

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

*На правах рукописи*

Шишлянников Дмитрий Игоревич



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ  
КАК ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

05.05.06 – Горные машины

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант  
доктор технических наук, профессор  
Габов В. В.

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>17</b>
1.1 Анализ пластов калийных руд как объектов разрушения .....	17
1.2 Комбайновые комплексы калийных рудников .....	21
1.2.1 Разработка калийных пластов с использованием узкозахватных комбайнов.....	21
1.2.2 Проходческо-очистные комбайны калийных рудников .....	25
1.3 Анализ конструктивных особенностей проходческо-очистных комбайнов «Урал».....	37
1.3.1 Породоразрушающие исполнительные органы и погрузочное оборудование комбайнов «Урал-20Р» .....	37
1.3.2 Резцы комбайнов калийных рудников.....	44
1.3.3 Системы индикации, управления и защиты проходческо-очистных комбайнов калийных рудников .....	50
1.4 Условия эксплуатации и нагрузки приводов комбайнов калийных рудников при их функционировании.....	53
1.4.1 Горнотехнические и горно-геологические условия эксплуатации проходческо-очистных комбайнов.....	53
1.4.2 Общие сведения о нагруженности приводов комбайнов, функционирующих в условиях калийных рудников.....	57
1.5 Анализ статистики отказов и систем технического обслуживания и ремонта комбайнов калийных рудников .....	60
1.6 Выводы по главе 1 .....	63
<b>ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА</b>	
<b>РАЗРУШЕНИЯ КАЛИЙНЫХ РУД РЕЗЦАМИ ГОРНЫХ</b>	
<b>КОМБАЙНОВ.....</b>	<b>66</b>
2.1 Обзор теорий прочности твердых тел.....	66
2.2 Анализ представлений о процессе разрушения калийной руды резцами горных комбайнов.....	70

2.2.1 Анализ положений теории разрушения горных пород резанием .....	70
2.2.2 Анализ процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийного массива одиночным резцом.....	77
2.3 Влияние схем резания калийной руды на процесс формирования последовательных элементарных сколов и нагруженность резцов.....	83
2.3.1 Общие сведения о влиянии схем резания на процесс разрушения калийной руды резцами горных комбайнов.....	83
2.3.2 Разрушение калийной руды перекрестными резами.....	89
2.4 Обоснование рациональных параметров работы исполнительных органов и рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников .....	92
2.4.1 Методология определения рациональных параметров планетарно- дисковых исполнительных органов калийных комбайнов.....	92
2.4.2 Методология определения рациональных параметров шнековых грузчиков проходческо-очистных комбайнов .....	98
2.4.3 Методология определения рациональных параметров скребковых конвейеров-перегрузжателей проходческо-очистных комбайнов .....	104
2.5 Методология оценки эффективности функционирования проходческо- очистных комбайнов в условиях калийных рудников .....	108
2.5.1 Оценка энергоэффективности функционирования проходческо- очистных комбайнов в условиях калийных рудников .....	108
2.5.2 Оценка технологического уровня организации добычных работ в очистной камере .....	110
2.5.3 Анализ показателей эффективности работы комбайнов .....	111
2.6 Выводы по главе 2.....	113
<b>ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ БЛОКОВ КАЛИЙНОЙ РУДЫ ОДИНОЧНЫМ РЕЗЦОМ .....</b>	<b>115</b>
3.1 Теоретическое описание процесса разрушения калийных руд резанием .....	115
3.2 Компьютерное моделирование процесса разрушения калийной руды одиночным резцом .....	121

3.3 Проверка результатов теоретических исследований процесса отделения крупных элементарных сколов от калийного массива при разрушении резанием .....	125
3.4 Общие положения методики исследований .....	126
3.5 Лабораторная стендовая установка для исследования процесса отделения последовательных крупных сколов при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом .....	127
3.6 Методика экспериментальных исследований процесса отделения последовательных крупных сколов при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом .....	133
3.6.1 Исходные данные и измеряемые параметры.....	133
3.6.2 Порядок проведения лабораторных экспериментов .....	134
3.6.3 Методика обработки результатов экспериментов .....	135
3.7 Результаты экспериментальных исследований.....	137
3.7.1 Результаты экспериментальных исследований процесса отделения крупных сколов от калийного массива при разрушении резами с выровненной поверхности .....	137
3.7.2 Результаты экспериментальных исследований процесса отделения крупных сколов при разрушении калийного массива шахматными резами .....	141
3.7.3 Результаты экспериментальных исследований процесса отделения крупных сколов при разрушении калийного массива перекрестными резами .....	144
3.8 Сопоставление полученных результатов с результатами известных, ранее выполненных исследований .....	150
3.9 Выводы по главе 3.....	151
<b>ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК ПРИВОДОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБАЙНОВ В УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ.....</b>	<b>153</b>
4.1 Общие положения методики исследований .....	153



