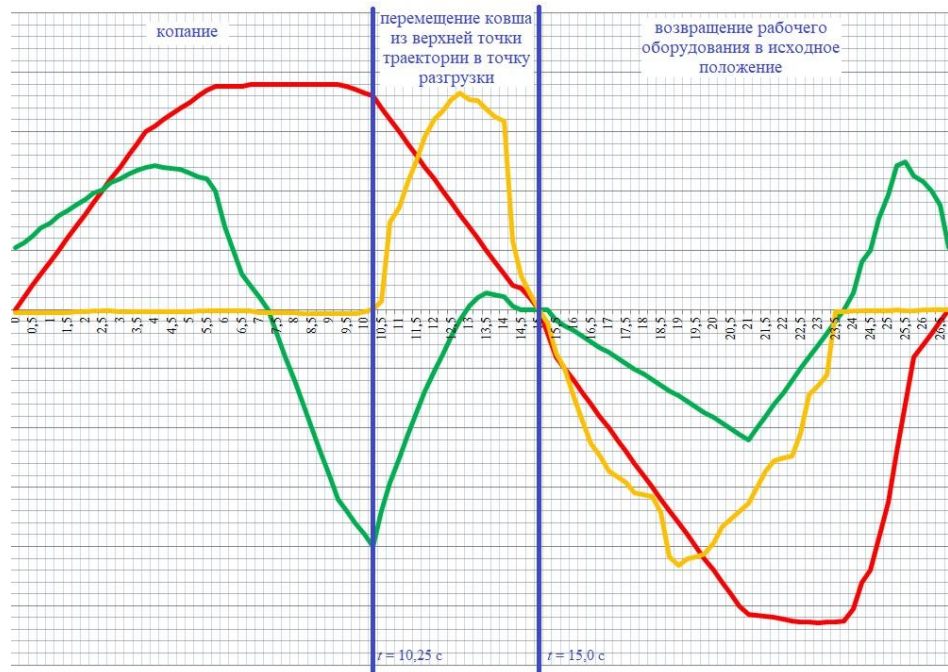


Рисунок 2.2 – Относительные усредненные значения переходов цикла экскавации ЭКГ-18Р по результатам стендовых испытаний (составлено автором)

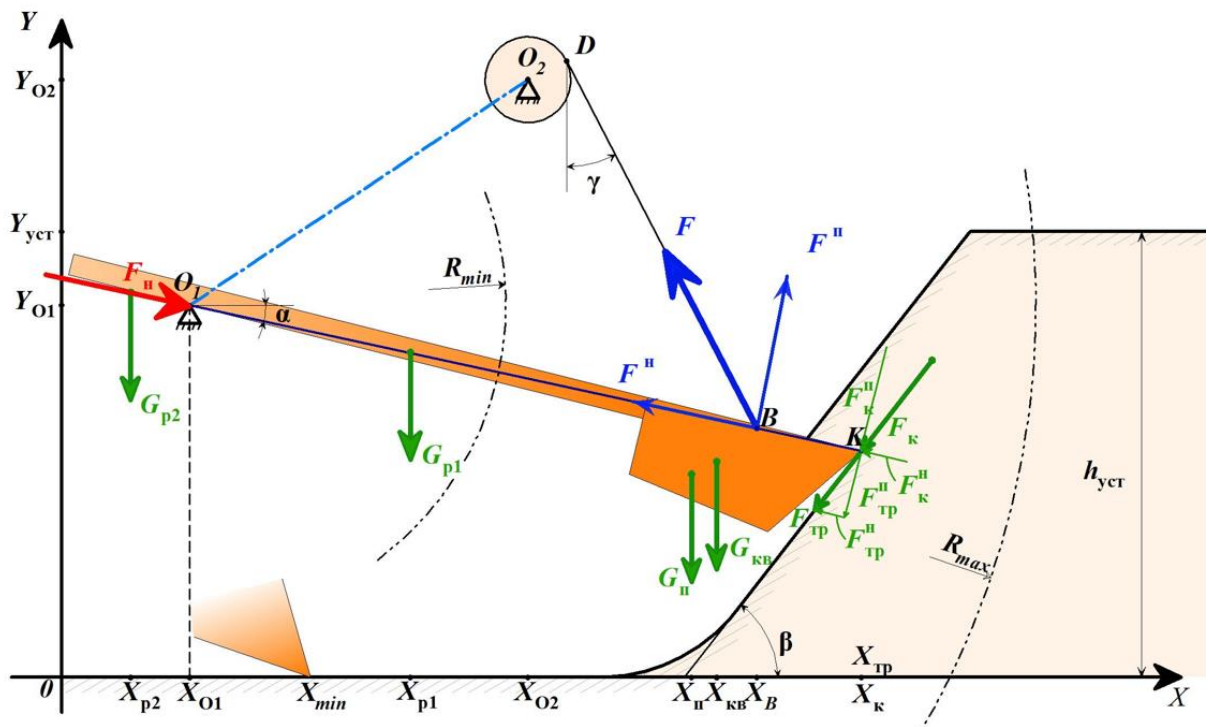


Рисунок 2.3 – Расчетная схема для оценки нагрузок рабочего оборудования экскаватора (составлено автором) [75]

На нагрузку приводов постоянно влияют силы веса рукояти  $G_p$ , объема экскавируемой горной массы  $G_{II}$  и вес ковша  $G_k$  [120].

При этом, вес ковша  $G_k$  остается неизменным на протяжении всего процесса экскавации, степень его влияния обусловлена углом  $\alpha$ , отклонением оси рукояти от

горизонтали. Вес ковша, принятый в данной работе, для экскаватора ЭКГ-18Р составляет 330 кН, что соответствует весу основного ковша.

В качестве условия принято допущение, что движение ковша в забое равномерно на протяжении всей траектории копания. При анализе нагруженности рабочего оборудования используется принцип Д'Аламбера, который предполагает, что если ко всем силам, действующим на механизм добавить силы инерции, то такая система считается находящейся в состоянии равновесия. Ускорения ковша и рукояти при копании пренебрежительно малы, поэтому в данном случае силами инерции можно пренебречь. Ковш наполняют до объема 18 м<sup>3</sup> согласно вместимости основного ковша, указанной в технической документации. После достижения ковшем высшей точки уступа и до момента разгрузки вес горной массы остается постоянным, а после разгрузки равен нулю [120]. Тогда вес горной массы  $G_{\Pi}$  в ковше будет равен (2.1):

$$\begin{cases} G_{\Pi i} = V_{\Pi i} \rho g = L_{\text{Тр}i} t B_{\text{к}} \rho g, \text{ если } 0 < t_{\text{ц}} \leq 10,25 \text{ с} \\ G_{\Pi} = V_{\Pi} \rho = L_{\text{Тр}} t B_{\text{к}} \rho g, \text{ если } 10,25 < t_{\text{ц}} \leq 15,0 \text{ с} \\ G_{\Pi} = 0, \text{ если } 15,0 < t_{\text{ц}} \leq 26,75 \text{ с} \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $V_{\Pi}$  – объем экскавируемой горной массы в ковше, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – насыпная плотность горной массы, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$t$  – толщина стружки (глубина внедрения ковша в забой), м;

$B_{\text{к}}$  – ширина режущей кромки ковша, м;

$t_{\text{ц}}$  – время цикла, с.

Вес рукояти (для экскаватора ЭКГ-18Р – 235,2 кН) делится осью седлового подшипника на две неравновесные части  $G_{\text{р}1}$  и  $G_{\text{р}2}$ . Веса двух частей рукояти непостоянны и меняют свои величины при перемещении ковша (и, соответственно, рукояти) к забою или от него. Таким образом, вес части рукояти перед седловым подшипником  $G_{\text{р}1}$  и вес части рукояти за ним  $G_{\text{р}2}$  определяются следующими соотношениями (2.2) и (2.3), соответственно:

$$G_{\text{р}1} = \frac{L_{\text{р}1} G_{\text{р}}}{L_{\text{р}}}, \quad (2.2)$$

$$G_{p2} = \frac{L_{p2}G_p}{L_p}, \quad (2.3)$$

где  $L_{p1}$  – длина части рукояти перед седловым подшипником, м;

$L_{p2}$  – длина части рукояти за седловым подшипником, м;

$L_p$  – длина рукояти, м.

На величину нагрузки рабочего оборудования экскаватора влияют также силы сопротивления движению ковша при разработке забоя, которые включают в себя сопротивление копания  $F_{\text{коп}}$  при установленной толщине стружки и соответствующие этому процессу силы трения ковша о забой  $F_{\text{тр}}$  (2.4):

$$F_{\text{тр}} = Nf = F_{\text{коп}} \frac{\cos(2\beta - 2\alpha - 90)}{2} f. \quad (2.4)$$

Таким образом, опираясь на представленную схему (рисунок 2.3) и уравнение моментов относительно точки  $O_1$  усилие в канатах подъемной лебедки  $F$  с учетом формул 2.1-2.4 определяется выражением (2.5):

$$\begin{cases} \text{если } \varphi \leq 90^\circ \\ F = \frac{(G_{p1}l_{p1} + G_k l_k + G_{п}l_{п} - G_{p2}l_{p2}) \cos \alpha + (F_{\text{коп}}l_{\text{коп}} + F_{\text{тр}}l_{\text{тр}}) \cos(90 + \alpha - \beta)}{\cos(\gamma + \alpha)l_F} K_D \\ \text{если } \varphi > 90^\circ \\ F = \frac{(G_{p1}l_{p1} + G_k l_k + G_{п}l_{п} - G_{p2}l_{p2}) \cos \alpha + (F_{\text{коп}}l_{\text{коп}} + F_{\text{тр}}l_{\text{тр}}) \cos(90 + \alpha - \beta)}{\cos(90 + \gamma - \alpha)l_F} K_D \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $l_{p1}$  и  $l_{p2}$  – длина, соответствующая расстоянию между седловым подшипником и центром тяжести частей рукояти перед седловым подшипником  $G_{p1}$  и за ним  $G_{p2}$ , соответственно;

$l_k$  – длина, соответствующая расстоянию между седловым подшипником и центром тяжести ковша  $G_k$ ;

$l_{п}$  – длина, соответствующая расстоянию между седловым подшипником и центром тяжести горной массы  $G_{п}$ ;

$l_{\text{коп}}$  – длина, соответствующая расстоянию от седлового подшипника до направления действия силы сопротивления движению ковша при разрушении забоя  $F_{\text{коп}}$ ;

$l_{\text{тр}}$  – длина, соответствующая расстоянию от седлового подшипника до направления действия силы трения ковша о забой  $F_{\text{тр}}$ ;

$l_F$  – длина, соответствующая расстоянию 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, введен для учета возможных динамических нагрузок, вызванных упругостью элементов конструкции при работе экскаватора [75].

Коэффициент динамичности для механизма подъема для рассматриваемых условий угольного забоя и близких к нему обычно не превышает 1,2-1,3 (раздел 1.4.1). В рамках данного исследования коэффициент динамичности  $K_d$  принят равным 1,2.

При этом усилие в канатах подъемной лебедки, согласно схеме (рисунок 2.3), раскладывается на две составляющие:

- подъемная составляющая  $F^п$ , перпендикулярна условной оси, соединяющей центр поворота рабочего оборудования относительно стрелы и точку копания (2.6):

$$F^п = F \cos(\gamma - \alpha); \quad (2.6)$$

- напорная составляющая  $F^н$ , направлена вдоль этой оси (2.7):

$$F^н = F \cos(90 + \alpha - \gamma). \quad (2.7)$$

Для расчета нагрузки необходимо определять траекторию движения ковша в забое. Для построения такой траектории за основу взята точка наибольшей высоты копания 14,7 м (согласно технической документации). От нее с учетом максимального выдвижения рукояти проведена наклонная прямая так, чтобы угол  $\beta$  (рисунок 2.3) был равен  $60^\circ$ . Данная траектория будет являться крайней дальней (ТД) линейно-наклонной траекторией с углом наклона  $60^\circ$ .

Эта прямая будет являться траекторией движения ковша только в процессе копания, так как достигнув высшей точки этой траектории ковш позиционируют в точку разгрузки (с учетом наибольших высоты и радиуса разгрузки согласно технической документации) и затем от нее ковш перемещают к точке начала траектории (с соответствующим шагом, равным внедрению ковша на толщину

стружки  $t$ ). Траектория позиционирования ковша под разгрузкой и начало следующего цикла представляет собой ломаную линию.

Также следует отметить, что высота положений седлового подшипника ( $Y_{O1}$ ) и барабана подъемной лебедки ( $Y_{O2}$ ) определена согласно габаритным размерам экскаватора ЭКГ-18Р и являются неизменными.

Таким образом, траектория движения ковша в цикле разбивается на дискретное количество точек с шагом, например, равным 0,5 м, и для каждой точки определяется положение ковша в забое, длины и углы, необходимые для оценки моментов на выходных валах приводов подъема и напора. По формуле (2.5) для каждого положения ковша на заданной траектории его движения оценивают величину усилия в канатах подъемной лебедки  $F$ .

Следует сказать, что при разных траекториях движения ковша в забое будут и различные усилия копания. В работе принято рассматривать три траектории движения ковша: крайнюю ближнюю (ТБ), крайнюю дальнюю (ТД) и среднюю, находящуюся между ними, траекторию (ТС). Они между собой, как правило, подобны.

На рисунке 2.4 представлено изменение величины подъемных усилий, создаваемых подъемной лебедкой экскаватора, в цикле при отработке забойного блока по крайней дальней (ТД) линейно-наклонной траектории с углом наклона  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной [75].

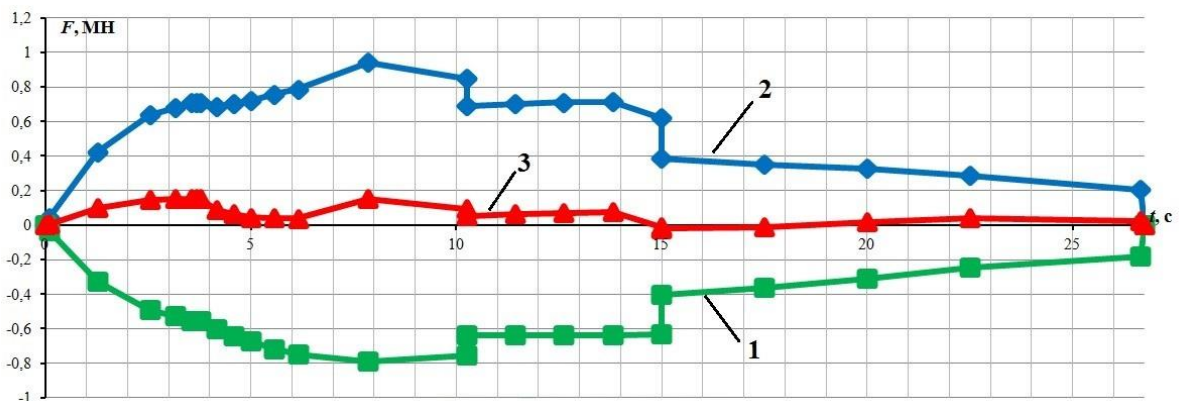


Рисунок 2.4 – Изменение усилий  $F^n$  создаваемых подъемной лебедкой экскаватора ЭКГ-18Р в цикле по крайней дальней (ТД) линейно-наклонной траектории с углом наклона  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной [75]

На данном рисунке зеленым цветом (1) представлены суммарные усилия сопротивления. Они представляют из себя сумму (с учетом знака согласно уравнению моментов) проекций весовых составляющих – вес рукояти перед и за седловым подшипником  $G_{p1}$  и  $G_{p2}$ , вес экскавируемой горной массы  $G_{п}$  и вес ковша  $G_{к}$ , а также проекций силы сопротивления копания  $F_{коп}$  при установленной толщине стружки и силы трения ковша о забой  $F_{тр}$  на перпендикуляр условной оси, соединяющей центр поворота механизма рабочего оборудования и точку копания.

Синим цветом (2) представлена подъемная составляющая усилия в канатах подъемной лебедки  $F^п$ .

Красным цветом (3) представлена результирующая двух описанных выше изменений усилий, величина которой представляет собой неучтенные сопротивления [75].

При работе экскаватора подъемная составляющая усилия в канатах в процессе копания возрастает до достижения ковшом верхней бровки уступа. Здесь же (10,25 с) силы сопротивления копания и трения обнуляются вследствие окончания процесса копания. Далее усилия незначительно меняются до точки разгрузки (15 с), где скачкообразно падают после выгрузки ковша с дальнейшим плавным снижением до возвращения рабочего оборудования в исходное положение. Алгоритм оценки соответствующих усилий реализован в программе для ЭВМ «Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665458) [97] (Приложение Б).

Аналогичные расчеты проведены для трех разных линейно-наклонных траекторий – крайней ближней (ТБ), средней (ТС) и крайней дальней (ТД) при углах наклона  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  и  $80^\circ$ . При этом крайняя ближняя (ТБ) траектория ограничена максимально возможным втягиванием рукояти, крайняя дальняя (ТД) – максимально возможным ее выдвиганием, а средняя (ТС) является промежуточной между ТБ и ТД. Все траектории построены с условием достижения

ковша наибольшей высоты копания при установленном объеме экскавированного угля в ковше.

Для анализа полученных значений подъемного усилия при разных траекториях были выбраны восемь характерных точек с привязкой ко времени цикла. Значение усилия в каждой из точек было соотнесено к величине усилия, равной 342287 Н, в точке разгрузки (15 с), так как положение рабочего оборудования и, соответственно, значение усилия в этой точке для всех траекторий одинаково [75].

В таблице 2.1 представлены полученные относительные величины усилия в канатах подъемной лебедки для крайней ближней (ТБ), средней (ТС) и крайней дальней (ТД) линейно-наклонных траекторий с углами наклона 60°, 70° и 80°.

Таблица 2.1 – Относительная величина суммарного усилия в канатах подъемной лебедки для заданной траектории [75]

Характерные точки цикла	Угол наклона траектории движения ковша ( $\beta$ ), °								
	60			70			80		
$t, c$	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	12,441	12,820	13,389	12,733	12,978	13,811	13,380	12,946	14,375

Усилие в канатах подъемной лебедки для траектории движения ковша с углом ее наклона относительно горизонтали 60° при уменьшении расстояния между экскаватором и обрабатываемым уступом уменьшается для всех рассматриваемых точек, кроме точки, соответствующей в позиции 10,25(2) с, соответствующей положению ковша экскаватора в высшей точке копания. Причем значение усилия сначала увеличивается на 21,7 % для средней траектории (ТС), а затем уменьшается на 10 % для крайней ближней траектории (ТБ). Незначительное увеличение (на 1,1 %) усилия при уменьшении расстояния наблюдается, когда

канат перпендикулярен условной оси, соединяющей центр поворота механизма рабочего оборудования и точку копания 5 с.

Для угла наклона  $70^\circ$  в точке 5 с, когда канат перпендикулярен основной оси при уменьшении расстояния характерно сначала уменьшение усилия на 10,7 %, а затем увеличение на 26,8 % относительно базового показателя. Также в начале копания (3,76 с) усилие при уменьшении расстояния увеличивается на 9,2 %. Остальные точки имеют одинаковые тенденции изменения усилия как при угле  $60^\circ$ .

Для угла наклона  $80^\circ$  в начале копания (3,76 с) для крайней ближней траектории (ТБ) характерно увеличение нагрузки на 35,5 % по сравнению с крайней дальней траекторией (ТД), однако при средней траектории (ТС) в этой точке нагрузка уменьшается на 18,1 %. Характер изменения усилия в других точках аналогичен углу  $70^\circ$ .

При суммировании полученных соотношений всех точек для каждой траектории выявлено, что наименьшие усилия для составляющей подъема возникают при крайней ближней траектории (ТБ) с углом  $60^\circ$  [75].

### **2.2.2 Нагрузки привода напора**

Аналогично анализу изменения величины подъемного усилия, проведен анализ изменения величины напорного усилия в цикле. На рисунке 2.5 представлено изменение величины напорных усилий в цикле при отработке забойного блока по крайней дальней линейно-наклонной траектории с углом наклона  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной.

Зеленым (1) и синим (2) цветом представлены напорные составляющие усилий в подъемных канатах, спроецированные на ось, соединяющую центр поворота механизма рабочего оборудования и точку копания.

Здесь результирующая усилия, представленная красным цветом (3), указывает величину напорного усилия, необходимую для осуществления процесса копания по заданной траектории. На основании полученных результатов ясно, что определяющим в формировании (и величине) нагрузки напорного механизма является механизм подъема.

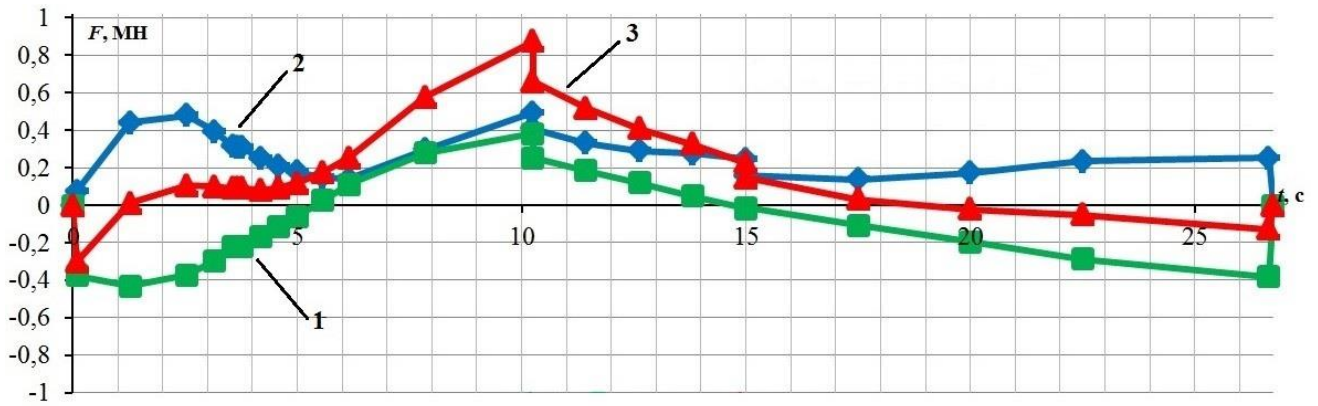


Рисунок 2.5 – Изменение усилий  $F^H$  создаваемых подъемной лебедкой экскаватора ЭКГ-18Р в цикле по крайней дальней линейно-наклонной траектории с углом наклона  $60^\circ$  и высоте уступа, равной эксплуатационной [76]

Принято, что положительное значение на рисунке 2.5 – это усилие, направленное от забоя (втягивание рукоятки), а отрицательное – к забою [76]. Соответственно, при положительных значениях напорного усилия машинисту необходимо выдвигать рукоять и ковш в направлении забоя, при отрицательных – втягивать, корректируя значение усилия на заданную величину (линия 3, рисунок 2.5).

Суммарные внешние усилия, действующие в системе, в начале цикла имеют отрицательное значение, так как их результирующая направлена в сторону забоя, затем в точке 5,5 с становятся положительными, возрастая до момента достижения ковшом высшей точки копания (10,25 с). После чего контакт ковша с забоем прерывается, заполненный ковш опускают, позиционируя его под разгрузку. Вновь, результирующая внешних усилий после пересечения точки разгрузки (15 с) становится отрицательной. Это обусловлено пересечением рукоятки горизонтальной оси и изменением направления составляющих этого усилия в сторону от забоя [76]. Осевая составляющая подъемного усилия в канате всегда положительна, так как ее вектор всегда направлен от забоя.

Аналогично анализу величин усилия в канатах подъемной лебедки при разных траекториях копания, для восьми характерных точек в таблице 2.2 представлены полученные относительные величины напорного усилия (базовое значение – 145275 Н) для крайней ближней (ТБ), средней (ТС) и крайней дальней (ТД) линейно-наклонных траекторий с углами наклона  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  и  $80^\circ$  [76].

Таблица 2.2 – Относительная величина напорного усилия [76]

Характерные точки цикла	Угол наклона траектории движения ковша ( $\beta$ ), °								
	60			70			80		
$t, c$	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	17,373	20,377	6,711	13,979	20,768	4,424	11,481	21,528

При увеличении расстояния между экскаватором и обрабатываемой траекторией характерно увеличение значений напорного усилия для всех точек, кроме точки 25 с, изменения значений которой связаны со спецификой позиционирования ковша экскаватора.

Для угла наклона  $60^\circ$  при изменении траектории от крайней ближней (ТБ) до крайней дальней (ТД) значения величин напорного усилия для рассматриваемых точек варьируется в диапазоне 0,5-2 о.е., для  $70^\circ$  0,7-4 о.е. и для  $80^\circ$  1-5,5 о.е. (о.е. – относительных единиц).

При рассмотрении изменения усилия напора для угла наклона траектории движения ковша в  $80^\circ$  разброс усилий в зависимости от положения траектории относительно экскаватора составляет 5,5 раза (для точки 10,25(1) с), в то время как для угла  $60^\circ$  только 1,5 раза для той же точки. Однако при максимальных значениях в крайней дальней траектории (ТД) значение усилия при  $80^\circ$  меньше, чем при других углах.

Выявленные значения можно рассматривать как некоторые оценочные показатели, минимальная сумма которых соответствует экстремуму функции, коей является минимальное усилие, обеспечивающее экскавацию. Подводя итог данному анализу, можно констатировать, что минимальное усилие напора имеет место при крайней ближней траектории (ТБ) с углом наклона  $80^\circ$  и  $70^\circ$  [76].

### 2.2.3 Значение крутящих моментов

Для оценки влияния траектории копания на развиваемый момент в двигателях рабочего оборудования экскаватора необходимо найти величины моментов, развиваемых в двигателях подъема и напора через следующие соотношения (2.8) и (2.9), соответственно:

$$T_{\text{п}} = \frac{FR_{\text{п}}}{i_{\text{п}}k_{\text{п}}}, \quad (2.8)$$

где  $F$  – суммарное усилие в канатах подъемной лебедки, Н;

$R_{\text{п}}$  – радиус барабана подъемной лебедки, м;

$i_{\text{п}}$  – общее передаточное отношение привода подъема;

$k_{\text{п}}$  – количество двигателей подъема.

$$T_{\text{н}} = \frac{F_{\text{н}}R_{\text{н}}}{i_{\text{н}}k_{\text{н}}}, \quad (2.9)$$

где  $F_{\text{н}}$  – напорное усилие, Н;

$R_{\text{н}}$  – радиус кремальерной шестерни, м;

$i_{\text{н}}$  – общее передаточное отношение привода напора;

$k_{\text{н}}$  – количество двигателей напора.

Полученные результаты представлены на рисунке 2.6 в виде плоскости, которая показывает взаимосвязь крутящих моментов двигателей подъема и напора в цикле. По оси абсцисс представлены значения момента двигателя подъема, по оси ординат – двигателя напора. Здесь цикл начинается в начале координат, далее красным цветом представлен процесс копания, желтым – перемещение ковша в точку разгрузки и зеленым – возвращение ковша в исходное положение для начала следующего цикла. Горизонтальной и вертикальной синими линиями обозначено значение момента отсечки каждого из двигателей [76].

Характер получившихся фигур во всех рассматриваемых случаях обладает очевидным подобием с характерными точками. Максимальный момент на двигателе подъема 10702 Н·м развивается при крайней дальней траектории (ТД) и с углом 80° и на двигателе напора 9680 Н·м при крайней дальней траектории (ТД) с углом 70°.

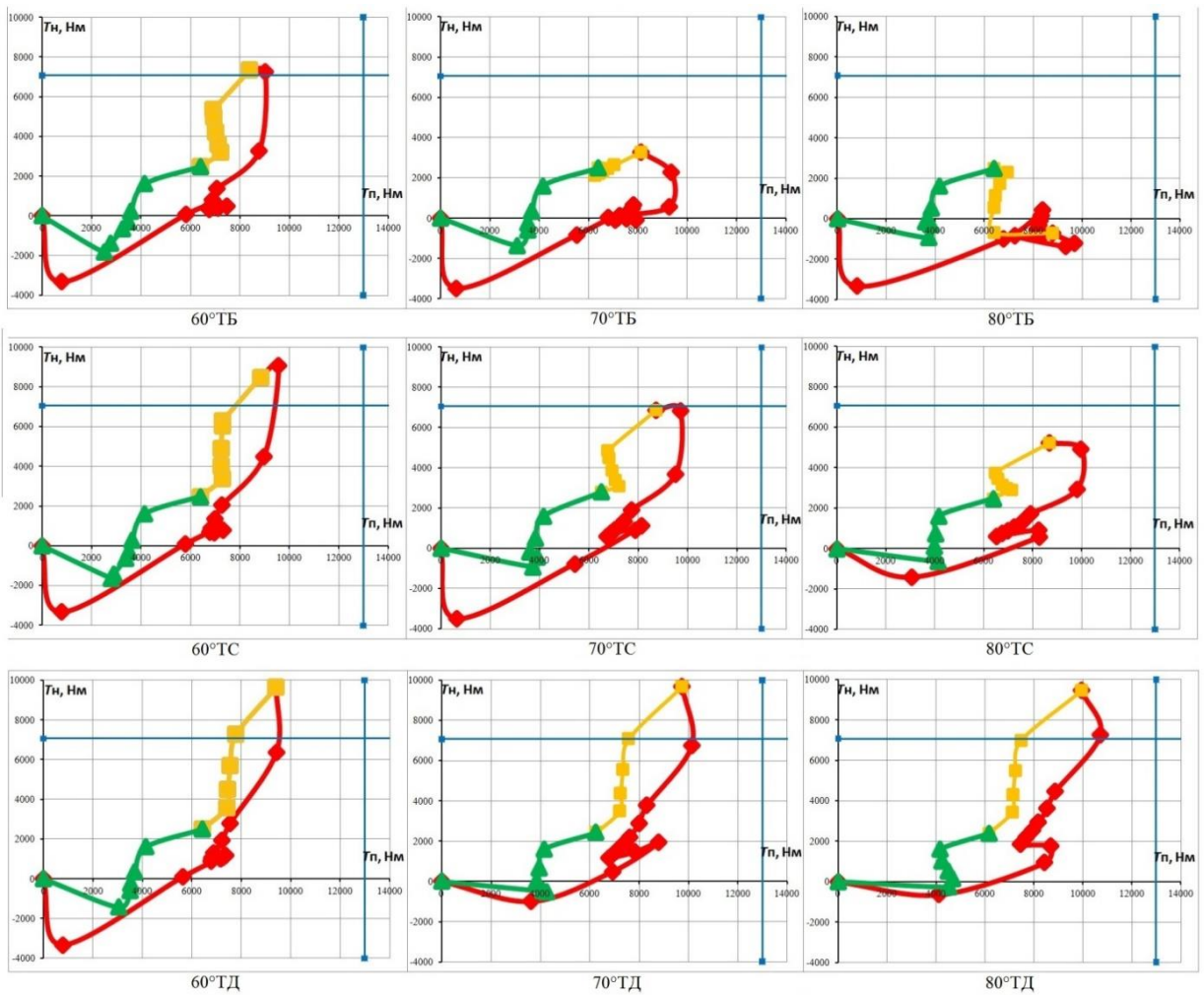


Рисунок 2.6 – Взаимосвязь подъема и напора в двигателях экскаватора ЭКГ-18Р при разных траекториях отработки уступа [76]

При увеличении расстояния между экскаватором и обрабатываемой траекторией значения крутящих моментов двигателей напора и подъема увеличиваются. В то же время, при увеличении угла наклона траектории значения момента, развиваемого двигателем напора, в цикле уменьшаются, а на двигателе подъема возрастают [76].

Момент напора при крайнем дальнем положении (ТД) при рассматриваемых углах отработки, а также при рассматриваемых положениях при угле отработки  $60^\circ$  достигает момента отсечки. Соответственно работа двигателей рабочего оборудования в этих положениях нежелательна [119]. Что подтверждается совпадением авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

### 2.2.4 Изменение работы, совершаемой двигателями подъема и напора

Для комплексного анализа работы приводов рабочего оборудования необходимо определить работу, совершаемую двигателями подъема и напора за рабочий цикл функционирования экскаватора по разным траекториям [77].

Для того, чтобы определить работу, совершаемую двигателем подъема, сначала необходимо определить скорость изменения длины каната между рассматриваемыми положениями (2.10):

$$v'_{пj} = \frac{l_{кi} - l_{кi-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (2.10)$$

где  $l_{кi} - l_{кi-1}$  – изменение длины каната между положениями  $i-1$  и  $i$ ;

$t_{ki} - t_{ki-1}$  – промежуток времени между положениями  $i-1$  и  $i$ ;

Далее угловая скорость привода подъема, развиваемая между рассматриваемыми положениями, определяется по следующей формуле (2.11):

$$\omega'_{пj} = \frac{v'_{пj} i_{п}}{R_{п}}. \quad (2.11)$$

Угловая скорость в положениях, рассматриваемых ранее, будет равна (2.12):

$$\omega_{пi} = \frac{\omega'_{пj} + \omega'_{пj+1}}{2}. \quad (2.12)$$

Тогда мощность, развиваемая приводом подъема, в рассматриваемом положении определяется через соотношение (2.13):

$$P_{пi} = \frac{\omega_{пi} T_{п}}{1000}. \quad (2.13)$$

В итоге работа привода подъема в цикле будет равна сумме затраченной работы во всех рассматриваемых положениях (2.14):

$$A_{п} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (P_{пi} + P_{пi-1})(t_i - t_{i-1}). \quad (2.14)$$

Для определения работы, совершаемой двигателем напора, необходимо определить скорость изменения длины рукояти от седлового подшипника до точки крепления ковша между рассматриваемыми положениями (2.15):

$$v'_{нj} = \frac{l_{pi} - l_{pi-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (2.15)$$

где  $l_{pi} - l_{pi-1}$  – изменение длины рукояти от седлового подшипника до точки крепления ковша между положениями  $i-1$  и  $i$ ;

$t_{ki} - t_{ki-1}$  – промежуток времени между положениями  $i-1$  и  $i$ .

Далее угловая скорость привода напора, развиваемая между рассматриваемыми положениями, определяется по следующей формуле (2.16):

$$\omega'_{hj} = \frac{v'_{hj} i_h}{R_h}. \quad (2.16)$$

Угловая скорость в положениях, рассматриваемых ранее, будет равна (2.17):

$$\omega_{hi} = \frac{\omega'_{hj} + \omega'_{hj+1}}{2}. \quad (2.17)$$

Тогда мощность, развиваемая приводом напора, в рассматриваемом положении определяется через соотношение (2.18):

$$P_{hi} = \frac{\omega_{hi} T_h}{1000}. \quad (2.18)$$

В итоге работа двигателя напора в цикле будет равна сумме затраченной работы во всех рассматриваемых положениях (2.19):

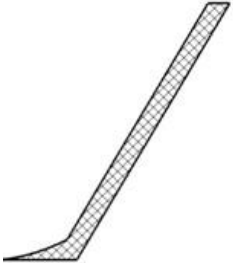
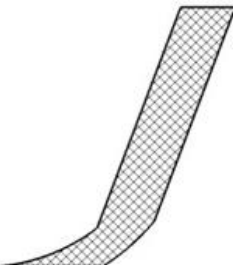
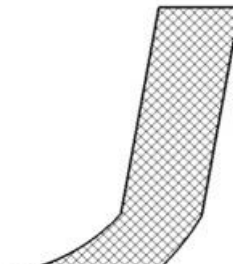
$$A_h = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (P_{hi} + P_{hi-1})(t_i - t_{i-1}). \quad (2.19)$$

В таблице 2.3 на основании выражений 2.14 и 2.19 представлены относительные величины полученных значений работы двигателей подъема и напора для рассматриваемых траекторий, отнесенных к базовому значению. В качестве базового принято значение работы на один двигатель при отработке по средней траектории с углом наклона  $70^\circ$ : для привода подъема величина работы составляет 7500 кДж, для напора – 1500 кДж [77]. Цветовая гамма в таблице отражает изменение величин этих параметров.

Как видно из таблицы 2.3, наименьшая работа двигателем подъема совершается при крайней дальней траектории (ТД) с углом наклона  $60^\circ$ , а наибольшая при крайней ближней траектории (ТБ) с углом наклона  $80^\circ$ . При этом, при указанных траекториях двигатель напора совершает наибольшую и наименьшую работу, соответственно. Это приводит к выводу, что необходимо находить баланс между работой двух двигателей, и также учитывать, что разница

относительных величин в напорной характеристике в разы больше, чем в подъемной.

Таблица 2.3 – Значение работы, совершаемой двигателями подъема и напора при рассматриваемых траекториях с различными углами их наклона за цикл, соотнесенной к базовой величине (для подъема 7500 кДж, для напора 1500 кДж) [77]

Угол наклона	Двигатель	Траектория			Фигура площади сечения забойного блока
		крайняя ближняя (ТБ)	средняя (ТС)	крайняя дальняя (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	

Необходимо проводить оценку влияния траектории копания на работу сразу всей системы приводов рабочего оборудования, включающую в себя два двигателя подъема и один двигатель напора. Как видно из таблиц 2.1 и 2.2, степень влияния изменения траектории копания на величину нагрузок и, соответственно, работы для двигателя подъема не такая существенная, как для двигателя напора.

Имеется ввиду, что в рамках одного набора рассматриваемых положений рабочего оборудования в забое для двигателя подъема изменение траектории

копания влияет на изменение нагрузок в системе не так значительно, как для двигателя напора. Если обратиться к таблице 2.1 (нагрузка подъема), разница между максимальным и минимальным итоговым значением равна 1,934 о.е. (относительных единиц), а для привода напора (таблица 2.2) разница составляет 17,104 о.е. Тем не менее, необходимо также учитывать величину самих подъемных и напорных нагрузок, так как величина подъемных намного выше.

На рисунке 2.7 представлены величины работы, затраченной приводами рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-18Р в цикле его функционирования при крайней ближней (ТБ), средней (ТС) и крайней дальней (ТД) линейно-наклонных траекториях с углами наклона  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ . Синим цветом указана работа двух двигателей подъема, красным – двигателя напора.

Из рисунка 2.7 видно, что работа, совершаемая приводом подъема, уменьшается при переходе траектории движения ковша от крайней ближней до крайней дальней, а также при уменьшении угла наклона обрабатываемой линейно-наклонной траектории. Работа привода напора, также, уменьшается при изменении этих траекторий от крайней дальней до крайней ближней и увеличении угла наклона последней [77].

Таким образом, наименьшая затраченная работа приводов рабочего оборудования экскаватора совершается при всех рассматриваемых линейно-наклонных траекториях с углом их наклона  $60^\circ$ . Наибольшая затраченная работа имеет место быть при отработке уступа крайней ближней траектории с углом наклона  $80^\circ$  [77].

При этом площадь сечения забойного блока (и, соответственно, объем) экскавированной горной массы с одного установка экскаватора при угле линейно-наклонной траектории  $80^\circ$  в 3,5 раза больше, чем при  $60^\circ$  (таблица 2.3).

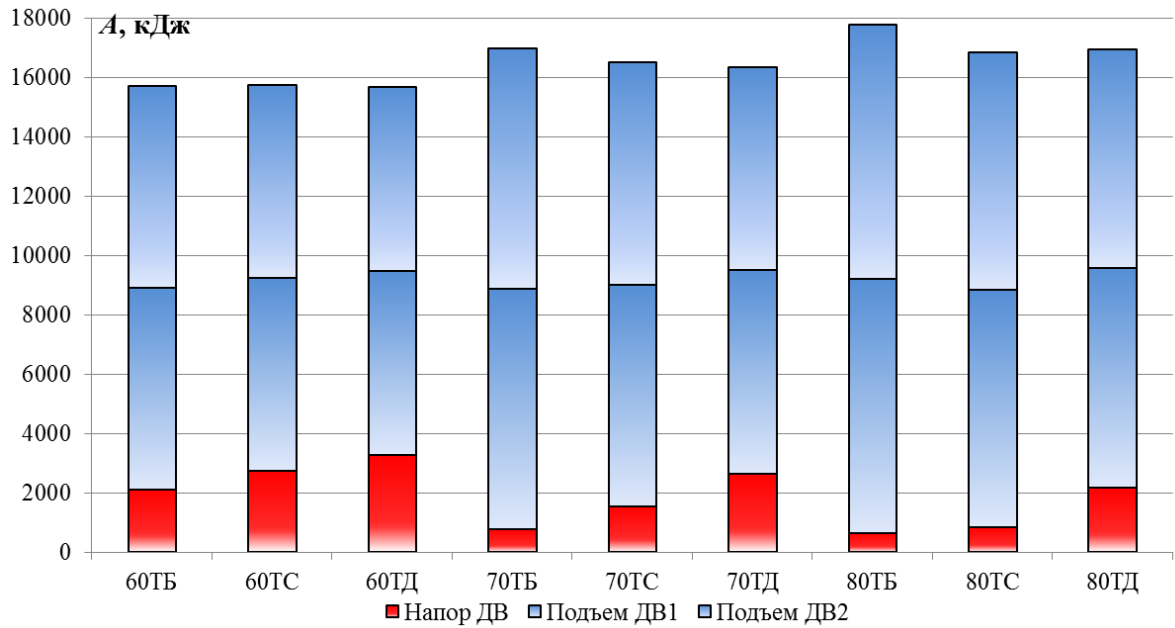


Рисунок 2.7 – Затраченная работа приводов рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-18Р в цикле его функционирования при линейно-наклонных траекториях с углами наклона 60°, 70° и 80° [77]

Также стоит помнить, что при отработке по крайней дальней траектории и траекториях с углами наклона 60° действительный момент пересекает величину момента отсечки. Таким образом, при комплексной оценке всех рассмотренных параметров выявлено, что отработку забойного блока необходимо проводить по средней траектории с углами наклона 70-80°.

### 2.3 Оценка нагрузок при радиально-линейной траектории

Переходя от идеализированного подхода в анализе процесса экскавации к приемам работы карьерных экскаваторов, реализуемых на практике, необходимо рассмотреть степень нагруженности приводов подъема и напора при радиально-линейной траектории отработки уступа. Она представляет собой сочетание радиальной и линейной траекторий. Необходимо понимать, что отработка уступа по траектории с постоянным радиусом невозможна из-за соображений безопасности ведения работ, так как при такой траектории в ее точках, расположенных выше напорного вала, будет образовываться навес [77]. Для отработки этого участка траектории, по достижении рукоятью горизонтального

положения, траектория ковша должна быть линейно-наклонной с углами  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  или  $80^\circ$ , аналогично примерам, рассмотренным ранее (рисунок 2.8).

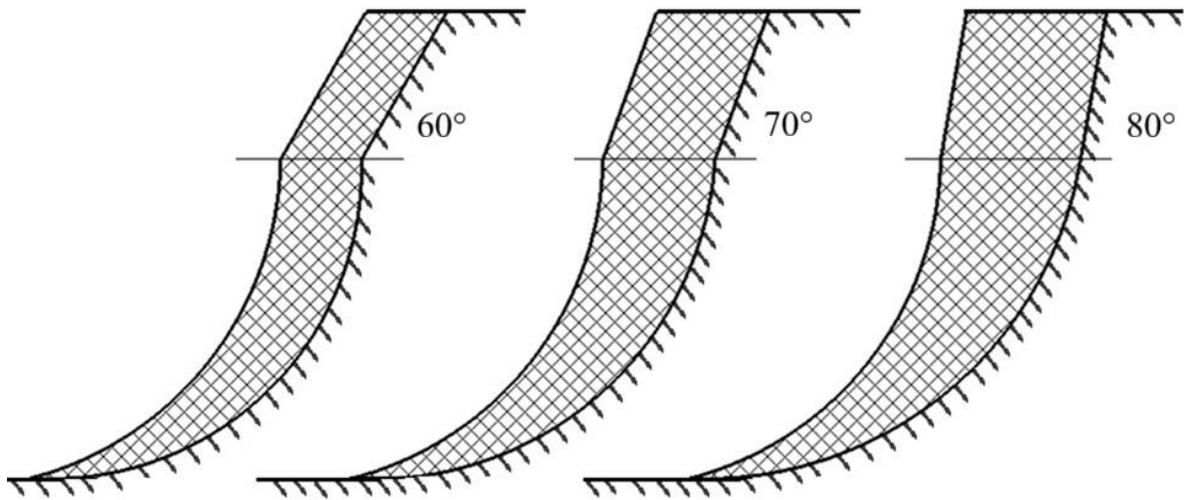


Рисунок 2.8 – Отрабатываемая с одного установка площадь сечения забойного блока при радиально-линейной траектории с углами линейной части  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  и  $80^\circ$  (составлено автором)

Для представленных траекторий найдены подъемные и напорные усилия полного рабочего цикла экскаватора: копание, поворот, позиционирование ковша над самосвалом для разгрузки и возвращения его в исходное положение.

Подъемные и напорные усилия при копании по радиальной траектории в начале цикла имеют одинаковые значения, но по мере приближения рукояти к горизонту их значения разнятся. Как подъемное, так и напорное усилия при отработке по радиальной траектории меньше, чем при линейно-наклонной. Особенно это заметно при оценке напорного усилия на крайней ближней траектории.

Крутящий момент двигателя напора на радиальном участке траектории отработки уступа имеет также значения меньше, чем при линейной, не достигая величины момента отсечки, как это было при линейно-наклонных траекториях с углом  $60^\circ$ , за исключением крайней дальней (ТД) траектории, что говорит о более щадящих режимах работы привода напора. Крутящий момент двигателя подъема при радиальной траектории, также, как и при линейно-наклонной, не достигает величины момента отсечки.

Аналогично расчетам линейно-наклонной траектории найдена затраченная работа приводов рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-18Р в цикле его функционирования при радиально-линейной траектории.

После чего проведен анализ работы приводов при рассматриваемых траекториях, но не частных случаях крайней ближней (ТБ), средней (ТС) и крайней дальней (ТД) траекторий, а их совокупности: работы экскаватора от крайней ближней (ТБ) до крайней дальней (ТД) траектории с одного установка (местоположения в забое).

Для случаев линейно-наклонной и радиально-линейной траекторий с углами наклона всей и части траектории, соответственно,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  и  $80^\circ$  определены следующие характеристики работы: максимально возможный вынимаемый объем горной массы с учетом стружки, количество циклов работы экскаватора для отработки этого объема, значение затраченной работы для отработки фигуры площади сечения забойного блока шириной 3 м, соответствующей ширине ковша (единичный объем), а также потребная средняя работа и средняя мощность на один цикл и удельная работа, необходимая для выемки одного кубометра горной породы (таблица 2.4) [77].

При сравнении отработки по радиально-линейной и линейно-наклонной траекториям с углами наклона  $60^\circ$  видно, что у первой траектории с одного установка вынимаемый объем больше в 2 раза, при этом средняя работа приводов рабочего оборудования за цикл примерно одинакова. Для данного угла, отработка по радиально-линейной траектории позволяет производить выемку большего объема горной массы с одного установка при одинаковой выработке ресурса за цикл приводами подъема и напора, при этом снижается интенсивность выработки ресурса привода хода, связанная с уменьшенной динамикой пусков и остановов [77].

Таблица 2.4 – Показатели работы приводов подъема и напора с линейно-наклонной и радиально-линейной траекториями при обработке забойного блока [77]

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
Стружка, м	0,29	0,31	0,33	0,26	0,26	0,27
Кол-во циклов <i>n</i> , шт	5	10	14	10	15	19
Средняя работа за цикл, кДж	15713	16564	17035	15359	14378	13237
Работа на <i>n</i> 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

При сравнении траекторий с углами наклона 80° заметны другие тенденции. Несмотря на увеличение количества циклов с одного установа, вынимаемый объем при линейно-наклонной траектории больше, чем при радиально-линейной, а также, несмотря на большее значение средней работы за цикл, для линейно-наклонной траектории характерно меньшее значение удельной работы, необходимой для выемки одного кубометра горной породы. Таким образом, при снижении интенсивности выработки ресурса привода хода увеличивается интенсивность выработки ресурса приводов рабочего оборудования [77].

Также при этом, обработка уступа с углом наклона 80° позволит снизить выработку ресурса привода хода примерно в 2-3 раза, в сравнении с линейно-наклонной траекторией в 60°, из-за снижения интенсивности включений привода хода, что ведет к менее интенсивной выработке ресурса, несмотря на равное перемещение при отработке равных объемов горной массы. Соответственно, это приведет к увеличению интервала между работами по техническому обслуживанию привода хода, что в свою очередь снизит время простоя и будет способствовать возрастанию коэффициента готовности экскаватора [77].