4.2 Инструментарий экспериментальных исследований – программно-регистрационный комплекс «ВАТУР» .....	155
4.2.1 Структура программно-регистрационного комплекса «ВАТУР» .....	155
4.2.2 Порядок работы комплекса «ВАТУР» .....	157
4.3 Порядок выполнения экспериментальных исследований .....	160
4.4 Результаты исследований процесса формирования нагрузок на приводы комбайнов «Урал-20Р-11» в реальных условиях функционирования .....	163
4.4.1 Нагруженность приводов комбайнов «Урал-20Р-11» при работе полным забоем .....	163
4.4.2 Нагруженность приводов комбайнов «Урал-20Р-11» при отработке забоя неполным сечением исполнительного органа .....	171
4.5 Результаты экспериментальных исследований по оценке гранулометрического состава калийной руды добываемой проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р» .....	174
4.6 Оценка эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» в условиях калийных рудников .....	179
4.7 Выводы по главе 4 .....	182
<b>ГЛАВА 5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ КОМБАЙНОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ КАК ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ .....</b>	<b>185</b>
5.1 Совершенствование породоразрушающих исполнительных органов комбайнов калийных рудников .....	185
5.2 Выбор энергоэффективных режимов работы комбайнов калийных рудников .....	188
5.2.1 Обоснование энергоэффективных режимов работы планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов калийных рудников .....	188
5.2.2 Алгоритм управления приводами планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов калийных рудников .....	191
5.3 Разработка пространственных планетарных исполнительных органов комбайнов, разрушающих калийный массив перекрестными резами .....	197

5.4 Обоснование параметров плоского планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна для добычи калийных руд .....	204
5.4.1 Теоретические основы конструирования плоских планетарно-дисковых исполнительных органов .....	204
5.4.2 Обоснование конструкции и параметров плоского планетарно-дискового исполнительного органа комбайна для добычи калийных руд ...	210
5.5 Совершенствование резцового инструмента проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд.....	216
5.5.1 Разработка самоустанавливающихся резцов.....	216
5.5.2 Разработка составного резца со сменной головной частью .....	220
5.6 Выводы по главе 5 .....	223
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>225</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>229</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>238</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики комплекса «ВАТУР» .....</b>	<b>264</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Форма отчета по результатам эксперимента .....</b>	<b>266</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Форма журнала экспериментального исследования .....</b>	<b>268</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении результатов диссертации ООО «ЕвроХим-Проект».....</b>	<b>269</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт о внедрении результатов диссертации ФГБУН «Горный институт Уро РАН» .....</b>	<b>270</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт о внедрении результатов диссертации ООО «НПП «РОС».....</b>	<b>271</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс .....</b>	<b>272</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ З Письмо об использовании результатов диссертации «T Machinery a.s.» .....</b>	<b>273</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Анализ известных геологических данных показывает, что около половины мировых запасов калийных руд приходится на месторождения, расположенные на территории Российской Федерации и Республики Беларусь. Разработка калийных месторождений России ведётся подземным способом с использованием механизированных комбайновых комплексов, в состав которых входят проходческо-очистные комбайны, оснащенные, как правило, буровыми исполнительными органами с резцовым породоразрушающим инструментом. При работе данных комбайнов значительная часть затрачиваемой на добычу энергии расходуется на отделение калийной руды от массива и на погрузку в средства самоходного транспорта.