## 2.4 Определение коэффициента расходования ресурса

Чтобы оценить влияние выбранной траектории на состояние машины необходимо встать на позицию энергетического подхода в оценке ресурса (глава 1.5.1). У каждого типа машин изначально имеется одинаковый энергоресурс, и в зависимости от условий функционирования этот ресурс расходуется с разной интенсивностью. Очевидно, что выработанный за цикл ресурс будет определяться частным от деления величины его энергоресурса на соответствующую усредненную мощность, определенную как отношение работы за цикл к величине этого цикла [77].

Определение величины энергоресурса затруднительно, однако, рассматривая задачу оценки выработки ресурса в относительном виде и памятуя о неизменности энергоресурса объекта, означенная задача легко решается, сокращением этой постоянной при делении затраченной работы экскаватором в фактических условиях эксплуатации к работе этого же экскаватора в нормальных условиях за искомый период времени.

Зная значение мощности (работы, отнесенной к периоду времени) при базовых условиях эксплуатации, и соотнеся его к полученным значениям потребляемой мощности привода подъема и напора в других условиях, можно определить коэффициент, учитывающий изменение скорости выработки ресурса этих приводов.

Определив значения средней потребляемой мощности за цикл приводами рабочего оборудования для искомой траектории при заявленном подходе, необходимо отнести это значение к базовой мощности при нормальных условиях [77]. Коэффициент расходования ресурса целесообразнее оценивать не к теоретической линейно-наклонной траектории, а к траектории копания, в наибольшей степени отвечающей фактическим условиям эксплуатации, то есть радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$ . Для такой траектории мощность для привода подъема равна 249 кВт, а для привода напора 76,2 кВт. Необходимо помнить, что система рабочего оборудования

рассматриваемого экскаватора приводится в движение двумя двигателями подъема и одним двигателем напора.

Таким образом, коэффициент расходования ресурса будет определяться следующей формулой (2.20):

$$k_{pp} = \frac{\sum_{i=1}^n N_n}{nN_6}, \quad (2.20)$$

где  $N_n$  – средняя потребляемая мощность приводов экскаватора за цикл при заданных условиях, кВт;

$n$  – количество циклов;

$N_6$  – базовая мощность, равная 574,2 кВт – средняя мощность приводов экскаватора за базовый цикл, определяемая как сумма базовых мощностей, кВт.

При отработке забойного блока ковшом 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, при этом максимальная разница для рассматриваемых траекторий составляет 25 % по отношению к нормальным условиям (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Коэффициент расходования ресурса для рассматриваемых траекторий (по данным автора)

Характеристики	Линейно-наклонная			Радиально-линейная		
	Угол наклона траектории			Угол наклона части траектории		
	60°	70°	80°	60°	70°	80°
Коэффициент расходования ресурса $k_{pp}$	1,02	1,07	1,11	1	0,94	0,86

Рассмотрев и оценив работу экскаватора для нормальных условий его функционирования необходимо в первую очередь проверить выводы об оценке величины сопротивления копанью на физической модели и в случае удовлетворительной сходимости величины теоретической оценки и результатов физического моделирования, используя численное моделирование, оценить влияние насыпной плотности и кусковатости на процесс копания.

## 2.5 Корректировка графика ТОиР по результатам наработки для повышения срока службы экскаватора

Коэффициент расходования ресурса показывает, насколько быстро или медленно расходуется ресурс экскаватора в рассматриваемых условиях эксплуатации в отличие от базовых. Соответственно, этот коэффициент может быть использован при назначении сроков проведения мероприятий ТОиР, а точнее для корректировки периодичности проведения этих мероприятий, обеспечивающих полноту использования ресурса и, как следствие, максимально возможную наработку экскаватора в конкретных условиях эксплуатации.

Для этого необходимо величину наработки экскаватора каждого вида работ для базовых условий разделить на коэффициент расходования ресурса, полученный из выражения 2.20. При этом  $k_{pp}$  может быть больше единицы.

Используя график проведения мероприятий по ТОиР для базовых условий и основываясь на формуле расчета годовой наработки экскаватора  $Q_б$ , корректировка проведения мероприятий планово-предупредительного ремонта (ППР) с учетом коэффициента расходования ресурса будет проводиться следующим образом.

Значение годовой наработки корректируется соотношением (2.21):

$$Q = \frac{Q_б}{k_{pp}}, \quad (2.21)$$

где  $Q_б$  – годовая наработка экскаватора.

То есть при работе в более легких условиях коэффициент  $k_{pp}$  меньше единицы и, следовательно, периоды межремонтного цикла следует делать продолжительнее, а при работе экскаватора в более тяжелых условиях, в сравнении с базовыми – сокращать, проводя мероприятия технического обслуживания через меньшие промежутки времени.

Теоретически оценено влияние траекторий на энергозатраты при работе экскаватора, но эти теоретические рассуждения следует подтвердить экспериментально. Кроме того, сложность оценки процесса влияния насыпной плотности экскавируемого материала и изменения его кусковатости на изменение

усилия копания и энергозатрат требуют проведения моделирования этого процесса для успешной реализации целей исследования.

## **2.6 Выводы по Главе 2**

1. Установлено, что наименьшие усилия для привода подъема возникают при крайней ближней траектории (ТБ) с углом  $60^\circ$ , а для напора – при крайней ближней траектории (ТБ) с углом наклона  $80^\circ$  и  $70^\circ$ .

2. При проведении комплексной оценки нагруженности приводов подъема и напора карьерного экскаватора выявлено, что наименьшие усилия в системе приводов при копании по крайней ближней траектории (ТБ) с углом наклона  $70^\circ$ - $80^\circ$ .

3. Установлено, что наименьшая работа двигателем подъема совершается при крайней дальней траектории (ТД) с углом наклона  $60^\circ$ , а наибольшая при крайней ближней траектории (ТБ) с углом наклона  $80^\circ$ .

4. Установлено, что для снижения энергоемкости отработки экскаваторного забоя необходимо производить экскавацию по крайней ближней траектории (ТБ) с углом наклона к горизонту  $70^\circ$ - $80^\circ$ .

5. Определение коэффициента расходования ресурса позволило оценить энергоемкость различных траекторий копания ковшем экскаватора, копание по радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $80^\circ$  позволит повысить ресурс экскаватора и увеличить его наработку на 25 %.

6. Выявлено, что необходимо провести физическое и численное моделирование процесса копания ковшем карьерного экскаватора при различных величинах насыпной плотности и кусковатости породы для выявления влияния этих параметров на величину усилия копания.

## ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ

### 3.1 Планирование эксперимента

В соответствии с задачами, поставленными для достижения цели настоящего исследования, разработан следующий план проведения экспериментальных исследований:

1. Подбор критериев подобия для проведения физического моделирования копания ковшем экскаватора на модели, подобной оригиналу.
2. Создание стенда, подготовка оборудования и проведение серии предварительных экспериментов.
3. Проведение физического моделирования процесса копания ковшем экскаватора на линейном участке траектории его движения.
4. Обработка результатов физического моделирования и проверка их на соответствие реальному объекту.
5. Создание модели в программе *Ansys Rocky Dem* и ее калибровка.
6. Проведение численного моделирования копания ковшем экскаватора для оценки влияния насыпной плотности на усилие копания.
7. Проведение численного моделирования копания ковшем экскаватора для оценки влияния кусковатости на усилие копания.
8. Обработка результатов численного моделирования и обобщение результатов эксперимента.

### 3.2 Физическое моделирование процесса экскавации

#### 3.2.1 Подбор критериев подобия для лабораторного эксперимента

Определение зависимости изменения усилия копания от насыпной плотности и кусковатости экскавируемого сырья на реальном объекте весьма трудоемкая задача, так как требует проведение эксперимента в условиях, требующих значительных временных и финансовых затрат, а также ресурсов, и помимо этого связано с организационными и коммерческими сложностями. К тому же, одним из главных требований, которые предъявляются к зависимостям, установленным на

основе экспериментальных данных, являются единые условия проведения серии экспериментов.

В таких случаях эксперименты проводят на моделях, которые являются некоторым имитатором реального объекта с учетом одного или нескольких критериев подобия.

Такой подход применяется в настоящем исследовании. Для этого необходимо, в первую очередь, определить коэффициент линейного масштаба  $k_l$ , от которого напрямую зависит размер модели и создаваемого специального стенда. Определяющими в этом случае являются размеры ковша и размер лабораторного стола, последний имеет размер 1200x600 мм, реальные размеры ковша экскаватора ЭКГ-18Р 3560x3900x3100 мм, ориентируясь на ряд предпочтительных чисел R40, с учетом места для размещения стенда выбран коэффициент линейного масштаба  $k_l$  равный 20 [65].

Для соблюдения адекватности эксперимента связанные критерии определялись в соответствии с законом Кулона-Мора (1.16) для оценки сопротивления связанного материала сдвигу, широко применяемому для решения таких задач, как это было описано в первой главе настоящей работы. При этом принимается, что силы сцепления грунта существенно превосходят силы веса отделяемых элементов породы, соответственно составляющая веса не учитывается.

Нормальное напряжение определяется как (3.1):

$$\sigma = \frac{\gamma l^3}{l^2} = \gamma l = \rho g l, \quad (3.1)$$

где  $\gamma = \rho/g$  – объемный вес материала, Н/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$l$  – обобщенный линейный размер, м.

Тогда уравнение закона Кулона-Мора (1.16) может быть записано (3.2):

$$\tau = \rho g l \operatorname{tg} \psi + C. \quad (3.2)$$

На основании уравнения 3.2 получается уравнение пропорциональности (3.3):

$$\tau \sim \rho g l \operatorname{tg} \psi \sim C. \quad (3.3)$$

Безразмерная функция  $\operatorname{tg} \psi$  принимается как критерий подобия  $\Pi_1$ , то есть  $\Pi_1 = \operatorname{tg} \psi$ . При этом оставшиеся члены из выражения (3.3) делятся каждый на один из них и получаем еще два критерия подобия (3.4) и (3.5):

$$\Pi_2 = \frac{\tau}{C}, \quad (3.4)$$

$$\Pi_3 = \frac{\rho g l}{C}. \quad (3.5)$$

Из формулы усилия сопротивления копанью (1.12) можно получить еще один критерий подобия (3.6):

$$\Pi_4 = \frac{F_{\text{коп}}}{K_F B_K t}, \quad (3.6)$$

здесь  $F_{\text{коп}}$  – усилие сопротивления копанью, Н;

$K_F$  – коэффициент удельного сопротивления копанью, МПа;

$B_K$  – ширина режущей кромки ковша, м;

$t$  – толщина стружки (глубина внедрения ковша в забой), м.

Далее на основании 3.2-3.6 составляются масштабные уравнения путем замены параметров на соответствующие масштабы величин. Тогда получаем следующие масштабные уравнения, объединенные в систему (3.7):

$$\begin{cases} k_{\operatorname{tg} \psi} = 1 \\ k_{\tau} = k_C \\ k_{\rho} k_g k_l = k_C, \text{ так как } k_g = 1, k_{\rho} k_l = k_C, \end{cases} \quad (3.7)$$

так как  $\tau$  и  $K_F$  имеют одинаковую размерность, то  $k_{\tau} = k_{K_F}$ , тогда (3.8):

$$k_F = k_{\tau} k_l k_l = k_{\tau} k_l^2. \quad (3.8)$$

Используя полученные масштабные уравнения 3.7, из 3.8 получим следующую зависимость (3.9):

$$k_F = k_{\rho} k_l^3 \quad (3.9)$$

Усилие сопротивления копанью в натуральных условиях для настоящей работы, исходя из формулы усилия сопротивления копанью (1.12), будет равна 224 кН для стружки 0,3 м. Исходя из возможностей лаборатории и средней расчетной величины усилия, определен масштабный коэффициент усилия  $k_F$  (3.10) [118]:

$$k_F = \frac{F_H}{F_M} \approx 32000, \quad (3.10)$$

где  $F_H$  – усилие сопротивления копанию в натуральных условиях, Н;

$F_M$  – усилие сопротивления копанию при проведении физического моделирования, Н.

Зная определенные ранее критерии подобия и с учетом выражений 3.7-3.9: коэффициент линейного масштаба  $k_l = 20$  и определенный по отношению 3.10 масштабный коэффициент усилия  $k_F = 32000$ , определен масштабный коэффициент насыпной плотности (3.11):

$$k_\rho = \frac{k_F}{k_l^3} = 4. \quad (3.11)$$

Учитывая нормальные условия работы экскаватора в угольном забое (ТУ 34122-003-74816237-2009), где средний размер куска составляет 0,1 м, а насыпная плотность угля около 1050-1600 кг/м<sup>3</sup>, размер куска модельной породы выбран равным 0,005 м, а насыпная плотность модельной породы должна быть в пределах 300-400 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует керамзиту фракции до 0,005 м по ГОСТ 32496-2013 [78]. Также стоит отметить, что данный материал выбран из соображений дальнейших перспектив аналогичных исследований с кусковатостью, отличной от номинальной.

### **3.2.2 Описание стенда, подготовка оборудования и проведение серии предварительных экспериментов**

Задача лабораторного эксперимента состояла в оценке усилия сопротивления, возникающем при отделении модельной породы ковшем экскаватора от условного массива только на прямолинейном участке траектории без учета сил трения ковша о породу и переменной массы породы в ковше. При этом очевидно, что на других участках траектории эти тенденции не изменяются.

Оборудование и материалы, необходимые для проведения экспериментального исследования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень необходимых материалов и оборудования для проведения эксперимента (составлено автором)

№ п/п	Вид материала/оборудования
1	Динамометр: МТ-1638, цена деления 0,01 Н, погрешность 0,01 Н, диапазон измерений от 0 до 500 Н, приобретен 26.06.2024
2	Секундомер RGK SWE-03 электронный 721937, цена деления 0,01 с, погрешность 0,01 с, приобретен 26.06.2024
3	Электронный угломер neOrb, цена деления 0,01°, погрешность 0,01°, приобретен 26.06.2024
4	Линейка металлическая: ГОСТ 427-75, длина 30 см
5	Весы: MS-067, шаг измерения 1 г, диапазон измерений от 0 до 5 кг, приобретены 26.06.2024
6	Рулетка: Volt Extreme магнитная 10 м x 25 мм
7	Ковш 178x195x155 мм, материал фанера, собственное изготовление
8	Лабораторный стенд 1010x300x205 мм, собственное изготовление
9	Камера телефона Iphone 11, модель MHDR3RU/A
10	Мерный сосуд №1: коробка 85x87x270 мм
11	Тара для взвешивания: пластмассовая чаша 0,102 кг
12	Модельный материал: керамзит фракции до 0,005 м

Физическое моделирование проводилось на стенде, представляющем короб, заполненный модельной породой (рисунок 3.1). Ковш установлен в направляющих в виде подшипников скольжения в виде полос полиуретана, закрепленных на верхних гранях короба и металлических опор, прикрепленных к ковшу. Ковш перемещался по направляющим короба, засыпанного модельной породой, срезая заданную величину стружки  $t$ . При перемещении ковша динамометром МТ-1638 фиксировалось усилие, необходимое для осуществления процесса экскавации модельной породы при заданной величине стружки на прямолинейном участке траектории [65]. При проведении эксперимента в соответствии с требованиями использовалось тарированное проверенное оборудование.

В первую очередь, для определения искомой величины усилия копания необходимо учесть усилие сопротивления движению ковша по направляющим. Для этого проведен замер усилия на динамометре при движении ковша на холостом ходу – без снятия стружки и без касания ковшом породы [65]. После проведения серии опытов с равноточными измерениями в качестве искомого усилия

сопротивления движению ковша взято среднее из проведенного числа опытов – 2,1 Н, так как результаты показали хорошую повторяемость.

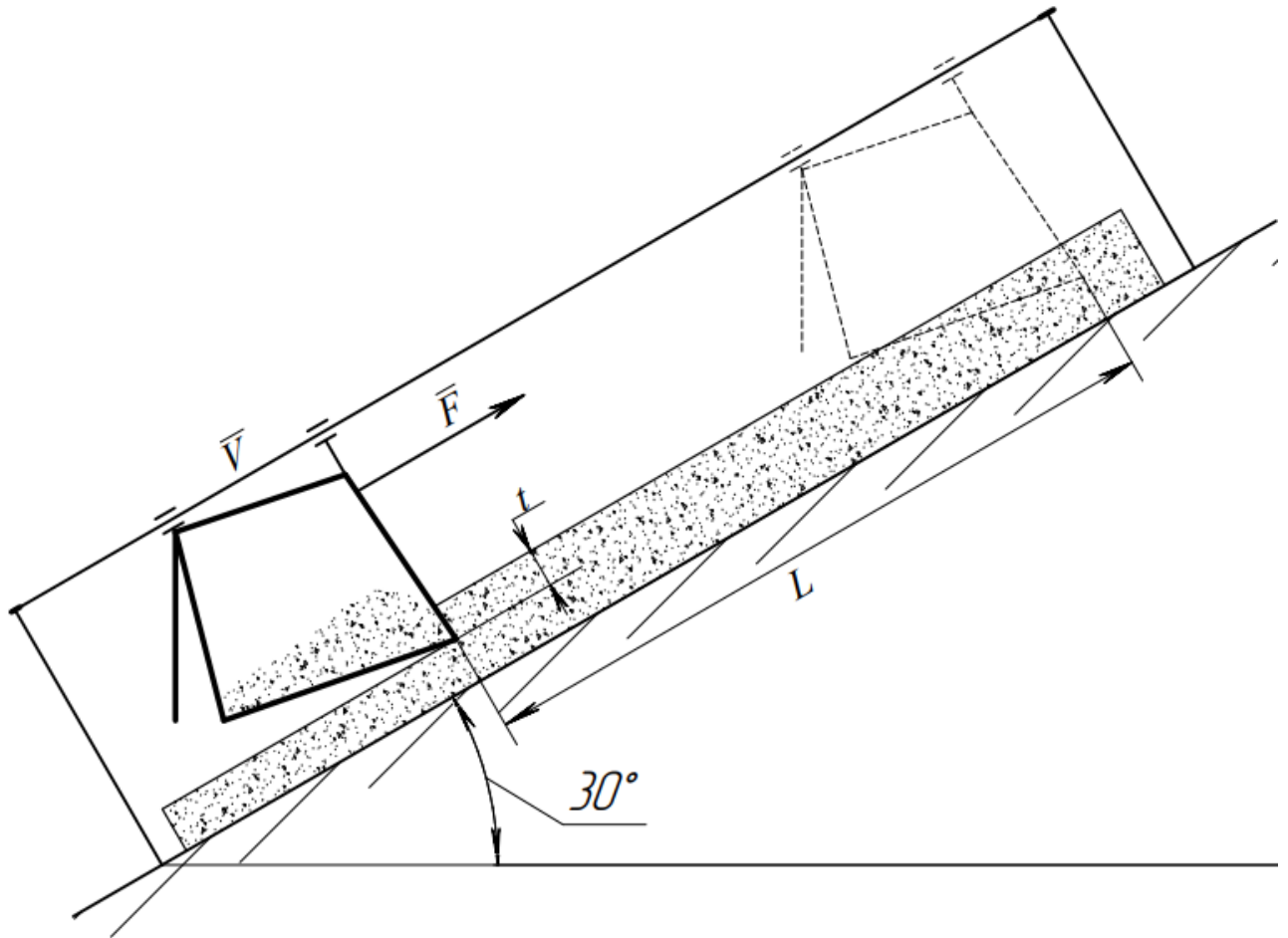


Рисунок 3.1 – Схема экспериментального стенда:

- 1 – модель ковша; 2 – продольные направляющие; 3 – динамометр;  
4 – модельный материал (составлено автором)

Первоначально эксперимент проводился при наклоненном к горизонту под  $30^\circ$  коробе, и для тех же условий, но с коробом, установленным горизонтально (рисунок 3.2) с равной величиной стружки 0,023 м. При этом, для случая копания ковшом с углом наклона  $30^\circ$  задняя стенка ковша установлена в открытое положение, так как при копании под наклоном на величину усилия копания будет влиять вес зачерпнутой породы, что исказит искомый результат. Предварительный эксперимент проводится с целью определения минимального количества измерений повторных опытов для обеспечения заданной точности и надежности измерений. При этом, при проведении предварительных экспериментов не требуется проведение большого количества повторных опытов (достаточное

количество – 3-4), так как увеличение их количества не влияет на искомый результат [15].



Рисунок 3.2 – Стенд для определения усилия копания при заданной величине стружки (фото автора)

Было принято, что результаты экспериментов представляют выборку с распределением Гаусса.

Сначала необходимо для результатов предварительных экспериментов определить среднеарифметическое значение  $F_{cp}$  (3.12):

$$F_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}, \quad (3.12)$$

где  $F_i$  –  $i$ -ое значение результата измерения усилия копания;

$n$  – объем выборки (количество проведенных измерений);

и среднеквадратичное отклонение измерений (3.13):

$$\sigma_3 = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_{cp})^2}{n}}. \quad (3.13)$$

Далее определяется доверительный интервал для выявления грубых ошибок (3.14):

$$F_{\text{ср}} - 3\sigma_3 \leq F_i \leq F_{\text{ср}} + 3\sigma_3. \quad (3.14)$$

В случае их наличия такие результаты исключаются, а среднеарифметическое значение (3.12) и среднеквадратичное отклонение измерений (3.13) пересчитываются без учета этих значений.

Результаты предварительных экспериментов с учетом выражений 3.12-3.14 представлены в таблице 3.2. Все значения результатов предварительных измерений, представленные в таблице 3.2, входят в доверительный интервал.

Таблица 3.2\* – Результаты предварительного эксперимента копания ковшом на линейной траектории с углом наклона  $30^\circ$  и  $0^\circ$  для величины стружки, равной 0,023 м (по данным автора)

Усилие копания с углом наклона $30^\circ$					
№ п/п	$F_i$ , Н	$F_{\text{ср}}$ , Н	$\sigma_3$	$F_{\text{ср}} - 3\sigma_3$ $F_{\text{ср}} + 3\sigma_3$	$t_{\text{пр}}$
1	10,7	10,712	0,016	10,663 10,761	0,610
2	10,71				
3	10,74				
4	10,7				
Усилие копания с углом наклона $0^\circ$					
№ п/п	$F_i$ , Н	$F_{\text{ср}}$ , Н	$\sigma_3$	$F_{\text{ср}} - 3\sigma_3$ $F_{\text{ср}} + 3\sigma_3$	$t_{\text{пр}}$
1	10,67	10,695	0,016	10,645 10,744	0,603
2	10,71				
3	10,69				
4	10,71				

\* Результаты экспериментов здесь и далее даны с учетом потерь в направляющих стенда

Далее определялся расчетный критерий минимального количества повторных опытов  $t_{\text{пр}}$  по формуле (3.15):

$$t_{\text{пр}} = \frac{\Delta}{\sigma_3}, \quad (3.15)$$

где  $\Delta$  – величина погрешности, заданная в абсолютных единицах; для проводимого эксперимента равна 0,01 Н.

Этот критерий сравнивался с табличным критерием минимального числа повторных опытов  $t_{\text{пт}}$ , определяемого по следующему соотношению (3.16) и являющегося табличным [15]:

$$t_{\text{пт}} = \frac{t_c}{\sqrt{f - 1}}, \quad (3.16)$$

где  $t_c$  – критерий Стьюдента;

$f_c$  – число степеней свободы (3.17):

$$f_c = n - 1. \quad (3.17)$$

Табличный критерий минимального числа повторных опытов  $t_{\text{пт}}$  также, как и критерий Стьюдента, определяется для каждой доверительной вероятности. Значения  $t_{\text{пт}}$  для доверительной вероятности 0,90 представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Табличный критерий минимального числа повторных опытов  $t_{\text{пт}}$  для доверительной вероятности 0,90 (по данным автора)

$n$	$f_c$	$t_c$	$t_{\text{пт}}$
1	-	-	-
2	1	6,313	4,463
3	2	2,92	1,685
4	3	2,353	1,176
5	4	2,131	0,953
6	5	2,015	0,822
7	6	1,943	0,734
8	7	1,894	0,669
9	8	1,859	0,619
10	9	1,833	0,579

Для определения необходимого количества повторных опытов должно выполняться следующее условие (3.18):

$$t_{\text{пр}} \geq t_{\text{пт}}. \quad (3.18)$$

Сравнивая значение  $t_{\text{пр}}$  (таблица 3.2) с табличными значениями  $t_{\text{пт}}$  (таблица 3.3), и учитывая выражения (3.15-3.18) выявлено, что для обеспечения заданной точности и надежности необходимо проводить не менее 10 измерений.

Также сравнение результатов экспериментов при разных углах наклона траектории показало, что усилия копания при углах наклона  $30^\circ$  и  $0^\circ$  соизмеримы между собой. Для удобства проведения эксперимента принято проводить оценку усилия копания ковшом при горизонтальном положении короба (угол наклона  $0^\circ$ ), так как угол наклона короба не влияет на искомую величину.

### 3.2.3 Результаты физического моделирования копания ковшем экскаватора

Результаты проведенных серий опытов по копанию модельной породы модельным ковшом экскаватора представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты серий опытов по копанию модельного материала (по данным автора)

№ п/п	Усилие копания $F$ , Н, при заданной стружке $t$					
	0,007 м	0,014 м	0,018 м	0,023 м	0,032 м	0,039 м
1	3,53	6,20	8,49	10,87	13,75	16,72
2	3,97	6,52	8,34	11,14	14,15	17,34
3	3,90	5,93	7,99	11,05	13,18	16,61
4	3,97	5,84	7,89	10,39	14,24	16,56
5	3,72	5,92	7,79	10,39	14,05	17,10
6	3,53	6,52	7,93	10,78	13,57	16,86
7	3,77	6,42	8,18	10,54	14,21	16,85
8	3,71	6,45	8,41	11,24	13,89	16,85
9	3,77	5,87	8,67	10,35	14,07	17,64
10	3,77	6,08	8,87	10,39	13,92	16,97
$F_{cp}$ , Н	3,764	6,174	8,256	10,713	13,903	16,95
$\sigma$	0,147	0,266	0,342	0,329	0,312	0,316
$F_{cp} - 3\sigma$ , Н	3,321	5,374	7,23	9,726	12,968	16,001
$F_{cp} + 3\sigma$ , Н	4,208	6,974	9,282	11,699	14,839	17,898

После проведения эксперимента оценивалось среднеарифметическое значение  $F_{cp}$ , которое было принято искомой величиной усилия копания в эксперименте при заданной стружке  $t$ , среднеквадратичное отклонение измерений  $\sigma$ , и доверительный интервал для анализа полученных результатов на наличие грубых ошибок по указанным ранее выражениям.

Все измерения в каждой серии опытов входят в доверительный интервал, соответственно всю выборку можно использовать для дальнейших исследований.

Полученные значения и зависимость, представленная результирующей линейной аппроксимации, показана на рисунке 3.3.

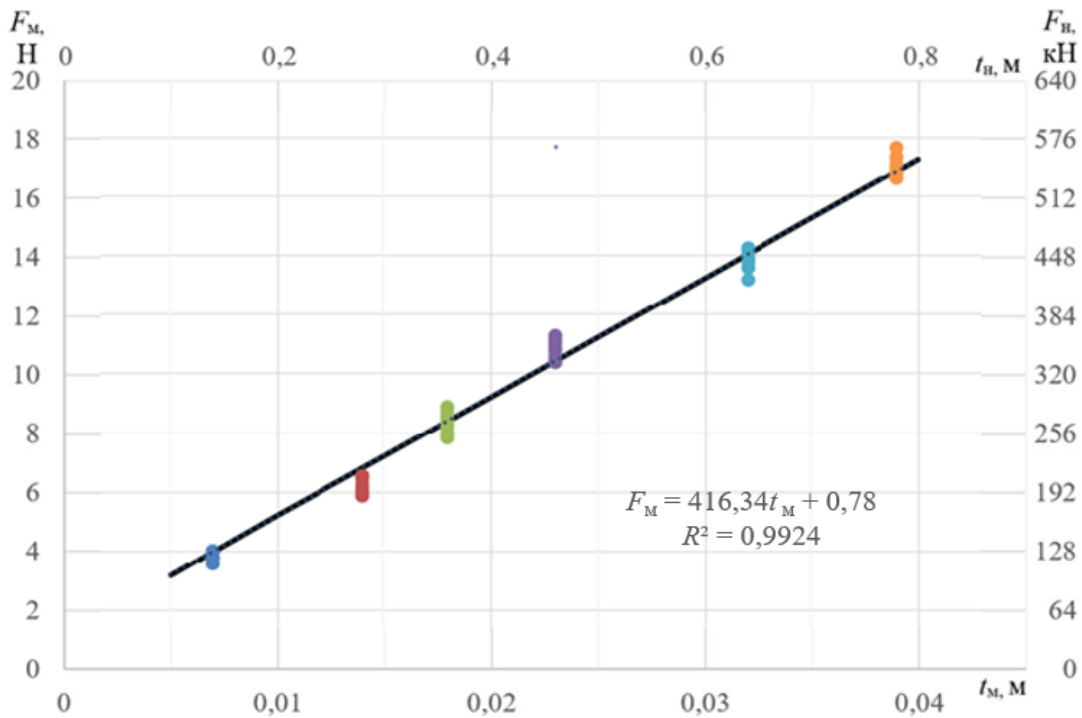


Рисунок 3.3 – Усилие  $F$  для осуществления процесса копания при толщине стружки для заданного гранулометрического состава экскавируемого модельного материала и угля (составлено автором)

Выше были определены критерии подобия как для величины стружки  $t$  ( $k_t = 20$ ), так и для величины усилия  $F$  ( $k_F = 32000$ ). Можно предположить, что если нанести на противоположные оси значения натуральных величин с учетом критериев подобия, то полученной линией аппроксимации можно воспользоваться для нахождения натуральной величины усилия копания при принятых нормальных условиях (уголь кусковатостью 0,1 м и насыпной плотностью 1350 кг/м<sup>3</sup>) с заданной величиной стружки. Например, для натуральной величины стружки  $t_n = 0,2$  м согласно рисунку 3.3 усилие копания будет составлять  $F_n = 166$  кН.

Если воспользоваться формулой усилия копания (1.12) для таких же заданных величин, расчетное усилие копания составит:

$$F_{\text{коп}} = K_F B_K t = 245166,25 \cdot 3,3 \cdot 0,2 = 161,8 \text{ кН.}$$

Сравнивая расчетное и экспериментальное значение, можно сделать вывод, что погрешность составляет 3%, что говорит об адекватности созданной модели и правильном подборе критериев подобия [65].

Воспользоваться полученной зависимостью для нахождения реального усилия копания  $F_H$  при заданной стружке  $t_H$  для нормальных условий можно следующим образом:

1. Натуральную величину стружки необходимо привести к модельному значению (3.19):

$$t_M = \frac{t_H}{k_l}. \quad (3.19)$$

2. По найденной модельной величине стружки из выражения (3.19) определяется величина модельного усилия копания (3.20):

$$F_M = 416,34t_M + 0,78. \quad (3.20)$$

3. Реальная (натуральная) величина усилия копания  $F_H$  угольного забоя определяется умножением модельной величины на соответствующий критерий подобия по выражению (3.21):

$$F_H = k_F F_M. \quad (3.21)$$

Однако полученный алгоритм с приведенными выше зависимостями применим к экскавируемой массе угля с конкретной величиной насыпной плотности и кусковатости.

При этом, проведение физического моделирования для оценки влияния отдельного параметра при неизменном связанном с ним другим параметром сложно осуществимо, так как требует физического подбора величины насыпной плотности при искомой кусковатости.

Эту задачу можно решить использованием имитационного моделирования в программе *Ansys Rocky DEM* с опорой на проведенный ранее эксперимент и его результаты.

### **3.3 Численное моделирование процесса экскавации**

#### **3.3.1 Создание модели и ее калибровка**

Целью калибровочных испытаний является установление параметров взаимодействия контактных пар, среди которых:

- коэффициент статического трения;
- коэффициент восстановления;

- коэффициент сопротивления качению.

Методика калибровки заключается в проведении лабораторных испытаний по определению параметров контактных взаимодействий между материалами образцов, на основании результатов которых осуществляется подбор значений параметров взаимодействия (коэффициентов) материалов в цифровой модели до минимального расхождения с результатами эксперимента и модели.

Эксперимент по определению коэффициента статического трения заключается в размещении образца (керамзита) на горизонтальной пластине и постепенном наклоне данной пластины до тех пор, пока не произойдет процесс движения образца (рисунок 3.4). Опыт повторялся не менее 10 раз, после чего определялось среднеарифметическое значение этого угла.



Рисунок 3.4 – Эксперимент по определению коэффициента статического трения  
(фото автора)

На основании проведенного эксперимента в программной среде *Rocky DEM* моделируются подобные натурным образцы и условия их взаимодействия (рисунок 3.5), и путем варьирования коэффициента трения в настройках программы достигается угол соскальзывания, равный полученному в лабораторных экспериментах. Это обеспечивает соотношение физического и численного моделирования.

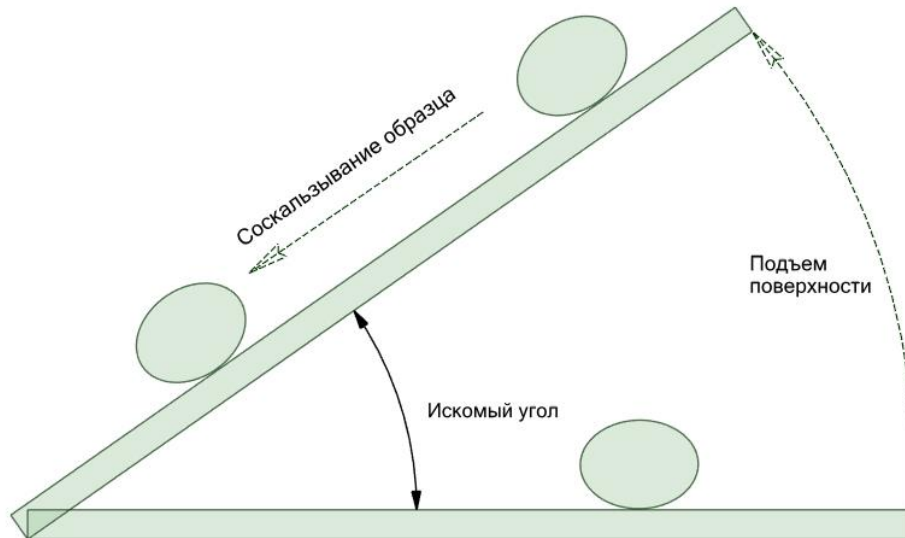


Рисунок 3.5 – Схема эксперимента по определению коэффициента статического трения (составлено автором)

Средний угол движения образца керамзита с поверхности из дерева составил  $30^\circ$ . Коэффициенты статического трения  $SF_{AH500} = 0,63$ ,  $SF_{AH600} = 0,61$  и  $SF_{AC1} = 0,47$  для данных значений углов.

Эксперимент по определению коэффициента статического трения в паре «керамзит-керамзит» заключается в установке вертикально расположенной трубы (рисунок 3.6), стоящей на горизонтальной поверхности, в которую сверху засыпается определенная масса модельного материала.



Рисунок 3.6 – Труба с навеской керамзита (фото автора)

После этого, труба поднимается, и материал рассыпается, образуя массив частиц. Фиксировался угол естественного откоса данного массива (рисунок 3.7).

Масса материала на рисунке 3.7 составила 450,7 г. По результатам проведенной серии из 10 опытов был получен средний угол откоса  $36^\circ$ .



Рисунок 3.7 – Результат проведения эксперимента по определению коэффициента статического трения в паре «керамзит-керамзит» (фото автора)

По результатам варьирования коэффициента статического трения в модели данного эксперимента (рисунок 3.8), продублированного в ПО *Ansys Rocky*, такой величине угла соответствует коэффициент статического трения, равный 0.602.

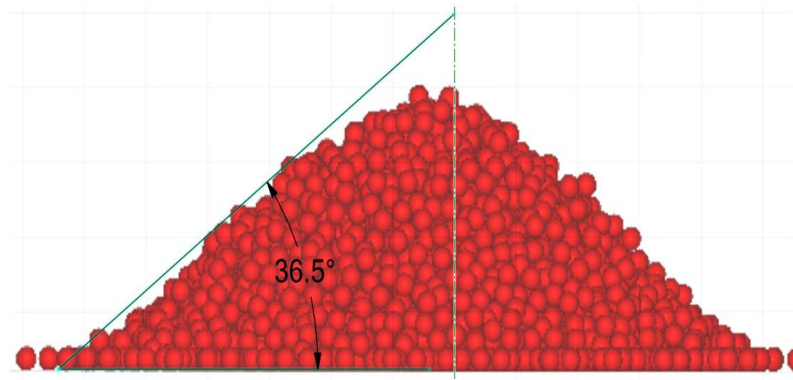


Рисунок 3.8 – Эксперимент по определению коэффициента статического трения в паре «керамзит-керамзит» (составлено автором)

Определение коэффициента восстановления заключается в следующем: частица сбрасывается с определенной высоты на наклонную плоскость, при этом фиксируется среднее расстояние отскока по результатам числа опытов (в настоящей работе это число составило – 50 опытов). Схема теста и лабораторный стенд представлены на рисунке 3.9. В качестве сбрасываемых частиц выступали частицы керамзита размером 0,005 м.

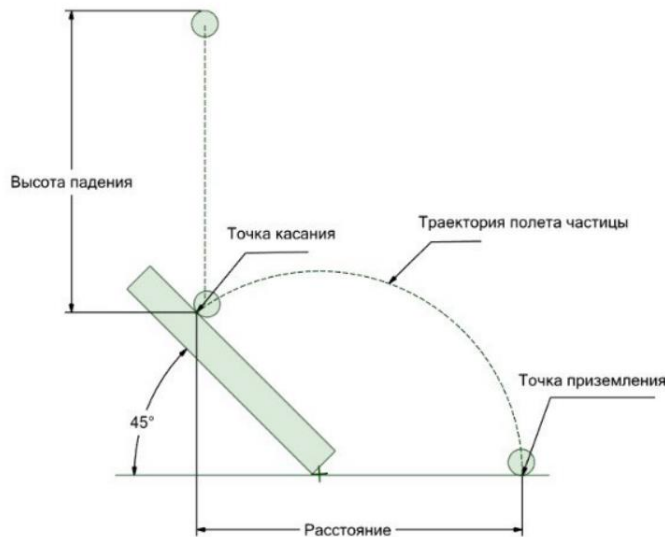


Рисунок 3.9 – Схема и стенд для проведения испытаний по определению коэффициента восстановления в паре «керамзит-керамзит» (составлено автором)

В ПО *Ansys Rocky* путем варьирования величины коэффициента восстановления достигалось расстояние отскока, соответствующее тому, что было определено в лабораторном тесте. В качестве формы для частиц руды была выбрана сфера.

Результаты испытаний, описанных выше, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Коэффициенты, определенные в результате физических и численных экспериментов (по данным автора)

Пара	Керамзит-дерево	Керамзит-керамзит
Определенный коэффициент трения	0,44	0,36
Угол определенный, экспериментально, °	23,74	28,00
Угол, определенный при моделировании, °	25	28
Коэффициент восстановления	0,40	0,55
Расстояние отскока, экспериментальное, м	0,238	0,289
Расстояние отскока, при моделировании, м	0,231	0,278

Далее в программе *Ansys Rocky Dem* была создана математическая модель процесса копания ковшом экскаватора модельной породы. При этом в программе воспроизводились все условия, соблюденные при проведении физического моделирования: геометрические параметры и физико-механические свойства ковша экскаватора, стенда и частиц модельной породы, а также характеристики рабочих движений ковша.

Для создания сетки конечных элементов геометрической модели ковша экскаватора выбран тетраэдр с размером стороны 0,01 м (рисунок 3.10). В качестве критерия обеспечения качества сетки руководствовались наличием минимум 10 элементов вдоль ребра и 5 поперек [116].

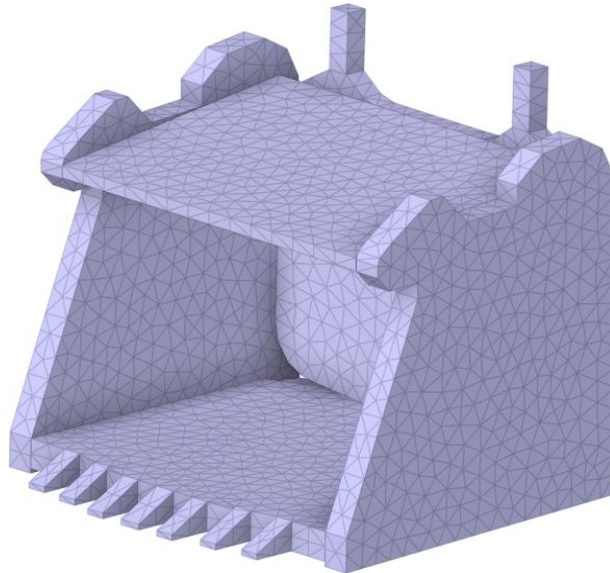


Рисунок 3.10 – Фасетированная модель ковша (составлено автором)

Форма частиц при моделировании принималась сферической с определенным, в зависимости от кусковатости радиусом, при этом соотношение частиц различного диаметра выбиралась для каждой серии экспериментов по схеме:  $(d1/(x1) + d2/(x2) + d3/(x3) + d4/(x4))$ . Здесь  $d$  – диаметр сферы, а  $x$  – объемное содержание этих частиц в смеси, выраженное в относительных единицах таким образом, чтобы сумма  $x$  составляла 100 % [116]. На рисунке 3.11 представлена фасетированная модель процесса, здесь сферы разного диаметра указаны различными цветами.

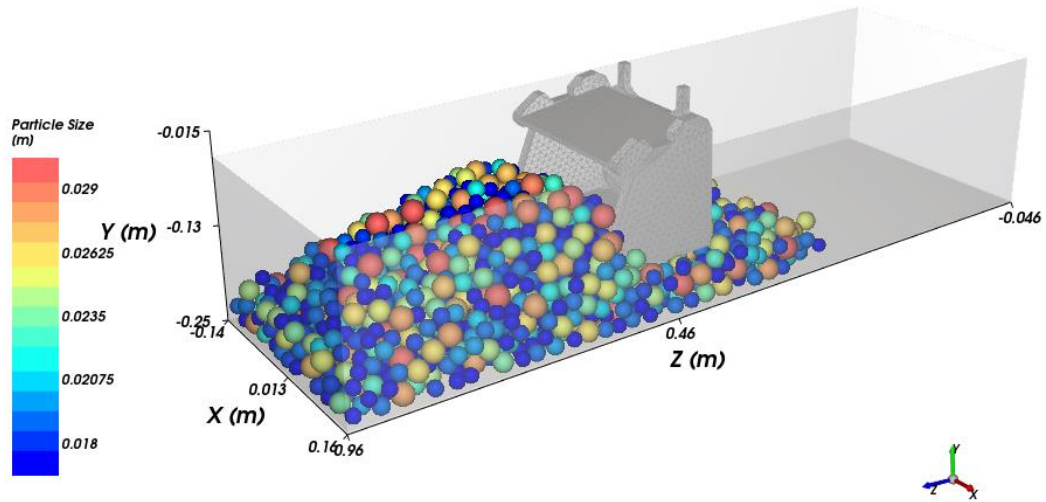


Рисунок 3.11 – Фасетированная модель процесса копания ковшем модельной породы [116]

Для базового варианта при численном моделировании размер преобладающей фракции составил 0,005 м, а соотношение соответствовало схеме: + 0,005(50 %) + 0,004(40 %) + 0,003(10 %). Для расчета контактного взаимодействия сферических частиц в программе была выбрана модель контактных сил – *Hertzian spring dashpot* и *Mindlin Dereciewicz*, в качестве модели сопротивления частиц качению – модель *Type C* [116]. Для достижения сходимости результатов численного моделирования и физической модели в программе заданы следующие параметры взаимодействия контактных пар (методика определения параметров описана ранее): коэффициент статического трения – для контактной пары «частицы-ковш экскаватора» – 0,44; «частицы-частицы» – 0,36; коэффициент восстановления – 0,40 и 0,55 соответственно, коэффициент сопротивления частиц качению – 0,4 [116].

Для проверки соответствия созданной модели проведенному физическому эксперименту выполнено численное моделирование процесса копания ковшем при тех же условиях, что и в лабораторном эксперименте. Таким образом, проведя численное моделирование, полностью повторяющее проведенный физический эксперимент, можно убедиться в адекватности созданной фасетированной модели.

В результате выполненного моделирования определены средние нормальные  $F_n$  и тангенциальные  $F_t$  нагрузки, на основании которых рассчитано полное усилие

$F_{\text{чм}}$ , данные представлены в таблице 3.6. Величина определенного полного усилия  $F_{\text{чм}}$  в каждом расчетном случае сравнивается с величиной усилия  $F_{\text{м}}$ , полученной в результате экспериментов.

Таблица 3.6 – Результаты численного моделирования для проверки адекватности модели (по данным автора)

Величина стружки $t$ , м	Нормальное усилие $F_n$ , Н	Тангенциальное усилие $F_{\tau}$ , Н	Полное усилие $F_{\text{чм}}$ , Н	Полное усилие $F_{\text{м}}$ , Н
0,007	3,642	1,428	3,912	3,764
0,014	5,564	1,825	5,556	6,174
0,018	7,283	3,577	7,714	8,256
0,023	10,119	3,902	10,845	10,713
0,032	12,497	5,284	13,568	13,903
0,038	13,271	7,301	15,542	16,950

Вторым критерием адекватности модели физическому эксперименту является масса модельной породы, зачерпнутой ковшом в результате копания. При проведении серий опытов на стенде данный параметр учитывался при каждом эксперименте. Средние значения массы модельной породы, полученной при численном  $m_{\text{чм}}$  и физическом  $m_{\text{м}}$  моделировании, представлены в таблице 3.7.

Полученные в результате численного моделирования усредненные значения усилия копания и массы зачерпнутого ковшом материала имеют хорошее совпадение в пределах от 2 до 8 %, что говорит о достаточной адекватности численного моделирования реальным процессам. Тогда правомочно считать, что  $F_{\text{чм}}=F_{\text{м}}$  [116].

Таблица 3.7 – Средние значения массы модельной породы, полученной при численном и физическом моделировании (по данным автора)

Величина стружки $t$ , м	Масса при численном моделировании $m_{\text{чм}}$ , кг	Масса при физическом моделировании $m_{\text{м}}$ , кг
0,007	0,0396	0,04
0,014	0,1217	0,115
0,018	0,2236	0,203
0,023	0,2912	0,274
0,032	0,4278	0,404
0,038	0,5386	0,535

### 3.3.2 Изменение величины усилия копания при заданной насыпной плотности

Получив адекватную имитационную модель результатам физического моделирования, описанным выше, было проведено моделирование процесса экскавации с оценкой величины усилия копания ковшом модельной породы разной насыпной плотности при прочих равных условиях, соответствующих условиям физического моделирования.

Для установления влияния насыпной плотности на усилие при прочих равных условиях проведен эксперимент с плотностью породы, отличной от базовой величины ( $400 \text{ кг/м}^3$ ): на  $-15 \%$  ( $340 \text{ кг/м}^3$ ), на  $+7 \%$  ( $428 \text{ кг/м}^3$ ), на  $+15 \%$  ( $460 \text{ кг/м}^3$ ), на  $+30 \%$  ( $520 \text{ кг/м}^3$ ) [116]. Для каждой величины стружки проведены 10 измерений при заданной насыпной плотности. По итогу проведенного численного моделирования выявлено изменение величины усилия копания  $F_{\text{чмп}}$  от величины стружки  $t$  при заданной насыпной плотности (рисунок 3.12).