В настоящее время остро стоят вопросы повышения эффективности добычи калийной руды без увеличения энерговооруженности проходческо-очистных комбайнов при улучшении качества и снижении потерь добываемой руды. Однако это невозможно без применения в процессе добычи калийных руд энергоэффективных проходческо-очистных комбайнов с инновационными исполнительными органами, параметры которых согласованы с разветвлёнными электромеханическими трансмиссиями комбайнов и обеспечивают рациональные режимы работы по критерию удельных энергозатрат при функционировании комбайна, что является актуальной проблемой, решение которой представляет как научный, так и практический интерес.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в изучение процесса резания углей, калийных руд и горных пород внесли Л. И. Барон, А. И. Берон, В. А. Бреннер, Ю. А. Ветров, В. Н. Гетопанов, В. П. Горячкин, В. З. Деветьев, А. Б. Жабин, С. К. Кабиев, Н. М. Качурин, В. З. Меламед, Е. З. Позин, А. В. Поляков, М. М. Протодьяконов, А. Е. Пушкарёв, Д. М. Светличный, В. В. Семёнов, М. И. Слободкин, А. Б. Соболев, В. И. Солод, В. В. Тон, И. Г. Шмакин и др.

Существенный научный и практический интерес представляют работы Л. И. Андреевой, В. И. Болобова, Э. Ю. Вороновой, В. В. Габова, А. А. Гаврикова, В. Г. Зильбершмидта, С. Л. Иванова, Л. И. Кантовича, М. Д. Коломийцева, Н. Г. Крапивина, В. Л. Пинского, Г. Д. Поляниной, В. Я. Прушака, В. В. Савицкого, Л. И. Старкова, Ю. В. Старовойтова, Н. И. Сысоева, Г. Д. Трифанова, Н. В. Чекмасова, Г. Ш. Хазановича, Н. А. Харламовой.

Исследования указанных авторов посвящены оценке работоспособности и эффективности применения породоразрушающих инструментов и режимов работы исполнительных органов горных машин, надежности их приводов.

Однако разработка и внедрение нового поколения перспективных породоразрушающих исполнительных органов, обеспечивающих снижение удельного расхода энергии, уменьшение количества мелких труднообогатимых классов при добыче калийной руды и увеличение производительности комбайнов, сдерживаются отсутствием достаточного объема результатов экспериментальных и теоретических исследований процесса отделения от массива последовательных элементарных сколов, составляющих срез, при разрушении калийных руд резцами комбайнов.

Таким образом, выявление закономерностей сложных процессов разрушения калийной руды резанием как последовательности образования элементарных сколов, составляющих срез, погрузки и транспортирования отбитой руды заданного гранулометрического состава для методологического и теоретического обоснования направлений совершенствования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных систем функционирования, требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований в рамках решения **научной проблемы** разработки научной методологии формирования и эксплуатации проходческо-очистных комбайнов как энергоэффективных объектов калийных рудников, имеющей важное значение для горнодобывающей отрасли России.

**Цель работы** заключается в выявлении связей и закономерностей процессов отделения последовательных элементарных сколов калийной руды от массива при разрушении резанием, погрузки и транспортирования руды исполнительными органами комбайнов для разработки научно-методологических основ формирования конструктивных и схемных решений проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования в реальных условиях эксплуатации, что вносит значительный вклад в развитие горной отрасли страны.

**Идея работы** заключается в формировании на поверхности забоя перекрестно расположенных областей локализации наведенных ослаблений в виде концентраторов напряжений и детерминированно расположенных выступов между ними, определяющих заданный гранулометрический состав отбиваемой руды, что обуславливает снижение удельных затрат энергии на образование и ветвление микротрещин и уменьшение объема пластического деформирования руды в предрезцовом пространстве при отделении от массива последовательных элементарных сколов, составляющих срез, при заданном алгоритме выбора режимов работы приводов проходческо-очистного комбайна.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

- анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований и опыта эксплуатации комбайнов при добыче калийных руд;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований процесса разрушения калийного массива одиночным резцом и установление закономерностей процесса отделения последовательных элементарных сколов, составляющих срез, от калийного массива при разрушении резцами проходческо-очистных комбайнов;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния режимных параметров процесса разрушения калийного

массива резанием на величину и характер изменения нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент и приводы проходческо-очистных комбайнов;

– проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке эффективности работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников;

– проведение теоретических и экспериментальных исследований по выявлению закономерностей процесса формирования гранулометрического состава калийных руд, добываемых с использованием проходческо-очистных комбайнов;

– разработка методологии выбора энергоэффективных режимов работы и совершенствования оборудования проходческо-очистных комбайнов с учетом установленных закономерностей процесса отделения от калийного массива последовательных элементарных сколов, составляющих срез;

– разработка алгоритма управления приводами проходческо-очистных комбайнов, обеспечивающего снижение удельных затрат энергии на разрушение калийного массива резцами планетарно-дисковых исполнительных органов;

– обоснование новых технических решений по совершенствованию рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов, направленных на повышение эффективности процесса разрушения калийных руд.