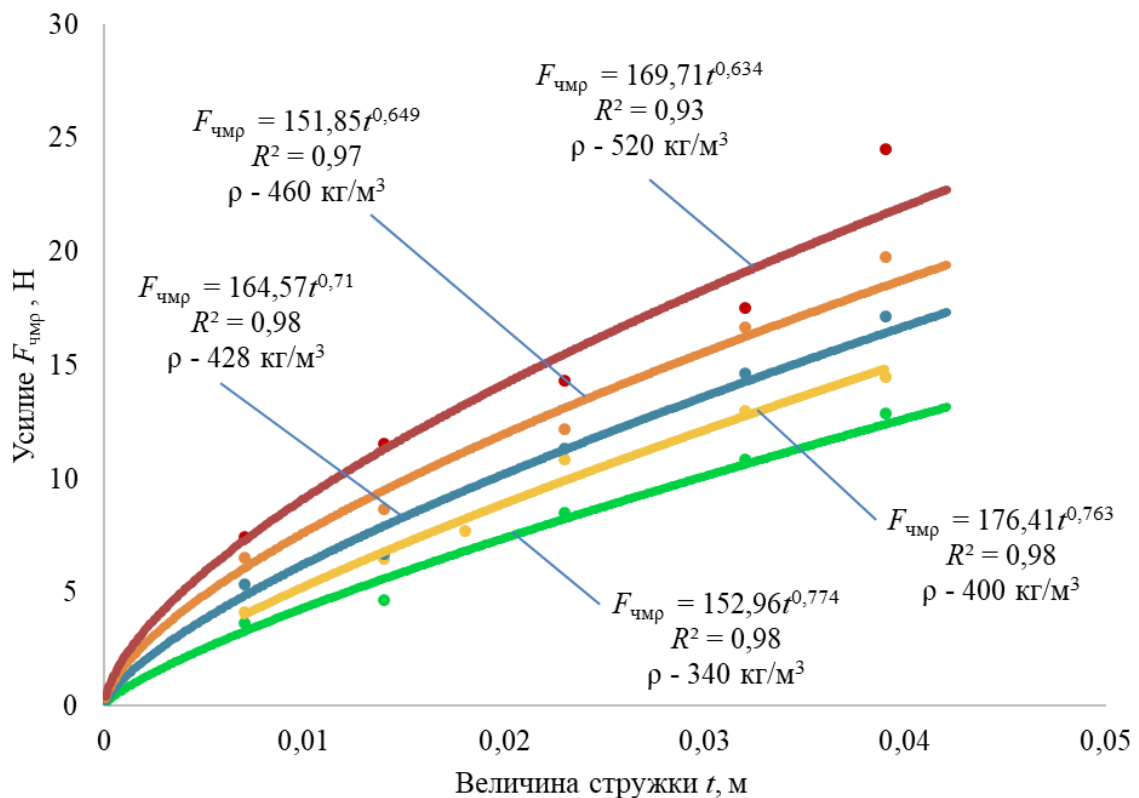


Рисунок 3.12 – Изменение величины усилия копания  $F_{\text{чмп}}$  от величины стружки  $t$  при заданной насыпной плотности [116]

Зависимость величины усилия копания от величины стружки для каждой плотности представляет собой степенную функцию.

Аппроксимировав коэффициент перед переменной и показатель степени, можно получить функцию изменения величины усилия копания от значения насыпной плотности породы и величины стружки, которая представляет собой степенную функцию с линейным ограничением на произведение коэффициентов (3.22):

$$F_{чм\rho} = (0,0481\rho + 142,16)t^{(0,99-7\cdot 10^{-4}\rho)}. \quad (3.22)$$

### 3.3.3 Изменение величины усилия копания при заданной кусковатости

Аналогично п.3.2.2 проведено моделирование процесса экскавации с оценкой величины усилия копания ковшем породы разной кусковатости при прочих равных условиях, соответствующих условиям физического моделирования.

Для установления влияния кусковатости на усилие при прочих равных условиях проведен эксперимент со средним куском модельной породой следующего ряда: 0,005 м, 0,01 м, 0,02 м, 0,03 м, 0,04 м, 0,05 м [116]. Для каждой величины стружки проведены 10 измерений при заданной кусковатости модельной породы. По итогу проведенного численного моделирования выявлено изменение величины усилия копания  $F_{чмd}$  от величины стружки  $t$  при заданной кусковатости (рисунок 3.13).

Зависимость величины усилия копания от величины стружки для каждой плотности представляет собой степенную функцию.

Аппроксимировав коэффициент перед переменной и показатель степени, можно получить функцию изменения величины усилия копания от значения кусковатости и величины стружки, которая представляет собой степенную функцию со степенным ограничением на произведение коэффициентов (3.23):

$$F_{чмd} = 519,7 \cdot 10^3 d^{1,56} t^{1,06d^{0,065}} \quad (3.23)$$

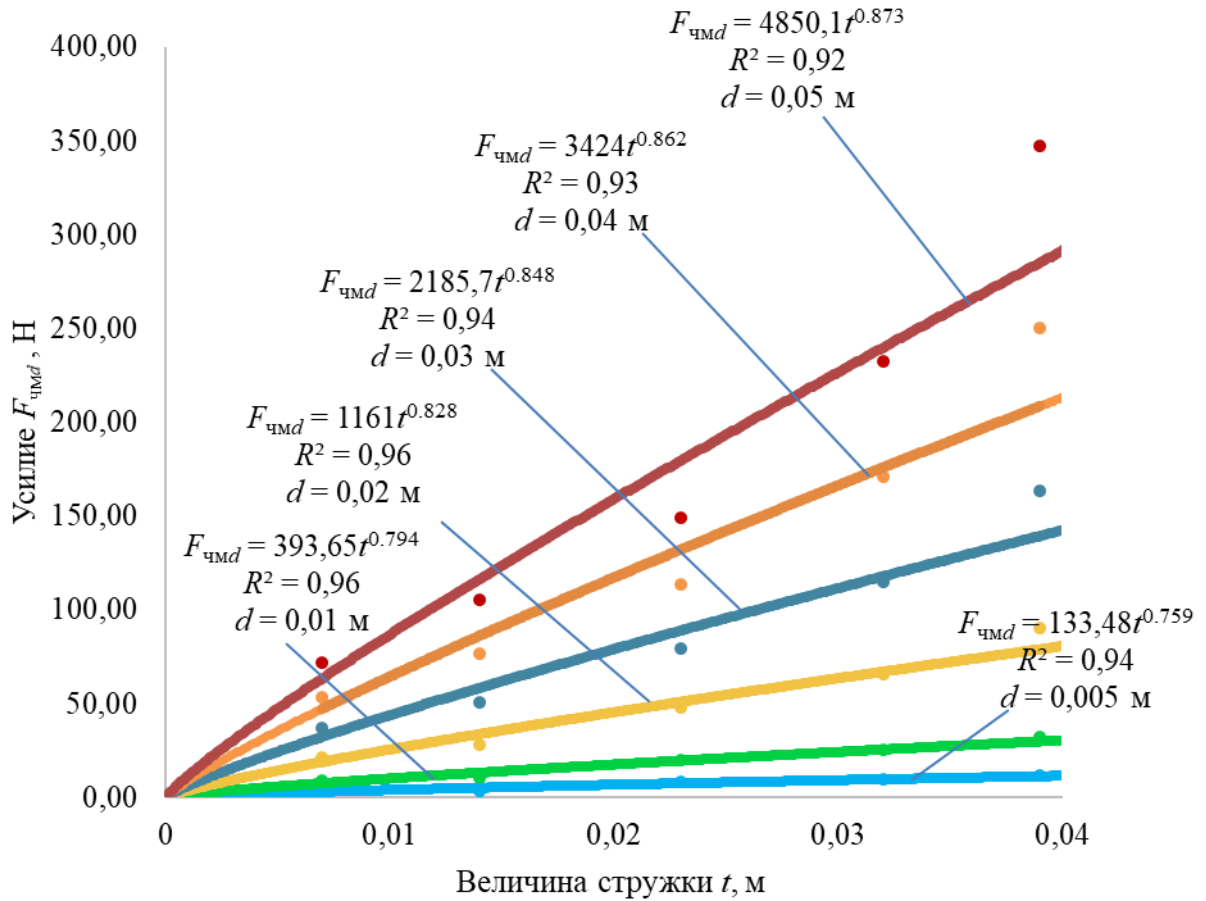


Рисунок 3.13 – Изменение величины усилия копания  $F_{чмд}$  от величины стружки  $t$  при заданной кусковатости [116]

### 3.3.4 Изменение величины усилия копания при заданных насыпной плотности и кусковатости экскавируемого сырья

Представив оценку влияния кусковатости и насыпной плотности экскавируемой породы на усилие копания посредством коэффициентов как показательных функций (выражения 3.22 и 3.23), отнесенных к базовой величине для номинальных условий, можно оценить влияния изменения одновременно двух факторов через выражение (3.24):

$$F_{pd} = \frac{k_F F_{чм\rho} F_{чмd}}{F_M^6} \quad (3.24)$$

Для проверки полученных результатов реально протекающим процессам был поставлен дополнительный физический эксперимент с модельной породой с насыпной плотностью  $275 \text{ кг/м}^3$ , и кусковатостью  $0,005-0,01 \text{ м}$  при величине снимаемой стружки  $0,034 \text{ м}$ . Усилие копания при скорости движения ковша  $0,5 \text{ м/с}$

составило 12,06 Н для этих же условий усилие, полученное по выражению (3.24), составило 13 Н, что подтверждает правильность принятых решений и возможность применения представленного подхода [116].

При расчете для фактических условий было определено, что уменьшение плотности или кусковатости на 25 % ведет к снижению усилия на 25 % или 32 %, а при их аналогичном увеличении усилие копания возрастает на 33 % или 35 %, соответственно.

На основании представленных выше функциональных зависимостей были получены усилия копания ковшом экскаватора при различных насыпной плотности и кусковатости модельной породы, которые представлены в виде 3-D графиков на рисунке 3.14.

Как видно из графика, наиболее резкое увеличение усилия копания наблюдается для стружки 0,039 м при увеличении насыпной плотности и размера фракции, например, усилия копания для стружки 0,039 м при размере 0,05 м и насыпной плотности 520 кг/м<sup>3</sup> в среднем 3,5 раз выше, в сравнении со стружкой 0,007 м [116].

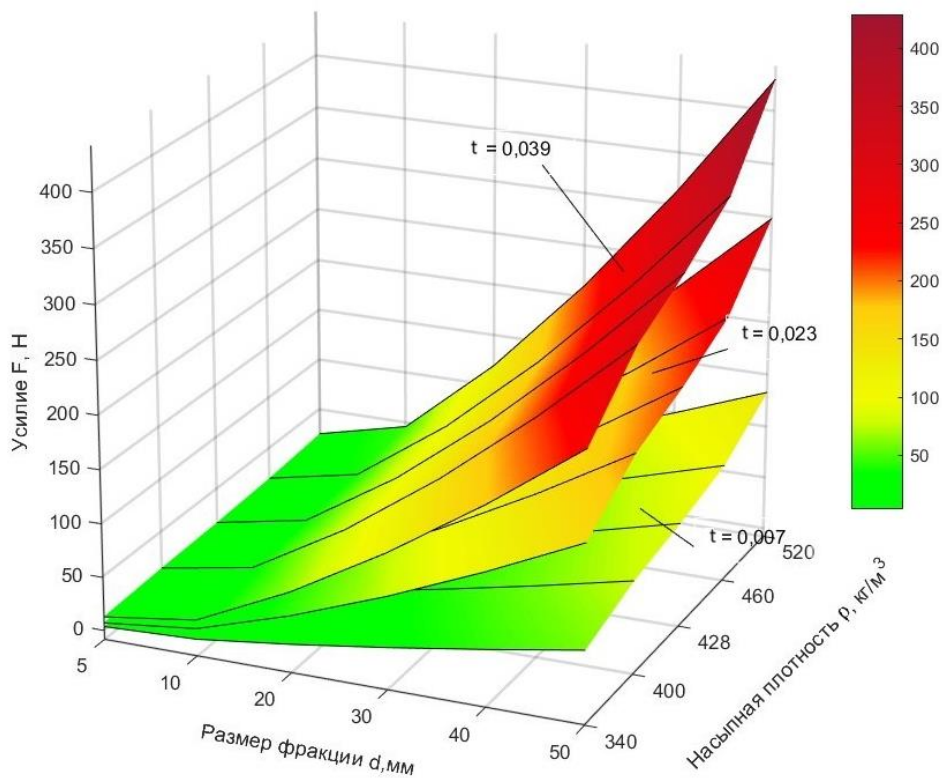


Рисунок 3.14 – Изменение величины усилия копания  $F_{чм}$  от насыпной плотности и кусковатости при заданной величине стружки  $t$  [116]

### 3.4 Выводы по Главе 3

1. На основе проведенного физического моделирования процесса копания ковшем экскаватора на линейном участке траектории его движения определена зависимость изменения усилия сопротивления копанию при заданной толщине стружки для заданного гранулометрического состава экскавируемого материала.

2. Создана фасетированная модель процесса копания ковшем модельной породы и доказана ее адекватность.

3. Установлено, что функция изменения величины усилия копания от значения насыпной плотности породы и величины стружки представляет собой степенную функцию с линейным ограничением на произведение коэффициентов.

4. Установлено, что функция изменения величины усилия копания от значения кусковатости и величины стружки представляет собой степенную функцию со степенным ограничением на произведение коэффициентов.

5. Установлено, что одновременную оценку влияния кусковатости и насыпной плотности экскавируемой породы на усилие копания можно провести произведением полученных степенных функций, отнесенных к базовой величине для номинальных условий.

6. На основе численного моделирования выявлены функции изменения величины усилия сопротивления копанию от величин насыпной плотности и кусковатости экскавируемого сырья, которые показали, что уменьшение плотности или кусковатости на 25 % ведет к снижению усилия на 25 % или 32 %, а при их аналогичном увеличении усилие копания возрастает на 33 % или 35 %, соответственно.

## **ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА УЧЕТОМ ТРАЕКТОРИИ КОПАНИЯ И КУСКОВАТОСТИ УГЛЯ**

### **4.1 Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы**

«Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы» разработана автором, и написана на языке программирования Python (Приложение В) и имеет Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665458 (Приложение Б).

Программа обеспечивает выполнение расчетов по оценке кинетостатических параметров механизма подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его функционирования. Также она может быть внедрена для оценки нагруженности рабочего оборудования для конкретных условий эксплуатации с целью корректировки интенсивности проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту карьерных экскаваторов.

При проведении расчета можно задавать следующие параметры:

- расстояние от начала забоя до экскаватора, м;
- высота уступа, м;
- угол откоса, градусы;
- количество рассчитываемых равноудаленных на траектории точек;
- коэффициент сопротивления движению ковша, м;
- коэффициент динамичности;
- масса рукояти, кг;
- масса ковша, кг;
- длина рукояти, м;
- длина ковша, м;
- диаметр барабана подъемной лебедки, м;

- расстояние от центра седлового подшипника до центра барабана подъемной лебедки, м;
- вместимость ковша, м<sup>3</sup>;
- коэффициент наполнения ковша;
- коэффициент разрыхления пород в ковше;
- ширина режущей кромки ковша, м;
- коэффициент удельного сопротивления копанию;
- плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;
- высота центра седлового подшипника, м;
- высота центра барабана подъемной лебедки, м;
- общее передаточное число привода подъема;
- радиус барабана, м;
- количество двигателей привода подъема, шт;
- общее передаточное число привода напора;
- радиус кремальерной шестерни, м;
- количество двигателей привода напора, шт;
- время копания, с.

Программа позволяет рассчитывать усилие в канате подъемной лебедки, среднюю скорость подъема ковша и движения рукояти, а также изменение подъемных и напорных характеристик рабочего оборудования экскаватора в цикле его работы, таких как:

- подъемная составляющая усилия в канате, создаваемого лебедкой подъема, для преодоления сопротивлений;
- подъемная составляющая суммарных усилий сопротивления (весовые составляющие, силы сопротивления копанию, сила трения);
- подъемная результирующая движущих сил и сопротивлений;
- значение мгновенного момента на приводе подъема;
- напорная составляющая усилия в канате, создаваемого лебедкой подъема, для преодоления сопротивлений;

- напорная составляющая суммарных усилий сопротивления (весовые составляющие, силы сопротивления копанию, сила трения);
- напорная результирующая движущих сил и сопротивлений;
- значение мгновенного момента на приводе напора.

Пример ввода и вывода данных при использовании программы представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

```

Введите значение расстояния от начала забоя до экскаватора, м: 5.39
Введите значение высоты уступа, м: 14.7
Введите значение угла откоса, град: 60
Введите значение количества точек: 10
Введите значение коэффициента сопротивления движению ковша, м: 0.75
Введите значение коэффициента динамичности: 1.2
Введите значение массы рукояти, кг: 24000
Введите значение массы ковша, кг: 33600
Введите значение длины рукояти, м: 11.33254485
Введите значение длины ковша, м: 3.3
Введите значение диаметра барабана, м: 2.55
Введите значение расстояния от центра силового подшипника до центра барабана подъемной лебедки, м: 7
Введите значение вместимости ковша, м3: 18
Введите значение коэффициента наполнения ковша: 1
Введите значение коэффициента разрыхления пород в ковше: 1.2
Введите значение ширины режущей кромки ковша, м: 3
Введите значение коэффициента удельного сопротивления копанию: 245166
Введите значение плотности пород, кг/м3: 1500
Введите значение высоты центра седлового подшипника, м: 10.059
Введите значение высоты центра барабана подъемной лебедки, м: 17.377
Введите значение общего передаточного числа привода подъема: 38.25
Введите значение радиуса барабана, м: 0.7
Введите значение количества двигателей привода подъема: 2
Введите значение общего передаточного числа привода напора: 29.87
Введите значение радиуса кремальерной шестерни, м: 0.33
Введите значение количества двигателей привода напора: 1
Введите значение времени копания, с: 10.25

```

Рисунок 4.1 – Пример входных данных (составлено автором)

Точка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	763485	777642	780138	774224	800723	860105	903053	929858	950410	989320	1092974
Изменение подъемных характеристик в цикле											
Точка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_ph, Н	502338	574701	638457	686957	751235	833337	887553	915720	925005	923036	915561
G_ph, Н	-392682	-445993	-494867	-535608	-589824	-658812	-710921	-747054	-771643	-789486	-804197
C_ph, Н	109656	128708	143590	151349	161411	174525	176632	168666	153362	133550	111364
M_ph, Нм	6986.14	7115.68	7138.52	7084.4	7326.88	7870.24	8263.23	8508.5	8696.56	9052.6	10001.07
F_ph – подъемная составляющая усилия в канате, создаваемого лебедкой подъема, для преодоления сопротивлений; G_ph – подъемная составляющая суммарных усилий сопротивления (весовые составляющие, силы сопротивления копанию, сила трения); C_ph – подъемная результирующая движущих сил и сопротивлений; M_ph – значение мгновенного момента на приводе подъема.											
Изменение напорных характеристик в цикле											
Точка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_nh, Н	574948	523876	448316	357090	277135	212908	166594	161530	218279	356032	596942
G_nh, Н	-467473	-409885	-338981	-257942	-170522	-70323	36140	140228	236943	324876	404694
C_nh, Н	107475	113991	109335	99148	106613	142585	202734	301758	455222	680908	1001636
M_nh, Нм	1187.37	1259.36	1207.92	1095.37	1177.85	1575.26	2239.78	3333.78	5029.24	7522.59	11065.95
F_nh – напорная составляющая усилия в канате, создаваемого лебедкой подъема, для преодоления сопротивлений; G_nh – напорная составляющая суммарных усилий сопротивления (весовые составляющие, силы сопротивления копанию, сила трения); C_nh – напорная результирующая движущих сил и сопротивлений; M_nh – значение мгновенного момента на приводе напора.											
Скорость подъема ковша: 1.091 м/с Скорость движения рукояти: 0.314 м/с											

Рисунок 4.2 – Пример выходных данных (составлено автором)

Стоит отметить, что большой список задаваемых параметров позволяет проводить расчет не только для рассматриваемого в настоящей работе экскаватора ЭКГ-18Р, но и для других его модификаций, задавать различную высоту уступа и угол наклона траектории движения ковша экскаватора в забое.

Использование представленной программы также позволит оценивать интенсивность выработки ресурса приводов экскаватора. После обработки полученных в программе данных по выражениям (2.10-2.19), представленным выше в разделе 2.2.4 настоящей работы, рассчитывается коэффициент расходования ресурса (формула 2.20), который используется для корректировки периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту.

#### **4.2 Коэффициент расходования ресурса как инструмент по восстановлению ресурса экскаватора**

Как было сказано ранее, техническое обслуживание и ремонт экскаватора проводится согласно графику планово-предупредительного ремонта (ППР). Периодичность проведения работ, как и их объем, утверждается заводом-изготовителем для нормальных условий работы экскаватора и не учитывает фактические условия его эксплуатации.

Время наступления проведения конкретного вида работ определяется наработкой оборудования, которая для разных предприятий, и в том числе машин имеет свою единицу измерения (часы, мото-часы, километр пробега, количество циклов «вкл-выкл» и др.). Для экскаватора ЭКГ-18Р, выпускаемого ООО «ИЗКАРТЭКС», этой единицей является время его работы (ч).

Ясно, что два одинаковых экскаватора (имеющих одинаковую наработку), но работающих в разных условиях, с разной интенсивностью расходуют свой ресурс. При этом, при одинаковой структуре графиков ППР, для экскаватора, работающего в более тяжелых условиях, отказ наступит раньше. Ориентация же при составлении графика ППР на этот экскаватор приведет к недоиспользованию ресурса второго экскаватора.

Корректировка периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту осуществляется предварительным расчетом и

последующим применением коэффициента расходования ресурса  $k_{pp}$  по формуле 2.20, указанной выше.

Пример полученных значений годовой наработки для радиально-линейной ( $k_{pp} = 0,86$ ) и линейно-наклонной ( $k_{pp} = 1,11$ ) траекторий с углом наклона  $80^\circ$  представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значение годовой наработки для радиально-линейной и линейно-наклонной траекторий с углом наклона  $80^\circ$  (по данным автора)

Вид обслуживания		Q, ч		
		при $k_{pp} = 1$	при $k_{pp} = 0,86$	при $k_{pp} = 1,11$
Ежемесячное обслуживание	$\downarrow_{TO_M}$	500-600	581-698	450-541
Текущий ремонт первый (квартальный)	$\downarrow_{TP_1}$	1500-1800	1744-2093	1351-1622
Текущий ремонт второй (полугодовой)	$\downarrow_{TP_2}$	3000-3600	3488-4186	2703-3243
Текущий ремонт третий (годовой)	$\downarrow_{TP_3}$	6000-7500	6977-8721	5405-6757

Для удобства применения график проведения ППР, как правило, составляется не в виде наработки часов, а в календарном времени. Обычно за единицу времени принимается календарный месяц, который разбивается на дни (сутки).

Таким образом, годовой график проведения мероприятий технического обслуживания и ремонта для нормальных условий эксплуатации экскаватора будет иметь вид, представленный на рисунке 4.3.

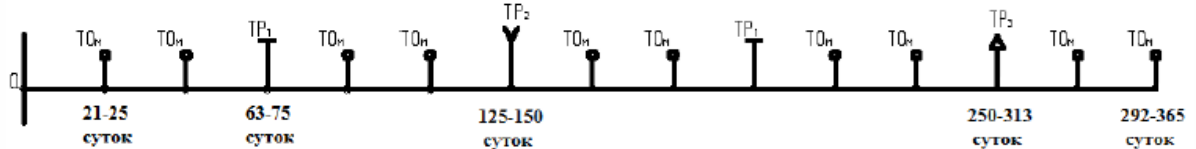


Рисунок 4.3 – Годовой график проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту для нормальных условий [3]

Таким образом, также необходимо преобразовать таблицу 4.1 с расчетом на календарные дни. Периодичность проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Периодичность проведения работ ППР для радиально-линейной и линейно-наклонной траекторий с углом наклона  $80^\circ$  (по данным автора)

Вид обслуживания		Периодичность, сутки		
		при $k_{pp} = 1$	при $k_{pp} = 0,8$	при $k_{pp} = 1,03$
Ежемесячное обслуживание	$\downarrow_{\text{ТО}_m}$	21-25	24-29	19-23
Текущий ремонт первый (квартальный)	$\downarrow_{\text{ТР}_1}$	63-75	73-87	57-68
Текущий ремонт второй (полугодовой)	$\downarrow_{\text{ТР}_2}$	125-150	145-174	113-135
Текущий ремонт третий (годовой)	$\downarrow_{\text{ТР}_3}$	250-313	291-364	225-282

Итоговые графики проведения работ планово-предупредительного ремонта (ППР) для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $80^\circ$  и линейно-наклонной траектории с углом наклона  $80^\circ$  представлены на рисунках 4.4 и 4.5, соответственно. При этом, черным цветом указан график проведения работ ППР для базовых условий, указанный производителем в эксплуатационной документации.

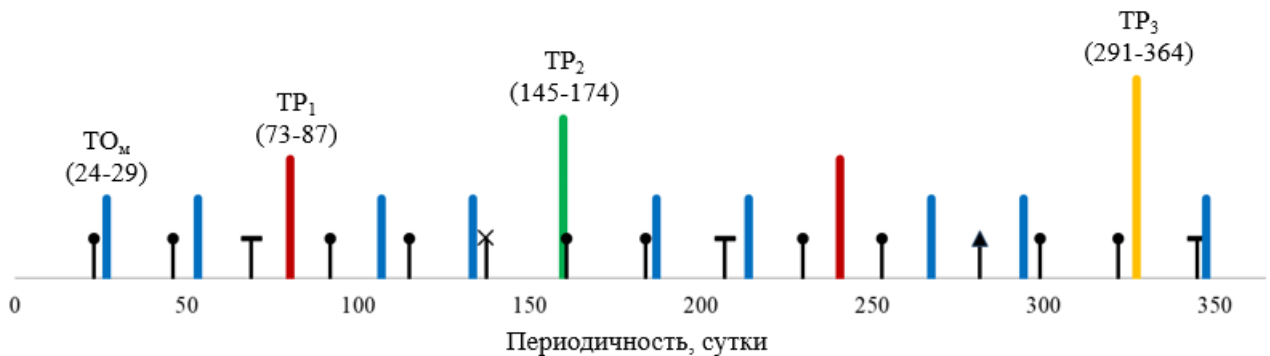


Рисунок 4.4 – График проведения ППР при  $k_{pp} = 0,86$  (составлено автором)

При этом годовой регламент проведения работ для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $80^\circ$  представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Корректировка годового план-графика проведения ППР при  $k_{pp} = 0,86$  по отношению к плановому при  $k_{pp} = 1,0$  (по данным автора)

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	

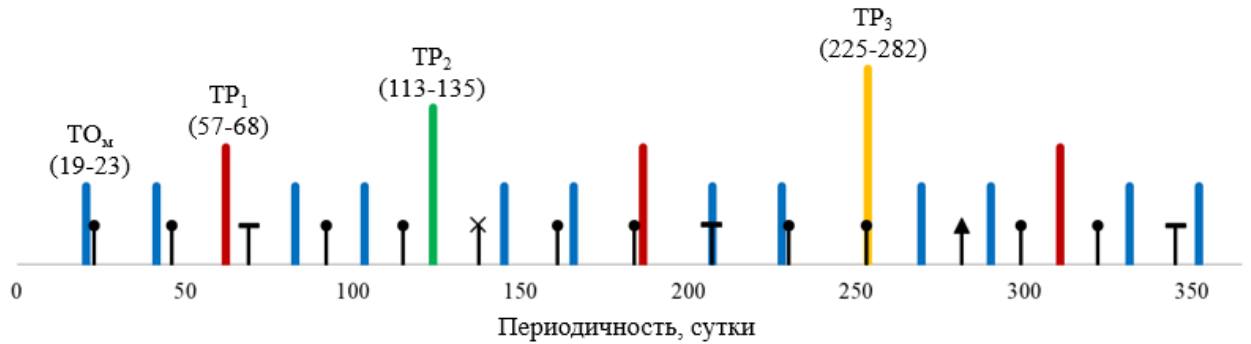


Рисунок 4.5 – График проведения ППР при  $k_{pp} = 1,11$  (составлено автором)

Годовой регламент проведения работ для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Корректировка годового план-графика проведения ППР при  $k_{pp} = 1,11$  по отношению к плановому при  $k_{pp} = 1,0$  (по данным автора)

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			TP1		TP2		TP1			TP3		TP1
Факт			TP1		TP2		TP1		TP3		TP1	

Применение коэффициента расходования ресурса как инструмента в корректировке периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту позволяет повысить коэффициент готовности экскаватора, снизить риски возникновения внезапных отказов и избежать проведения малоэффективных мероприятий технического обслуживания и ремонта.

### 4.3 Подбор траектории копания (обратная задача)

На основе методики расчета нагрузки рабочего оборудования экскаватора и последующей корректировки графика технического обслуживания и ремонта, описанной выше, можно решить обратную задачу, когда по каким-либо причинам проведение мероприятий технического обслуживания и ремонта необходимо проводить строго по регламенту в установленные производителем сроки.

Опираясь на известный график проведения работ, используя «Программу для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы», можно оценить с какой траекторией движения ковша в забое необходимо экскавировать горную массу.

Также можно рассчитать максимально допустимую насыпную плотность и кусковатость среднего куска горной массы для обеспечения заданной скорости выработки ресурса приводов рабочего оборудования.

#### **4.4 Оценка изменения усилия копания с прибором машинного зрения в реальном времени**

Возвращаясь к пункту 2.1 настоящей работы, оценить влияние кусковатости и насыпной плотности экскавируемой массы на работу экскаватора можно, соотнеся величину усилия копания при разной кусковатости и насыпной плотности к величине усилия при нормальных условиях.

Тогда задачами становятся определение кусковатости и насыпной плотности в горном массиве и определение зависимости изменения усилия копания от кусковатости и насыпной плотности экскавируемой массы.

Определение кусковатости и насыпной плотности возможно с помощью отечественного программно-аппаратного обеспечения, указанного в разделе 1.3.3. Совместив этот инструмент с зависимостями, найденными в главах 2 и 3, можно оценивать нагрузки и мощности в системе приводов, а также интенсивность выработки ресурса при меняющихся характеристиках экскавируемой горной породы.

Таким образом, был проведен расчет коэффициента расходования ресурса и периодичность проведения работ ППР для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  (так как данная траектория определена как базовая) с изменением плотности и кусковатости на 25 % при прочих равных нормальных условиях эксплуатации экскаватора. Результаты представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Периодичность проведения работ ППР для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  с изменением плотности и кусковатости на 25 % (по данным автора)

Изменение параметра	$\rho$ при нормальных условиях -25%	$d$ при нормальных условиях -25%	$\rho$ и $d$ при нормальных условиях	$\rho$ при нормальных условиях +25%	$d$ при нормальных условиях +25%
Средняя мощность за цикл, кВт	531,0	524,2	574,2	613,5	611,3

## Продолжение Таблицы 4.5

Изменение параметра	$\rho$ при нормальных условиях -25%	$d$ при нормальных условиях -25%	$\rho$ и $d$ при нормальных условиях	$\rho$ при нормальных условиях +25%	$d$ при нормальных условиях +25%
Коэффициент расходования ресурса $k_{pp}$	0,92	0,91	1,00	1,07	1,06
Вид обслуживания	Периодичность, сутки				
Ежемесячное обслуживание $\uparrow_{TO_M}$	23-27	23-27	21-25	20-23	20-24
Текущий ремонт первый (квартальный) $\uparrow_{TP_1}$	68-82	69-82	63-75	59-70	59-71
Текущий ремонт второй (полугодовой) $\uparrow_{TP_2}$	136-163	137-165	125-150	117-140	118-142
Текущий ремонт третий (годовой) $\uparrow_{TP_3}$	272-340	275-344	250-313	234-293	236-295

Итоговые графики проведения работ планово-предупредительного ремонта (ППР) для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  с изменением плотности и кусковатости на 25% представлены на рисунках 4.6-4.9.

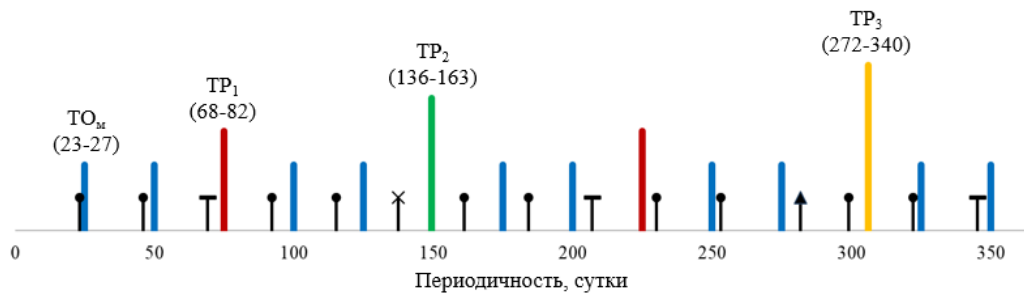


Рисунок 4.6 – График проведения ППР для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  с уменьшением плотности при нормальных условиях на 25 % (составлено автором)

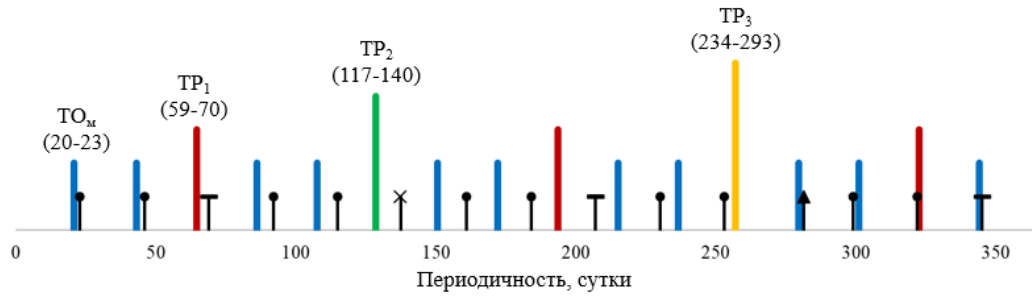


Рисунок 4.7 – График проведения ППР для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  с увеличением плотности при нормальных условиях на 25 % (составлено автором)

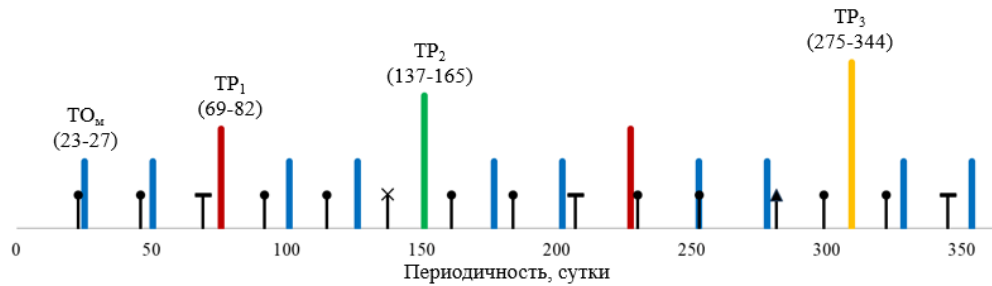


Рисунок 4.8 – График проведения ППР для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  с уменьшением кусковатости при нормальных условиях на 25 % (составлено автором)

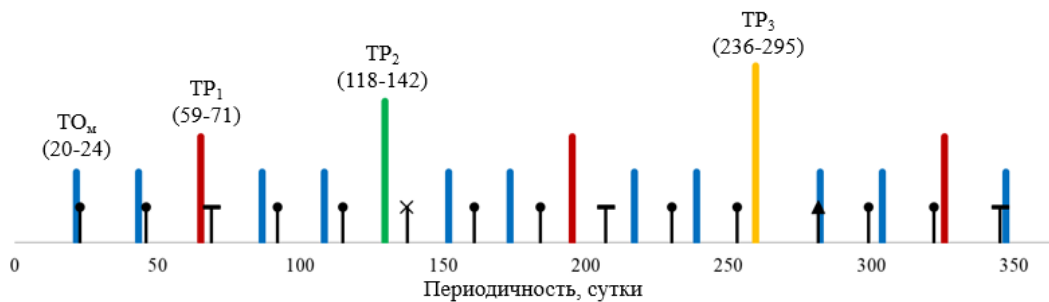


Рисунок 4.9 – График проведения ППР для радиально-линейной траектории с углом наклона линейной части  $60^\circ$  с увеличением кусковатости при нормальных условиях на 25 % (составлено автором)

Зависимости, полученные в главе 3, в совокупности с программно-аппаратным обеспечением, указанным ранее, можно также использовать для расчета величины стружки, обеспечивающей работу рабочего оборудования без перегрузок.

Для этого необходимо задаться максимально допустимыми нагрузками и мощностями при анализе кусковатости, и в том числе насыпной плотности. Тогда при наличии установленной расчетной программы (в которую заранее установлены полученные зависимости) можно получать оптимальную величину стружки в режиме реального времени.

Блок-схема алгоритма расчета потребной величины срезанной стружки  $t$ , встроенной в алгоритм оценки гранулометрического состава забоя, представлена на рисунке 4.10.

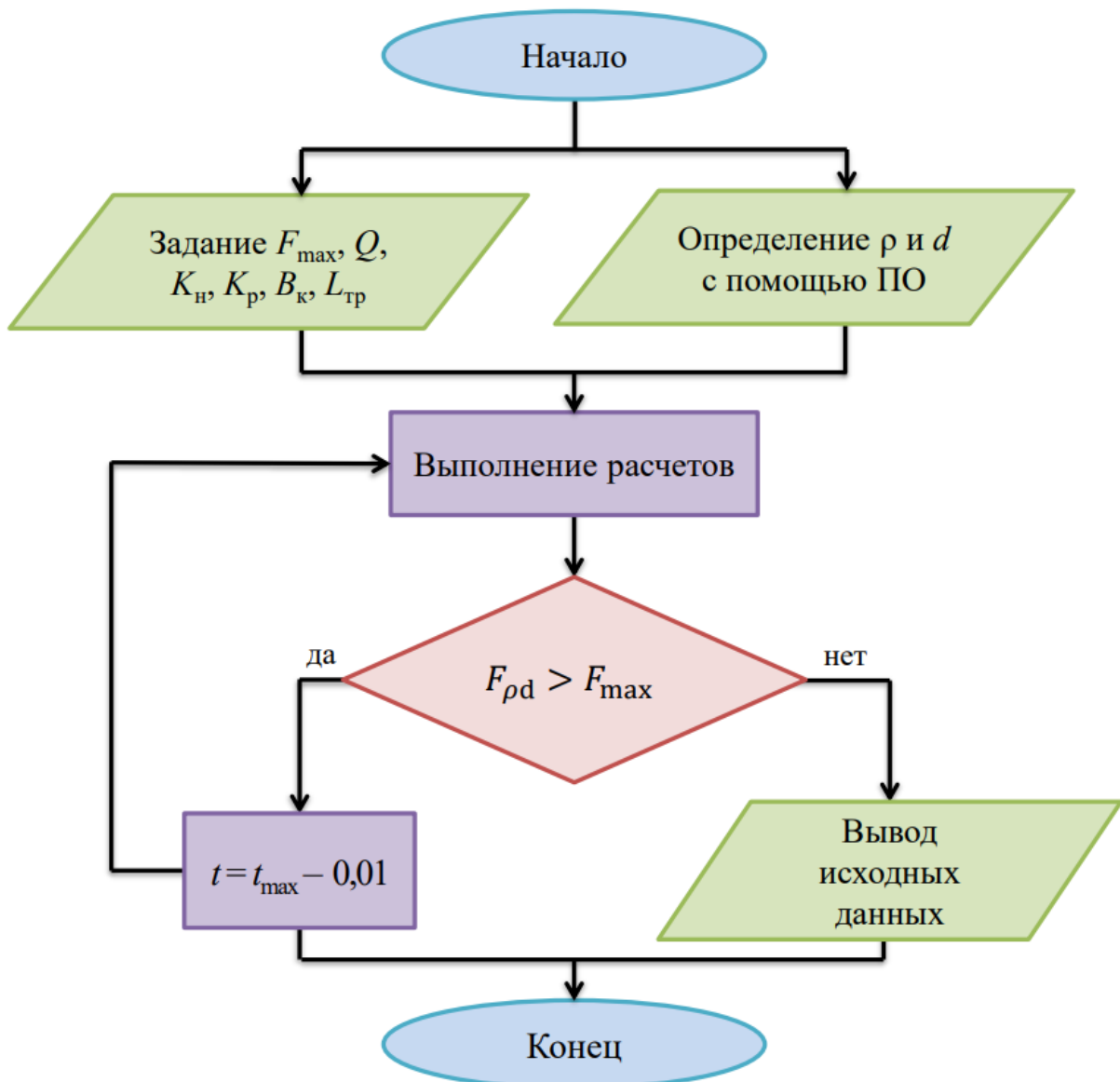


Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма расчета величины срезанной стружки  $t$   
(составлено автором)

Данный алгоритм работает следующим образом:

Шаг 1. Оператором перед началом работы задаются следующие показатели: максимально допустимая величина усилия копания  $F_{\max}$ , вместимость ковша  $Q$ , коэффициенты наполнения ковша  $K_n$  и разрыхления породы в ковше  $K_p$ , ширина режущей кромки ковша  $B_k$  и длина траектории копания  $L_{\text{тр}}$ .

Шаг 2. Программно-аппаратным обеспечением определяются плотность  $\rho$  и кусковатость  $d$  породы в забое.

Шаг 3. Программой проводятся расчеты:

Шаг 3.1. Определение максимальной толщины стружки для полного заполнения ковша породой по выражению (1.13).

Шаг 3.2. Расчет усилия копания по выражению (3.25) с учетом необходимых функций (3.23 и 3.24).

Шаг 4. Сравнение рассчитанного значения  $F_{pd}$  с заданным максимально допустимым усилием  $F_{\max}$ .

Шаг 4.1. Если  $F_{pd} < F_{\max}$ , значение максимальной толщины стружки является искомым и выводится на экран оператора.

Шаг 4.2. В противном случае – стружка уменьшается на некоторое значение, и программа возвращается на шаг 3.2.

Итерация производится до выполнения условия, описанного в шаге 4.1.

Такой подход позволит в режиме реального времени определять оператору оптимальную величину стружки. Это снизит риски перегрузки системы рабочего оборудования, при этом позволит максимально использовать потенциал машины.

#### **4.5 Отработка забоя на угольных разрезах с дифференцированной отработкой смежных забойных блоков**

В разделе 2.3 анализ показателей работы приводов рабочего оборудования приведен при отработке забойного блока от крайней ближней до крайней дальней траектории. Однако, при проведении исследования было выявлено, что наибольшая траектория копания (и, соответственно, наименьшая условная стружка) реализуется при отработке по средней траектории. При условии, что ковш экскаватора вне зависимости от выбранной траектории наполняется горной массой

полностью, обработка при наибольшей обрабатываемой траектории реализуется с меньшими нагрузками, затраченной работой и потребляемой мощностью.

Так, при обработке от крайней ближней до крайней дальней радиально-линейной траектории с углом наклона  $80^\circ$  (рисунок 4.11) средняя мощность за цикл равна 494,8 кВт с обработкой забойного блока объемом  $1715 \text{ м}^3$ . Коэффициент расходования ресурса приводов рабочего оборудования  $k_{pp}$  при такой обработке равен 0,86. Если учесть, что время вспомогательных работ, включающих в себя зачистку подошвы уступа и передвижение экскаватора на следующую точку стояния, занимает 6% от общего времени обработки забойного блока, эксплуатационная производительность экскаватора для рассматриваемых траекторий составит  $1877 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

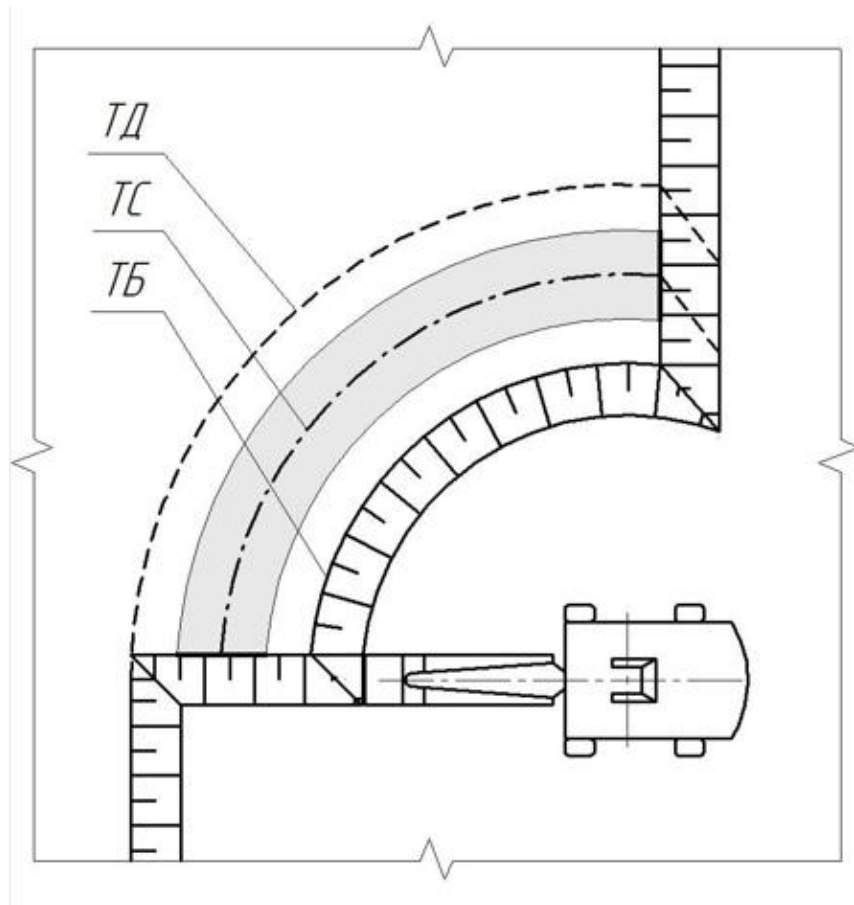


Рисунок 4.11 – Типовая схема обработки забойного блока (составлено автором)

С учетом сделанных ранее выводов, предлагается проводить дифференцированную обработку смежных забойных блоков (рисунок 4.12), суть ее заключается в следующем: сначала обработка производится от ближней средней (средняя между крайней ближней и средней) до дальней средней (средняя между

средней и крайней дальней) траектории, затем экскаватор перемещается на величину, равную отработанной им глубины забойного блока. После чего производится еще одна отработка – от ближней средней до дальней траектории.

При такой отработке средняя потребляемая мощность за цикл составит 478 кВт с отработкой двух забойных блоков общим объемом 2513 м<sup>3</sup>. При этом, коэффициент расходования ресурса приводов рабочего оборудования экскаватора  $k_{pp}$  будет равен 0,83. С учетом времени на два передвижения экскаватора производительность составит 2200 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, при данной схеме отработки забоя производительность увеличится на 17% с одновременным снижением скорости выработки ресурса рабочего оборудования на 3%.

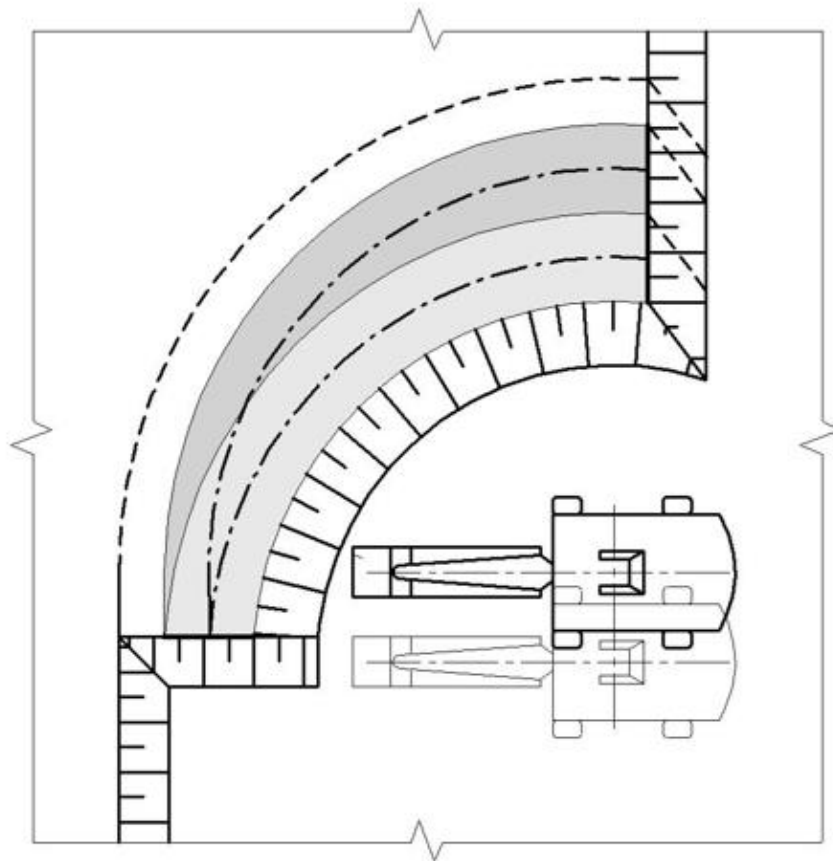


Рисунок 4.12 – Дифференцированная отработка смежных забойных блоков  
(составлено автором)

Если проводить дифференцированную отработку смежных забойных блоков по средней траектории (рисунок 4.13) – когда за счет большего числа передвижения экскаватора в заходке сохраняется отработка забойного блока преимущественно по средней траектории, при отработке одинаковой площади сечения забойного блока

(как в первом случае) за 4 передвижения можно снизить среднюю потребляемую мощность приводами за цикл до 471 кВт и, соответственно, уменьшить коэффициент расходования ресурса приводов рабочего оборудования экскаватора  $k_{pp}$  до 0,82 при рассматриваемых условиях. При этом производительность будет равна 1956 м<sup>3</sup>/ч. Такая схема отработки позволит снизить скорость расходования ресурса приводов рабочего оборудования без уменьшения производительности экскаватора.