### **Научная новизна исследования**

1. Обосновано, что создание на поверхности разрушаемого забоя чередующихся регулярных выступов и зон локализации наведенных трещин и ослаблений достигается применением перекрестной схемы резания, обеспечивающей снижение удельных затрат энергии и уменьшение количества мелких труднообогатимых классов в добываемой калийной руде по сравнению с шахматной схемой резания.

2. Установлено закономерное изменение нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент и приводы проходческо-очистных

комбайнов, при реализации процесса разрушения калийного массива резанием.

3. Обоснованы показатели оценки эффективности применения комбайнов калийных рудников: коэффициенты производительной работы и энергоэффективности, разработана методология их мониторинга применительно к проходческо-очистным комбайнам калийных рудников.

4. Разработана методология обеспечения минимизации удельных затрат энергии на разрушение калийного массива резцами планетарно-дисковых исполнительных органов посредством активного управления приводными двигателями проходческо-очистных комбайнов.

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

1. Определён рациональный диапазон отношения шага резания к средней толщине стружки  $t/h$ , обеспечивающий снижение удельных затрат энергии и уменьшение количества труднообогатимых классов в добываемой калийной руде при разрушении массива резцами проходческо-очистных комбайнов.

2. Установлена возможность влияния на изменение силовых параметров, энергетических показателей и гранулометрический состав продуктов отбойки в процессе разрушения калийной руды резанием формированием геометрических параметров последовательных элементарных сколов, составляющих срез.

3. Разработана методика исследования процесса отделения последовательных элементарных сколов от блоков калийной руды при резании полноразмерным одиночным резцом и изготовлен лабораторный стенд для ее реализации.

4. Показано, что в заданных условиях функционирования комбайнов «Урал-20Р-11» минимум удельных затрат энергии на добычу руды и минимальное количество мелких труднообогатимых классов в добываемой руде обеспечивается в диапазонах производительности обследуемых комбайнов  $Q = 6,0 \dots 6,5$  т/мин.

5. Предложены перспективные конструкции исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов, осуществляющих разрушение калийного массива с использованием перекрестной схемы резания.

6. Результаты диссертационной работы приняты к использованию в компании *T-Machinery a.s.* (Чешская Республика) при проектировании исполнительных органов и погрузочного оборудования проходческо-очистного комбайна *MB 900 CM*; использованы в ООО «ЕвроХим-Проект» (г. Пермь) при разработке технологических решений, направленных на улучшение качества и снижение затрат на обогащение калийной руды, добываемой механизированным способом; эффективность предложенных технических решений подтверждена актами внедрения результатов в ООО «НПП «РОС» (г. Пермь) и ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр «Горный институт УрО РАН» (г. Пермь).

7. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело» специализация «Горные машины и оборудование».

### **Методология и методы исследования**

В работе использован комплексный метод исследований, включающий: анализ основных положений механики образования и развития трещин; экспериментальные исследования процесса резания калийной руды на лабораторном стенде одиночным полноразмерным резцом; экспериментальные исследования по оценке нагруженности приводов рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов в условиях калийных рудников. Методологическую основу исследования составляют аналитические расчеты, методы математической статистики и спектрального анализа.



### **Соответствие паспорту специальности**

Тема исследования соответствует п. 3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов», п. 7 «Разработка научных основ создания средств комплексной механизации производственных процессов с применением систем горных машин и оборудования» области исследований паспорта специальности 05.05.06 – Горные машины.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Применение перекрёстной схемы резания обеспечивает снижение удельных затрат энергии в процессе разрушения калийного массива до 15 % и уменьшение до 42 % массовой доли труднообогатимых классов в добываемой руде по сравнению с шахматной схемой резания, что достигается формированием заданных геометрических параметров последовательных элементарных сколов, составляющих срез, посредством формирования на поверхности разрушаемого забоя чередующихся резов с зонами ослаблений и детерминированно расположенных выступов, при этом рациональное отношение шага резания к величине заглубления резца в калийный массив при использовании перекрестной схемы резания находится в диапазоне  $t/h_3 = 5...7$ .