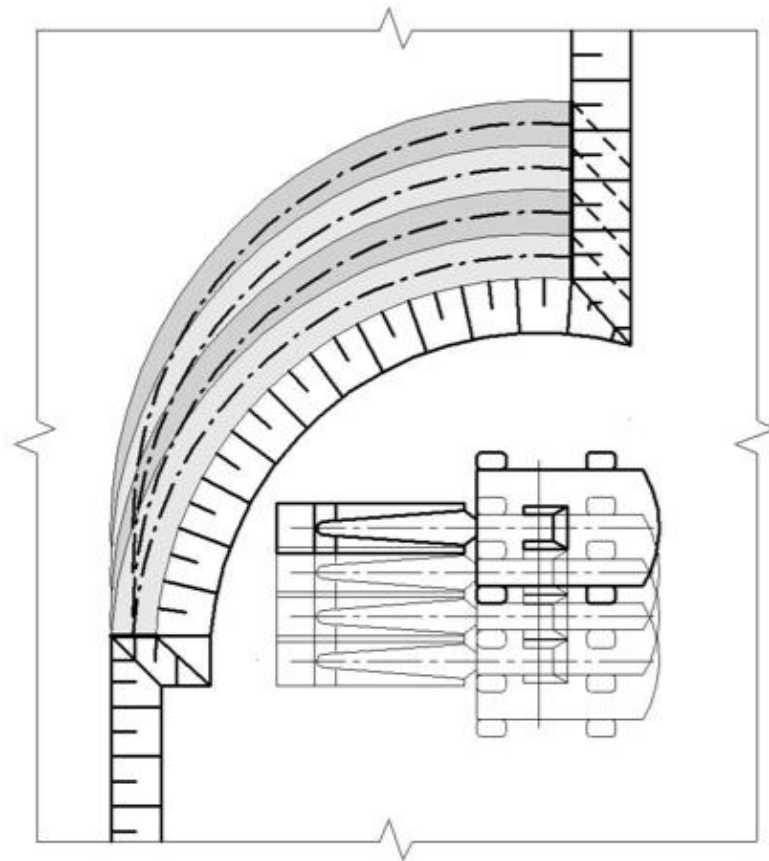


Рисунок 4.13 – Дифференцированная отработка смежных забойных блоков по средней траектории (составлено автором)

#### 4.6 Выводы по Главе 4

1. На основе проведенного теоретического исследования по нагруженности приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора разработан алгоритм и программа расчета кинестатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы при заданной траектории копания, что подтверждено получением Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665458 «Программа для

оценки кинестатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы» (Приложение Б).

2. Обосновано применение коэффициента расходования ресурса как инструмента по корректировке периодичности проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту без изменения структуры цикла. Его применение позволяет повысить коэффициент готовности экскаватора, снизить риски возникновения внезапных отказов и избежать проведения малоэффективных мероприятий технического обслуживания и ремонта путем приведения реальных нагрузок при функционировании экскаватора к нормальным с последующей корректировкой продолжительности межремонтного цикла.

3. На основе результатов, полученных при проведении теоретического исследования по нагруженности приводов рабочего оборудования экскаватора, и примере корректировки графика технического обслуживания и ремонта предложена возможность решения обратной задачи – определения рациональной траектории копания для конкретных условий эксплуатации, когда по каким-либо причинам проведение мероприятий технического обслуживания и ремонта необходимо проводить строго по регламенту в установленные производителем сроки.

4. Предложен алгоритм оценки выбора величины заглубления ковша в забой при копании в функции величины гранулометрического состава развала забоя по результатам нейросетевого анализа на основе использования отечественного программно-аппаратного обеспечения и гарантированного обеспечения работы оборудования карьерного экскаватора без перегрузок.

5. Разработаны рекомендации по дифференцированной отработке смежных забойных блоков, применение которой позволяет снизить коэффициент расходования ресурса приводов рабочего оборудования  $k_{pp}$  до 0,82.

## 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 деградационных 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 последнего использованием данных о кусковатости в забое на основании машинного зрения.

4. На основе численного моделирования выявлены функции изменения величины усилия сопротивления копания 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 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов, П.В. Численное моделирование процессов естественной вентиляции в открытом карьере на различных глубинах в условиях инверсии атмосферы / П.В. Амосов, А.А. Бакланов // Российская горнодобывающая промышленность. – 2023. – №5S. – С. 65–71. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71>.
2. Анализ областей применения канатных и гидравлических экскаваторов при открытой разработке месторождений / В. Н. Сытенков, А. Р. Ганин, Т. В. Донченко, Д. А. Шибанов // Рациональное освоение недр. – 2014. – № 3. – С. 30-37.
3. Анализ работоспособности экскаваторов при системе фирменного технического обслуживания (часть 1) / Д. А. Шибанов, А. А. Емельянов, П. В. Иванова, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 20–21 апреля 2017 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 401-404.
4. Анализ работоспособности экскаваторов при системе фирменного технического обслуживания (часть 2) / Д. А. Шибанов, А. А. Емельянов, П. В. Иванова, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 20–21 апреля 2017 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2017. – С. 405-409.
5. Ананин, В. Г. Исследование и моделирование рабочего оборудования с коленчато-рычажным напором на базе экскаватора ЭКГ-15 / В. Г. Ананин, А. И. Тюйменов, А. А. Кыпчаков // Избранные доклады 63-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых учёных, Томск, 20 апреля 2017 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – С. 314-318.
6. Анистратов, К. Ю. Анализ рынка карьерных экскаваторов и самосвалов в РФ и странах СНГ / К. Ю. Анистратов // Горная промышленность. – 2012. – № 2(102). – С. 16-19.

7. Анистратов, К. Ю. Анализ факторов, определяющих эффективность карьерных экскаваторов с речным напором ПАО УРАЛМАШЗАВОД / К. Ю. Анистратов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S38. – С. 70-83. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-12-38-70-83.
8. Анистратов, К. Ю. Анализ эффективности применения экскаваторов УЗТМ-КАРТЭКС на карьерах / К. Ю. Анистратов // Горная промышленность. – 2019. – № 5(147). – С. 20.
9. Антоненко, И. Н. Информационные системы и практики ТОиР: этапы развития / И. Н. Антоненко, И. Э. Крюков // Главный энергетик. – 2011. – № 10. – С. 37-44.
10. Арсеньев, Ю.Д. Теория подобия в инженерных экономических расчетах / Ю.Д. Арсеньев. – М.: Высшая школа, 1967. – 257 с.
11. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учеб. пособие для вузов / В.И. Баловнев. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1994. – 432 с.
12. Баловнев, В.И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин: учеб. пособие / В.И. Баловнев. – М.: МАДИ, 2014. – 148 с.
13. Беляков Ю. И. Проектирование экскаваторных работ / Ю.И. Беляков. – М.: Недра, 1983. – 349 с.
14. Бестранспортная технология разработки законсервированных запасов угля по пласту VI на разрезе "Томусинский" / М. А. Тюленев, С. О. Марков, А. Б. Паламарчук, Т. Н. Гвоздкова // Техника и технология горного дела. – 2020. – № 3(10). – С. 18-57. – DOI 10.26730/2618-7434-2020-3-18-57.
15. Бойко, А. Ф. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов / А.Ф. Бойко, Е. Ю. Кудеников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 8. – С. 128-132.

16. Боярских, Г. А. Надёжность горных машин и оборудования: учебное пособие / Г. А. Боярских, И. Г. Боярских. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2008. – 130 с. – ISBN 5-8019-0038-1.

17. Боярских, Г. А. Принципы и задачи мониторинга надежности технических систем горной промышленности / Г. А. Боярских, Н. П. Дергунов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 1. – С. 214-215.

18. Буянкин, П. В. Моделирование динамических нагрузок на опорно-поворотное устройство экскаватора-мехлопаты / П. В. Буянкин, Е. К. Соколова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : Труды международной научно-практической конференции, Кемерово, 08–11 октября 2013 года / Под редакцией В.И. Клишина, З.Р. Исмагилова, В.Ю. Блюменштейна, С.И. Протасова, Г.П. Дубинина. – Кемерово: Без издательства, 2013. – С. 38-41.

19. Васьков, В. С. Оценка методов расчета нагрузок на рабочее оборудование карьерных экскаваторов / В. С. Васьков, В. М. Таугер // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 153.

20. Великанов, В. С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели / В. С. Великанов // Записки Горного института. – 2020. – Т.241. – С. 29-36. DOI:10.31897/PMI.2020.1.29.

21. Волков, Д. П. Динамика и прочность одноковшовых экскаваторов : / Д. П. Волков. – М : Машиностроение, 1965. – 462 с.

22. Выемочно-погрузочные работы: Учеб. пособие. – 2-е изд., стер. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 267 с.

23. Гафурьянов, Р. Г. Оценка энергетической характеристики карьерных экскаваторов / Р. Г. Гафурьянов, А. П. Комиссаров, В. С. Шестаков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 8. – С. 252-254.

24. Герике, П. Б. Некоторые результаты прогнозирования технического состояния карьерных экскаваторов / П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Вестник научного

центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 1. – С. 85-91. – DOI 10.26631/arc1-2023-85-91.

25. Герике, П. Б. Оценка параметров деградации технического состояния горных машин с использованием разработанного программного обеспечения / П. Б. Герике, Б. Л. Герике, А. С. Телегуз // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 2(166). – С. 57-67. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-2-57-67.

26. Герике, П. Б. Перспективы использования единых диагностических критериев для прогнозирования фактического состояния горной техники / П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 3(173). – С. 33-42. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-3-33-42.

27. Герике, П. Б. Разработка математической деградационной модели для оборудования карьерных экскаваторов / П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2022. – № 2. – С. 71-78.

28. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 12 с.

29. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 35 с.

30. ГОСТ Р 27.601-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание и его обеспечение. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 24 с.

31. ГОСТ Р 27.606-2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 40 с.

32. ГОСТ Р 55165–2012. Оборудование горно-шахтное. Экскаваторы одноковшовые карьерные с вместимостью ковша свыше 4 м куб. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 2014–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 16 с.

33. ГОСТ Р 57329-2016. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Системы технического обслуживания и ремонта. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 23 с.

34. Губенко, А. А. Обзор и анализ параметров конструкций упругодемпфирующих устройств / А. А. Губенко, В. П. Свиначук // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2011. – № 1. – С. 9-19.

35. Домбровский, Н. Г. Экскаваторы / Н. Г. Домбровский. – Москва : Машиностроение, 1969. – 318 с.

36. Дрыгин, М. Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования / М. Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2(148). – С. 35-43. – DOI 10.26730/1816-4528-2020-2-35-43.

37. Дрыгин, М. Ю. Применение информационных систем для повышения эффективности ТОИР горного оборудования / М. Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 1(153). – С. 18-26. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-1-18-26.

38. Дрыгин, М. Ю. Пути повышения производительности экскаваторного парка Кузбасса / М. Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 1(153). – С. 9-17. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-1-9-17.

39. Дрыгин, М. Ю. Разработка системы контроля и учета работы для карьерных экскаваторов типов драглайн и мехлопата / М. Ю. Дрыгин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 1(137). – С. 29-39. – DOI 10.26730/1999-4125-2020-1-29-39.

40. Ефимов, В. Н. Карьерные экскаваторы: справочник рабочего / В. Н. Ефимов, В. Н. Цветков, Е. М. Садовников. – М.: Недра, 1994. – 381 с.

41. Задачи развития перспективных циклично-поточных технологий для глубоких карьеров / А. Г. Журавлев, А. В. Семенкин, В. А. Черепанов [и др.] // Горная промышленность. – 2022. – № S1. – С. 53-62. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-53-62.

42. Звонарев, И. Е. Вероятностный подход при оценке энергоресурса трансмиссий горных машин / И. Е. Звонарев, А. С. Фокин, С. Л. Иванов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 249-254.

43. 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.

44. Иванов, С. Л. О средствах разрушения негабаритов горных пород на карьерах / С.Л. Иванов, **Е. И. Шешукова**, Е. С. Недашковская // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 45-48.

45. Иванов, С. Л. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации / С. Л. Иванов, П. В. Иванова, С. Ю. Кувшинкин // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228-233. – DOI 10.31897/PMI.2020.2.228.

46. Иванов, С. Л. Совершенствование методов расчета и оценки качества горных машин (на примере привода подачи типа "Урал") / С. Л. Иванов, М. Д. Коломийцов // Записки Горного института. – 1995. – Т. 142. – С. 113-120.

47. Иванова, П. В. Оценка отказоустойчивости современных карьерных экскаваторов производства ООО "ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова" / П. В. Иванова, С. Ю. Кувшинкин, Д. А. Шибанов // Инновации на транспорте и в машиностроении : сборник трудов IV международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28–29 апреля 2016 года / Отв. ред. В.В. Габов, Н.С. Голиков. Том II. – Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет«Горный», 2016. – С. 157-159.

48. Ивершина, Г. Е. Открыто-подземная геотехнология освоения угольных месторождений с применением КГРП / Г. Е. Ивершина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 2(53). – С. 3-7.

49. Индекс жесткости погоды как интегральный показатель влияния погодных условий на работоспособность карьерных экскаваторов / П. В. Иванова, С. Л. Иванов, С. Ю. Кувшинкин, Д. А. Шибанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S38. – С. 359-368. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-12-38-359-368.

50. Исследование напряженно-деформированного состояния рабочего органа карьерного экскаватора при динамических нагрузках от грансостава пород / В. С. Великанов, И. А. Гришин, О. А. Лукашук [и др.] // Уголь. – 2024. – № 12(1188). – С. 103-107. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-12-103-107.

51. Квагинидзе, В. С. Экскаваторы на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: учебное пособие / В. С. Квагинидзе, В. Б. Корецкий, Н. Н. Чупейкина. – М.: Горная книга: Московский государственный горный университет, 2009. – 409 с.

52. Коломийцов, М. Д. Энергетический метод прогнозирования ресурса горных машин / М. Д. Коломийцов // Записки Ленинградского горного института. – 1988. – Т. 117. – С. 70-74.

53. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства "ИЗ-КАРТЭКС" / Д. А. Шибанов, Д. И. Шишлянников, П. В. Иванова, С. Л. Иванов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 9(118). – С. 3-9.

54. Костыгова, Д. М. Имитационное моделирование карьерного экскаватора ЭКГ-18Р производства ООО "ИЗ-КАРТЭКС" в тренажере подготовки машинистов / Д. М. Костыгова, А. А. Емельянов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S23. – С. 177-184. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-10-23-177-184.

55. Кох, П.И. Климат и надежность машин / П.И. Кох. – М.: Машиностроение, 1981. – 174с.

56. Кох, П.И. Надежность механического оборудования карьеров / П.И. Кох. – М.: Недра, 1978. – 189 с.
57. Кочетков, В. П. Динамика экскаваторного электропривода переменного тока с комбинированной оптимальной системой управления / В. П. Кочетков, Н. С. Курочкин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 109-116.
58. Красникова, Т. И. Обоснование и выбор рациональных параметров эксплуатации экскаваторов циклического действия / Т. И. Красникова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 423-427.
59. Красникова, Т. И. Расчет норм запасных частей и материалов для экскаваторов, эксплуатируемых на горно-добывающих предприятиях / Т. И. Красникова, Д. А. Шибанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – № 11(108). – С. 45-48.
60. Кузнецов, Д. В. Открытая разработка угольных и рудных месторождений: учебное пособие / Д. В. Кузнецов, Ю. В. Ромашкин. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – 180 с.
61. Летнев, К. Ю. Энергоемкость процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора / К. Ю. Летнев // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 3(143). – С. 9-13. – DOI 10.26730/1816-4528-2019-3-9-13.
62. Махно, Д. Е. Критические значения напряжений в базовых узлах металлоконструкций карьерных экскаваторов, работающих в регионах Севера / Д. Е. Махно, А. Ю. Болотнев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. – № 8. – С. 96-100.

63. Махно, Д. Е. Повышение надежности механического оборудования карьеров в регионах холодного климата / Д. Е. Махно, А. И. Шадрин, А. Н. Авдеев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2010. – № 5. – С. 57-60.

64. Махно, Д. Е. Проблема хладостойкости конструкций при эксплуатации карьерных экскаваторов в регионах холодного климата / Д. Е. Махно, А. Н. Авдеев, А. Ю. Болотнев // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 9. – С. 25-28.

65. 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.

66. Морозов, В.И. Главные направления развития технического обслуживания и ремонта горных машин / В.И. Морозов, В.И. Русихин // Совершенствование конструкции, технологии изготовления и эксплуатации горного оборудования и средств автоматизации: Междунар. межвуз. науч.-практ. конф., 19-23 окт. 1992 г. Ч. 1. – М.: Изд-во МГИ, 1992. – С. 215-220.

67. Морозов, В.И. Сервисное обслуживание карьерных экскаваторов цикличного действия / В.И. Морозов, Г.К. Лазарев // Мировая горная промышленность. – 1996. – С.48-52.

68. Новая технология и оборудование для безвзрывного формирования рабочей зоны глубоких карьеров / С. Я. Левенсон, М. А. Ланцевич, Л. И. Гендлина, А. Н. Акишев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 5. – С. 125-132.

69. О влиянии гранулометрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора / В. С. Великанов, С. А. Чернухин, Н. С. Тельминов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 30-43. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43.

70. О развитии взаимодействия персонала системы ремонтного обслуживания и эксплуатации оборудования / А. С. Костарев, Г. Н. Шаповаленко,

И. Н. Сухарьков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S39. – С. 243-249. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-12-39-243-249.

71. Ограничение динамических нагрузок в копающих механизмах карьерных экскаваторов на основе дополнительных механических устройств / И. А. Иов, Н. К. Кузнецов, И. В. Зырянов, В. А. Храмовских // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 12-3. – С. 49-67. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2025\_123\_0\_49.

72. Особенности кинематики совместного функционирования главных механизмов и рабочего оборудования карьерного экскаватора при экскавации горных пород / А. П. Комиссаров, О. А. Лукашук, Р. Ш. Набиуллин, К. Ю. Летнев // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1(171). – С. 31-39. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-1-31-39.

73. Открытая разработка угольных и рудных месторождений: Учебное пособие. – 2-е изд. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2000. – 611 с.

74. Оценка влияния погодно-климатического фактора на отказоустойчивость оборудования минерально-сырьевого комплекса / С. Л. Иванов, П. В. Иванова, С. Ю. Кувшинкин, Д. А. Шибанов // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. – 2018. – № 4(14). – С. 17-27.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. Оценка усилия копания ковшом экскаватора при физическом моделировании / **Е.И. Шешукова**, В. А. Плащинский, А. Э. Салимов, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 190-192.

79. Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов / Е. В. Пумпур, В. И. Князькина, К. А. Сафрончук, С. Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S41. – С. 3-19. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-12-41—19.

80. Паначев, И. А. К методике экспериментальных исследований нагруженности элементов конструкций экскаваторов-мехлопат / И. А. Паначев, А. А. Черезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 1(95). – С. 19-23.

81. Параметрическая оптимизация копающего механизма карьерного экскаватора по заданному коэффициенту динамичности / Н. К. Кузнецов, И. А. Иов, А. А. Иов, Е. С. Долгих // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 3(59). – С. 13-19. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-3-13-19.

82. Параметрический синтез упругодемпфирующих устройств в копающих механизмах карьерных экскаваторов / И. В. Зырянов, А. А. Иов, И. А. Иов, В. А. Храмовских // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 4. – С. 121-133. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_4\_0\_121.

83. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 8-ое изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Майнинг Медиа Групп», 2013. – 594 с.

84. Подэрни, Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 680 с.

85. Применение механических и гидравлических экскаваторов при отработке безугольных зон на разрезах Кузбасса / Л. И. Кантович, А. А. Хорешок, М. А. Тюленев, Д. А. Кузиев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S1. – С. 296-306.

86. Пятибратов, Г. Я. Повышение эффективности применения быстродействующих электроприводов копающих механизмов карьерных экскаваторов / Г. Я. Пятибратов, А. М. Борисов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 3-3. – С. 138-144.

87. Развитие рабочей зоны угольных разрезов при переходе на циклично-поточные технологии / Б. Р. Ракишев, С. К. Молдабаев, Г. К. Саменов, М. С. Нургалиева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 6. – С. 58-66.

88. Развитие системы мониторинга условий и режимов эксплуатации, технологии и организации ремонтного обслуживания экскаваторов на разрезе "Черногорский" / А. И. Заяц, В. А. Беклемешев, В. С. Байкин, В. А. Хажиев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S39. – С. 201-208. – DOI 10.25018/0236-1493-2017-12-39-201-208.

89. Ракишев Б.Р. Классификация технологий открытой разработки полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-5-15.

90. Ракишев, Б. Р. Классификация технологических комплексов открытых горных работ / Б. Р. Ракишев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S1. – С. 297-306.

91. Ракишев, Б. Р. Технологические комплексы открытых горных работ: Учебник. – Алматы, 2015. – 285 с.

92. Решетников, С. О. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта технологического оборудования

нефтеперерабатывающих предприятий / С. О. Решетников, С. Л. Иванов, А. Р. Абашев // Master's Journal. – 2017. – № 1. – С. 109-114.

93. Ржевский, В. В. Открытые горные работы. Учебник для вузов. В 2-х частях. Часть 2. Технология и комплексная механизация. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 549 с.

94. Ржевский, В. В. Открытые горные работы. Часть I. Производственные процессы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 509 с.

95. Рыльникова, М. В. Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования / М. В. Рыльникова, А. В. Власов, М. А. Макеев // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 106-112. – DOI 10.30686/1609-91922021-4-106-112.

96. Саитов, В. И. Влияние грансостава забоя на количество отказов механизма напора экскаватора циклического действия / В. И. Саитов, Л. И. Андреева, Т. И. Красникова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 234.

97. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665458 Российская Федерация. Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы. Заявка №2024663807: заявл. 18.06.2024; опубли. 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.

98. Синьчковский, В. Н. Технология открытых горных работ: учебное пособие / В. Н. Синьчковский, В. Н. Вокин, Е. В. Синьчковская; под ред. В. Н. Синьковского. – 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. – 528 с.

99. Сихимбаев, М. Р. Влияние новых технологий добычи руды на экономическую оценку месторождения (на примере рудника "Коньрат") / М. Р. Сихимбаев, А. Ш. Коппаева // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 4-3. – С. 439-443.

100. Спецтехника на базе "БЕЛАЗ" и оборудование в разрабатываемой технологической схеме ликвидации негабаритов / П. И. Тарасов, Д. Н. Андрюшенков, П. Л. Мариев, А. Н. Егоров // Актуальные вопросы машиноведения. – 2013. – Т. 2. – С. 92-94.

101. Справочник. Открытые горные работы/ К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Веницкий, Н.Н. Мельников [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

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

103. Тарасов, П. И. Транспортирование негабаритов как альтернативный способ их ликвидации из рабочей зоны карьера / П. И. Тарасов, Д. Н. Андрюшенков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. – № 2. – С. 4-9.

104. Тарасов, С. П. Разработка и обоснование параметров многофункционального комплекса для разрушения негабаритов / С. П. Тарасов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 6. – С. 400-406.

105. Тенденция развития подсистем организации работы и ремонтного обслуживания горного оборудования / В. А. Хажиев, В. Б. Алексеенко, Р. Б. Аблаев [и др.] // Проблемы недропользования. – 2024. – № 2(41). – С. 103-110.

106. Технологии нейронных сетей в интеллектуальном анализе данных гранулометрического состава взорванных пород / В.С. Великанов, А.В. Дремин, С.А. Чернухин, Н.В. Ломовцева // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 90–94. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-4-90-94.

107. Технологические процессы при открытой добыче угля / Н.Я. Репин, В.Б. Артемьев, Л.Н. Репин, П.И. Опанасенко. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2015. – 560 с.

108. Типовые технологические схемы ведения горных работ на угольных разрезах. – М., Недра, 1982. – 405 с.

109. Трегубов, Н.М. Вторичное дробление горных пород при циклично-поточной технологии добычи / Н.М. Трегубов. – М.: Недра, 1976. – 160 с.

110. Хажиев, В. А. Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность использования экскаваторов-мехлопат на угольных разрезах / В. А. Хажиев // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 21-26.

111. Хамидов, О. У. Влияние квалификации машинистов карьерных экскаваторов на особенности набора горной массы / О. У. Хамидов, Д. А. Шибанов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 03–04 апреля 2025 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2025. – С. 434-437.

112. Хамидов, О. У. Влияние особенностей набора горной массы карьерным экскаватором на его производительность / О. У. Хамидов, Д. А. Шибанов, В. О. Колпаков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 28. – С. 148-153. – DOI 10.26160/2658-3305-2024-28-148-153.

113. Хамидов, О. У. Оценка влияния управляющих действий машиниста на наработку карьерного экскаватора / О. У. Хамидов, Д. А. Шибанов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2024. – Т. 1. – С. 82-86.

114. Хорешок, А. А. Оценка влияния системы эксплуатации оборудования технологического комплекса на надежность производственного цикла горнодобывающего предприятия / А. А. Хорешок, В. А. Хажиев // Транспортное,

горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 117-126. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-117-126.

115. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, Ю. А. Лагунова, Р. Ш. Набиуллин, С. А. Хорошавин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 4. – С. 156-168. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_156.

116. 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.

117. Шестаков, В. С. Исследование нагруженности стрелы экскаватора-драглайна / В. С. Шестаков, С. Ю. Брозовский, П. В. Давыдов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 1-1. – С. 167-178. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_011\_0\_167.

118. **Шешукова Е.И.** Влияние насыпной плотности и крупности породы на величину усилия копания ковшом экскаватора / **Е.И. Шешукова**, В.А. Плащинский, С.Л. Иванов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т.1. – С. 45.

119. **Шешукова, Е. И.** Анализ загрузки приводов подъема и напора рабочего оборудования экскаватора ЭКГ-18Р за рабочий цикл / **Е. И. Шешукова**, С. Л. Иванов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2024. – Т. 1. – С. 78-81.

120. **Шешукова, Е. И.** О взаимовлиянии двигателей подъема и напора экскаватора ЭКГ-18Р в процессе копания / **Е. И. Шешукова**, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXII международной научно-технической конференции,

Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 149-152.

121. **Шешукова, Е. И.** Оценка измерения параметров привода подъема ковша экскаватора ЭКГ-18р за рабочий цикл / **Е.И. Шешукова** // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2023. – Т. 1. – С. 43-47.

122. **Шешукова, Е.И.** Изменение нагруженности приводов подъема и напора экскаватора ЭКГ-18Р за цикл работы / **Е.И. Шешукова** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т.1. – С. 80.

123. Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана / О. У. Хамидов, Д. А. Шибанов, П. В. Шишкин, В. О. Колпаков // Горная промышленность. – 2024. – № 5. – С. 135-142. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-5-135-142.

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

125. Afum, B. Rock Fragmentation Evaluation towards Blast-To-Mill Concept of Blast Optimization in Hard Rock Mines / B. Afum // Journal of Mineral and Material Science (JMMS). – 2021. – № 2. – P. 1-9. – DOI: 10.54026/JMMS/1030.

126. Babaei, M. A Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators / M. Babaei, R. Hall // Minerals. – 2016. – Vol. 6, no. 2. – P. 48. – DOI: 10.3390/min6020048.

127. Basar, N. L. Rainfall Duration's Impact on Mining Earthmoving Equipment Performance – Case Study at PT. BUMA GEO-AJE, South Kalimantan / N. L. Basar,

Hartono, S. M. Robial // Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan. – 2024. – Vol. 26, no. 2. – P. 77-88. – DOI: 10.15294/jtsp.v26i2.9013.

128. Bi, Q. Digging Trajectory Optimization for Cable Shovel Robotic Excavation Based on a Multi-Objective Genetic Algorithm / Q. Bi, G. Wang, Y. Wang, Z. Yao, R. Hall // Energies. – 2020. – Vol. 13, no. 12. – P. 3118. – DOI: 10.3390/en13123118.

129. Deshmukh, D. A. Assessment of Factors Affecting Productivity of Excavator / D. A. Deshmukh, P. S. Mahatme // International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD). – 2016. – Vol. 3, no. 5. – P. 455-462.

130. Deshmukh, D. A. Factors Affecting Performance of Excavating Equipment: An Overview / D. A. Deshmukh, P. S. Mahatme // International Journal of Science and Research (IJSR). – 2016. – Vol. 5, no. 1. – P. 1250-1253. – DOI: 10.21275/v5i1.nov153044.

131. Dotto, M. Effects of Fragmentation Size Distribution on Truck-Shovel Productivity / M. Dotto, Y. Pourrahimian // Mining Optimization Laboratory (MOL) Annual Report Nine 2017/2018 / ed. by H. Askari-Nasab. – Edmonton, Canada : University of Alberta, 2018. – P. 335-342.

132. Edwards, D. Risk of excavators overturning: Determining horizontal centrifugal force when slewing freely suspended loads / D. Edwards, E. A. Parn, M. C. P. Sing, W. D. Thwala // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2019. – Vol. 26, no. 3. – P. 479-498. – DOI: 10.1108/ECAM-03-2018-0125.

133. Feng, Y. Numerical Simulation and Experiment on Excavating Resistance of an Electric Cable Shovel Based on EDEM-RecurDyn Bidirectional Coupling / Y. Feng, J. Wu, C. Guo, B. Lin // Machines. – 2022. – Vol. 10, no. 12. – P. 1203. – DOI: 10.3390/machines10121203.

134. Frimpong, S. Cable shovel health and longevity and operator efficiency in oil sands excavation / S. Frimpong, Y. Li, K. Awuah-Offei // International Journal of Mining and Mineral Engineering. – 2008. – Vol. 1. – P. 47-61.

135. Hendricks, C. Machine performance monitoring in surface mines / C. Hendricks, J. Peck, M. J. Scoble // Mining Engineering. – 1992. – Vol. 44, no. 3. – P. 243-250. – DOI: 10.1016/0148-9062(92)92885-g.

136. Hendricks, C. Performance monitoring of electric mining shovels / C. Hendricks, M. Scoble, J. Peck // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. – 1989. – Vol. 98. – P. A151-A159.

137. Holt, G. Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors / G. Holt, D. Edwards // International Journal of Productivity and Performance Management. – 2015. – Vol. 64, no. 6. – P. 853-869. – DOI: 10.1108/IJPPM-02-2014-0026.

138. Hughes, K. Using Discrete Event Simulation to Model Excavator Operator Performance / K. Hughes, X. Jiang // Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries. – 2010. – Vol. 20, no. 5. – P. 408-423. – DOI: 10.1002/hfm.20191.

139. Ivanov, S. L. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators / S. L. Ivanov, P. V. Ivanova, S. U. Kuvshinkin // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019", Krasnoyarsk, 25–27 сентября 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. Vol. 1399. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 44070. – DOI 10.1088/1742-6596/1399/4/044070.

140. Jovanović, V. Influential Factors in the Loading of the Axial Bearing of the Slewing Platform Drive in Hydraulic Excavators / V. Jovanović, D. Marinković, D. Janošević, N. Petrović // Tehnički vjesnik – Technical Gazette. – 2023. – Vol. 30, no. 1. – P. 158-168. – DOI: 10.17559/TV-20220425205603.

141. Kahraman, E. Fostering sustainable mining practices in rock blasting: Assessment of blast toe volume prediction using comparative analysis of hybrid ensemble machine learning techniques / E. Kahraman, S. Hosseini, B. O. Taiwo, Y. Fissaha, V. A. Jebutu, A. A. Akinlabi, T. Adachi // Journal of Safety and Sustainability. – 2024. – Vol. 1, no. 2. – P. 75-88. – DOI: 10.1016/j.jsasus.2024.05.001.

142. Kuvshinkin, S. Y. Developing a methodology for estimation of excavation techniques for given operating conditions / S. Y. Kuvshinkin, P. V. Ivanova // IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science : International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019, Saint-Petersburg, 24–27 апреля 2019 года. Vol. 378. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012121. – DOI 10.1088/1755-1315/378/1/012121.

143. Li, Y. Virtual Prototype Modeling and Dynamics Simulation of Cable Shovel for Advance Engineering Analysis / Y. Li, S. Frimpong, Y. Zheng. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. – 208 p.

144. Manyele, S. V. Investigation of Excavator Performance Factors in an Open-Pit Mine Using Loading Cycle Time / S. V. Manyele // Engineering. – 2017. – Vol. 9, no. 7. – P. 599-624. – DOI: 10.4236/eng.2017.97038.

145. Otto, T. J. Improving productivity at an open-pit mine through enhanced short-term mine planning / T. J. Otto, G. C. Lindeque // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2021. – Vol. 121, no. 11. – P. 589-598. – DOI: 10.17159/2411-9717/1710/2021.

146. Pathan, S. Simulation Optimization of Shovel-Truck System in Open-Pit Mines Considering Rockmass Parameters / S. Pathan, A. Pathan, M. Memon // Journal of Advanced Transportation. – 2025. – Vol. 2025. – DOI: 10.1155/atr/7939037.

147. Raidas, M. Study of Blast Fragmentation and Shovel Efficiency in a Surface Coal Mine / M. Raidas // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. – 2025. – Vol. 13, no. 3. – P. 1665-1681. – DOI: 10.22214/ijraset.2025.74315.

148. Raza, M. A. Fatigue failure modeling and life expectancy of the dipper-teeth assembly of a mining shovel / M. A. Raza, S. Frimpong // Engineering Failure Analysis. – 2021. – Vol. 121. – P. 105110. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105110.

149. Rodrigues, A. C. Analysis of factors affecting quality performance of construction equipment / A. C. Rodrigues, A. M. Kamarudeen, A. Sangeetha, A. M. Mathew // Sustainability, Agri, Food and Environmental Research. – 2024. – Vol. 12, no. X. – P. 1-6. – ISSN 0719-3726. – DOI: 10.7770/safer-V12N-art768.

150. Song, K. Finite element-based analysis of blasting rock fragmentation using a digital sieving algorithm / K. Song, X. Wei, X. Wei, Y. Luo, D. Qu, T. Liu, X. Li // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2025. – Vol. 192. – P. 106141. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2025.106141.

151. Surojo Inventory Management and Proactive Maintenance to Enhance Operational Efficiency in Excavators: Focus on Common Spare Parts Issues / Surojo // *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*. – 2025. – Vol. 7, no. 1. – P. 49-58. – DOI: 10.35814/asiimetrik.v7i1.7770.

152. Warren, A. D. Effect of Motion Feedback on Skill Acquisition: Training Performance using an Excavator Simulator / A. D. Warren, R. W. Proctor, P. S. Dunston // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – 2023. – Vol. 67, no. 1. – P. 1329-1330. – DOI: 10.1177/21695067231192701.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт о внедрении результатов диссертации

 <b>ИЗ-КАРТЭКС</b> ИМЕНИ П.Г.КОРОБКОВА	Общество с ограниченной ответственностью "ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова"	
	г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. город Колпино, тер. Ижорский завод, д. 40, к.2, литера ДН 196650, тел.:(812) 647-06-09, факс: (812) 647-74-10	
	iz-kartex@iz-kartex.com	www.uralmash-kartex.ru
	ОКПО 74816237 / ОГРН 1047855158780	ИНН 7817301375 / КПП 781701001

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор

« 12 » 03 2026 г.

А.А. Емельянов



#### АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации  
ШЕШУКОВОЙ Екатерины Игоревны  
по научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Комиссия научно-технического совета в составе:

Председателя: начальника отдела Ленина А.В.,

Членов комиссии: главного конструктора проекта Ермакова А.В.,  
ведущего конструктора Шипилина И.В.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование рациональных траекторий отработки забойного блока угольного разреза для повышения ресурса экскаватора», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, планируются к использованию в производственном процессе ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» при разработке эксплуатационной и ремонтной документации в виде:

- рекомендаций по выбору рационального режима работы карьерного экскаватора учетом траектории копания, плотности и кусковатости горной массы;

- использования коэффициента расходования ресурса приводами подъема и напора, применение которого позволяет обоснованно проводить корректировку периодичности мероприятий технического обслуживания и ремонта единичного экскаватора с учетом условий функционирования.

Алгоритм оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы при заданной траектории отработки уступа позволяет подобрать рациональные режимы работы экскаватора с учетом экскавируемого сырья для реальных условий его функционирования.

Использование результатов диссертационного исследования Шешуковой Е.И. в производственных процессах ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» позволит повысить ресурс экскаватора и его производительность.

**Председатель комиссии**  
Начальник отдела



Ленин А.В.

**Члены комиссии:**  
Главный конструктор проекта



Ермаков А.В.

Ведущий конструктор



Шипилин И.В.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2024665458**

**Программа для оценки кинестатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Шешукова Екатерина Игоревна (RU), Иванов Сергей Леонидович (RU), Пырсенков Иван Игоревич (RU)*

Заявка № **2024663807**  
Дата поступления **18 июня 2024 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **02 июля 2024 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2024665458**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):

2024665458

Дата регистрации: 02.07.2024

Номер и дата поступления заявки:

2024663807 18.06.2024

Дата публикации и номер бюллетеня:

02.07.2024 Бюл. № 7

Контактные реквизиты:

нет

Автор(ы):

Шешукова Екатерина Игоревна (RU),

Иванов Сергей Леонидович (RU),

Пырсенков Иван Игоревич (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего

образования «Санкт-Петербургский горный

университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы

Реферат:

Программа обеспечивает выполнение расчетов по оценке кинетостатических параметров механизма подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его функционирования. Программа может быть внедрена для оценки нагруженности рабочего оборудования для конкретных условий эксплуатации с целью корректировки интенсивности проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту карьерных экскаваторов.

Язык программирования:

Python

Объем программы для ЭВМ:

47 КБ

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Программа для ЭВМ: «Программа для оценки кинетостатических параметров механизмов подъема и напора карьерного экскаватора типа прямая лопата в цикле его работы»

Полный исходный текст программы

```

import math
beta = math.radians(beta_grad)
Tr = h_ust/math.sin(beta)
G_r = m_r * 9.81
G_k = m_k * 9.81
v = l_v + D_v/2
S = Q*k_n/(V_k*k_r*Tr)
S_kop = k_F*V_k*S
F_kop = S_kop*math.sin(beta)
a = []
T = []
h1 = []
l1 = []
l2 = []
h2 = []
lam = []
l_kop = []
l_tr = []
l_k = []
l_p = []
l_F = []
l_r1 = []
l_r2 = []
G_r1 = []
G_r2 = []
h_z = []
h_kan = []
l_kan = []
gamma = []
F_tr = []
G_p = []
F = []
F_ph = []
G_ph = []
C_ph = []
F_nh = []
G_nh = []
C_nh = []
M_p = []
M_n = []
b_kan = []
for i in range(n+1):
    ai = i
    a.append(ai)

```

```

Ti = Tr/n * i
T.append(Ti)
h1i = Ti * math.sin(beta)
h1.append(h1i)
l1i = Ti * math.cos(beta)
l1.append(l1i)
l2i = l_e + l1i
l2.append(l2i)
h2i = abs(h_sp - h1i)
h2.append(h2i)
l_kopi = pow(h2i**2 + l2i**2, 1/2)
l_kop.append(l_kopi)
if (h_sp - h1i) > 0:
    lami = - math.asin(h2i/l_kopi)
    lami = math.degrees(lami)
elif (h_sp - h1i) < 0:
    lami = math.asin(h2i/l_kopi)
    lami = math.degrees(lami)
else:
    lami = 0
lam.append(lami)
l_tri = l_kopi
l_tr.append(l_tri)
l_ki = l_pi = l_Fi = l_kopi - L_kov/2
l_k.append(l_ki)
l_p.append(l_pi)
l_F.append(l_Fi)
l_r1i = (l_kopi - L_kov)/2
l_r1.append(l_r1i)
l_r2i = (L_r - l_r1i*2) / 2
l_r2.append(l_r2i)
G_r1i = (l_r1i * G_r)/L_r
G_r1.append(G_r1i)
G_r2i = (l_r2i * G_r) / L_r
G_r2.append(G_r2i)
h_zi = h_v - h1i
h_z.append(h_zi)
if lami < 0:
    h_kani = h_zi - L_kov/2 * math.sin(math.radians(abs(lami)))
else:
    h_kani = h_zi + L_kov/2 * math.sin(math.radians(abs(lami)))
h_kan.append(h_kani)
if l_Fi*math.cos(math.radians(abs(lami))) > v:
    l_kani = l_Fi*math.cos(math.radians(abs(lami))) - v
    gammai = math.atan(l_kani/h_kani)
else:
    l_kani = v - l_Fi * math.cos(math.radians(abs(lami)))
    gammai = - math.atan(l_kani / h_kani)
l_kan.append(l_kani)
gammmai = math.degrees(gammmai)
gamma.append(gammmai)
G_pi = Ti * S * V_k * ro * 9.81 # вес породы

```

```

G_p.append(G_pi)
if lami < 0 and abs(lami) > (90-beta_grad):
    F_tri = (S_kop * math.cos(math.radians(180 - beta_grad - abs(lami))) *
            math.cos(math.radians(beta_grad + abs(lami) - 90)) * f * math.sin(beta))
elif lami < 0 and abs(lami) < (90-beta_grad):
    F_tri = (S_kop * math.cos(math.radians(beta_grad + abs(lami))) *
            math.cos(math.radians(90 - beta_grad - abs(lami))) * f * math.sin(beta))
else:
    F_tri = (S_kop * math.cos(math.radians(beta_grad - lami)) *
            math.cos(math.radians(90 - beta_grad + lami)) * f * math.sin(beta))
F_tr.append(F_tri)
if (l_Fi*math.cos(math.radians(lami))) > v and lami < 0:
    A = (F_kop * l_kopi + F_tri*l_tri)
    B = math.cos(math.radians(lami)) * (G_pi*l_pi + G_k*l_ki + G_r1i*l_r1i - G_r2i*l_r2i)
    C = math.cos(math.radians((abs(gammai)+abs(lami))))
    Fi = (A * math.sin(math.radians(beta_grad + abs(lami))) + B) * k_D / (l_Fi * C)
elif (l_Fi*math.cos(math.radians(lami))) > v and lami > 0:
    A = (F_kop * l_kopi + F_tri * l_tri)
    B = math.cos(math.radians(lami)) * (G_pi * l_pi + G_k * l_ki + G_r1i * l_r1i - G_r2i * l_r2i)
    C = math.cos(math.radians((abs(gammai) - abs(lami))))
    Fi = (A * math.sin(math.radians(beta_grad - abs(lami))) + B) * k_D / (l_Fi * C)
elif (l_Fi*math.cos(math.radians(lami))) <= v and lami < 0:
    A = (F_kop * l_kopi + F_tri * l_tri)
    B = math.cos(math.radians(lami)) * (G_pi * l_pi + G_k * l_ki + G_r1i * l_r1i - G_r2i * l_r2i)
    C = math.cos(math.radians(abs(lami) - abs(gammai)))
    Fi = (A * math.sin(math.radians(beta_grad + abs(lami))) + B) * k_D / (l_Fi * C)
else:
    A = (F_kop * l_kopi + F_tri * l_tri)
    B = math.cos(math.radians(lami)) * (G_pi * l_pi + G_k * l_ki + G_r1i * l_r1i - G_r2i * l_r2i)
    C = math.cos(math.radians(180 - abs(lami) - abs(gammai)))
    Fi = (A * math.sin(math.radians(beta_grad - abs(lami))) + B) * k_D / (l_Fi * C)
Fi = round(Fi)
F.append(Fi)
F_phi = Fi * math.cos(math.radians(gammai - lami))
F_phi = round(F_phi)
F_ph.append(F_phi)
G_phi = (-(G_pi + G_k + G_r1i - G_r2i)) * math.cos(math.radians(abs(lami))) - (F_kop + F_tri) *
math.cos(math.radians(90 - beta_grad + lami))
G_phi = round(G_phi)
G_ph.append(G_phi)
C_phi = F_phi + G_phi
C_phi = round(C_phi)
C_ph.append(C_phi)
F_nhi = Fi * math.cos(math.radians(90 + lami - gammai))
F_nhi = round(F_nhi)
F_nh.append(F_nhi)
if lami >= 0:
    G_nhi = (G_pi + G_k + G_r1i - G_r2i) * math.sin(math.radians(abs(lami))) + (F_kop + F_tri) *
math.cos(math.radians(beta_grad - lami))
else:
    G_nhi = (-(G_pi + G_k + G_r1i - G_r2i)) * math.sin(math.radians(abs(lami))) + (F_kop + F_tri) *
math.cos(math.radians(beta_grad - lami))

```

```

G_nhi = round(G_nhi)
G_nh.append(G_nhi)
C_nhi = F_nhi + G_nhi
C_nhi = round(C_nhi)
C_nh.append(C_nhi)
M_pi = (Fi*R_p)/(I_p*K_p)
M_ni = (C_nhi*R_n)/(I_n*K_n)
M_pi = round(M_pi, 2)
M_p.append(M_pi)
M_ni = round(M_ni, 2)
M_n.append(M_ni)
b_kani = pow(h_kani**2 + l_kani**2, 1/2)
b_kan.append(b_kani)
v_p = (b_kan[0]-b_kan[n])/t1
v_p = round(v_p, 3)
v_n = (l_k[n]-l_k[0])/t1
v_n = round(v_n, 3)
a0 = 'Точка'
F0 = 'F, H'
F_ph0 = 'F_ph, H'
G_ph0 = 'G_ph, H'
C_ph0 = 'C_ph, H'
M_p0 = 'M_ph, Hм'
F_nh0 = 'F_nh, H'
G_nh0 = 'G_nh, H'
C_nh0 = 'C_nh, H'
M_n0 = 'M_nh, Hм'
a = [a0] + a
F = [F0] + F
F_ph = [F_ph0] + F_ph
G_ph = [G_ph0] + G_ph
C_ph = [C_ph0] + C_ph
F_nh = [F_nh0] + F_nh
G_nh = [G_nh0] + G_nh
C_nh = [C_nh0] + C_nh
M_p = [M_p0] + M_p
M_n = [M_n0] + M_n
print('Усилие в канате подъемной лебедки')
matrix1 = [
    a,
    F
]
column_widths = [max(len(str(row[i])) for row in matrix1) for i in range(len(matrix1[0]))]
for row in matrix1:
    formatted_row = " " + " ".join("{:{}".format(element, column_widths[i]) for i, element in
enumerate(row)) + " "
    print(formatted_row)
    print("+{ }+ ".format("+".join("-" * (width + 2) for width in column_widths)))
print("")
print('Изменение подъемных характеристик в цикле')
matrix2 = [
    a,

```

```

F_ph,
G_ph,
C_ph,
M_p
]
column_widths = [max(len(str(row[i])) for row in matrix2) for i in range(len(matrix2[0]))]
for row in matrix2:
    formatted_row = " " + " ".join("{:{}".format(element, column_widths[i]) for i, element in
enumerate(row)) + " "
    print(formatted_row)
    print("+{ }+".format("+".join("-" * (width + 2) for width in column_widths)))
print('F_ph - подъемная составляющая усилия в канате, создаваемого лебедкой подъема, для
преодоления сопротивлений;')
print('G_ph - подъемная составляющая суммарных усилий сопротивления '
'(весовые составляющие, силы сопротивления копанию, сила трения);')
print('C_ph - подъемная результирующая движущих сил и сопротивлений;')
print('M_ph - значение мгновенного момента на приводе подъема.')
print("")
print('Изменение напорных характеристик в цикле')
matrix3 = [
    a,
    F_nh,
    G_nh,
    C_nh,
    M_n
]
column_widths = [max(len(str(row[i])) for row in matrix3) for i in range(len(matrix3[0]))]
for row in matrix3:
    formatted_row = " " + " ".join("{:{}".format(element, column_widths[i]) for i, element in
enumerate(row)) + " "
    print(formatted_row)
    print("+{ }+".format("+".join("-" * (width + 2) for width in column_widths)))
print('F_nh - напорная составляющая усилия в канате, создаваемого лебедкой подъема, для
преодоления сопротивлений;')
print('G_nh - напорная составляющая суммарных усилий сопротивления '
'(весовые составляющие, силы сопротивления копанию, сила трения);')
print('C_nh - напорная результирующая движущих сил и сопротивлений;')
print('M_nh - значение мгновенного момента на приводе напора.')
print("")
print('Скорость подъема ковша:', v_p, 'м/с')
print('Скорость движения рукояти:', v_n, 'м/с')

```