2. Применение перекрестной схемы резания калийного массива обеспечивает снижение до 34 % средних значений и до 16 % средних квадратичных отклонений нагрузок на резцы по сравнению с шахматной схемой резания, при этом реализуется устойчивая чередующаяся регулярность образования крупных сформированных сколов заданной формы, частота реализации которых прямо пропорциональна скорости резания и обратно пропорциональна шагу резания, и мелких промежуточных сколов, частота реализации которых прямо пропорциональна скорости резания и обратно пропорциональна величине заглубления резца в массив относительно поперечных резов.

3. Эффективность функционирования проходческо-очистных комбайнов в условиях калийных рудников необходимо оценивать по двум комплексным показателям: коэффициенту производительной работы и коэффициенту энергоэффективности, при этом первый определяется путем отнесения времени производительной работы комбайна к разности времени эксплуатации и соответствующих временных затрат на восстановление работоспособного состояния, а второй – отношением базовых удельных затрат энергии на тонну добытой комбайном руды к соответствующей фактической величине.

4. Разработанные методология и алгоритм управления работой планетарно-дисковых исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников позволяют при неизменной частоте относительного вращения резцовых дисков устанавливать частоту переносного вращения резцовых дисков исполнительных органов по критерию обеспечения минимума удельных затрат энергии и осуществлять поддержание рационального отношения шага резания к толщине стружки в диапазоне  $t/h = 2 \dots 4$ .

**Степень достоверности и апробация результатов работы** подтверждается результатами экспериментальных исследований процесса резания калийной руды одиночным полноразмерным резцом, выполненных на лабораторном стенде, достаточным объемом экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения исследований при работе проходческо-очистных комбайнов в реальных условиях эксплуатации. Основные выводы теоретических исследований согласуются с общепризнанными представлениями о формировании нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент и приводы проходческо-очистных комбайнов при работе в условиях калийных рудников. Сходимость экспериментальных данных с расчётными составляет 90 %, относительная ошибка экспериментальных данных не превышает 10 %.

Теория построена на известных, проверяемых данных, фактах, в том числе для предельных случаев, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертационной работы. Использовано сравнение авторских данных и результатов исследований по рассматриваемой тематике, полученных ранее. Экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании.

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и получили положительную оценку на международных и всероссийских конференциях: международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика» (г. Пермь, 2014, 2015, 2018, 2019 гг.), международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В. Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2015, 2016, 2020, 2021 гг.), международная конференция «Социально-экономические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2019, 2020 гг.), международный научный симпозиум «Неделя горняка» (г. Москва, 2015, 2017 гг.), международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2020 г.), всероссийская конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2014, 2019, 2020 гг.).

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в следующем: результаты диссертационной работы, в том числе постановка задач, получение исходных данных, разработанные методики экспериментальных исследований и лабораторный стенд для проведения исследований процесса разрушения блоков калийной руды одиночным резцом, основные научные результаты, выводы и рекомендации принадлежат автору. Способ управления комбайнами с планетарно-дисковыми исполнительными органами, варианты исполнительных органов комбайнов,

реализующих перекрестную схему разрушения калийного массива, разработаны под руководством и при непосредственном участии автора. Организация внедрения результатов работы осуществлена в равной степени с соавторами.

**Публикации.** Основные научные результаты опубликованы в 32 печатных работах, в том числе в 20 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 (по специальности 05.05.06 – Горные машины), в 12 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования *Scopus* и *Web of Science*; получено 9 патентов.

За последние пять лет опубликовано 19 статей и тезисов в материалах международных конференций. Подготовлено 1 учебное пособие и 2 методических указания к лабораторным работам.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложена на 273 страницах, содержит 112 рисунков, 16 таблиц, библиографический список из 215 наименований и 8 приложений.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1.1 Анализ пластов калийных руд как объектов разрушения

Калийные руды являются осадочными горными породами, образованными калиевыми и калиево-магниевыми минералами, и залегают в виде линз и пластов мощностью в несколько десятков метров. В мире известно свыше 40 бассейнов калийно-магниевых солей, около 20 из которых разрабатываются в настоящее время. Большая часть разведанных запасов калийной руды приходится на месторождения Российской Федерации (34,5 %), Республики Беларусь (9 %) и Канады (38 %) [11, 115].

На территории Российской Федерации калийная руда добывается на Верхнекамском (Пермский край), Гремячинском (Волгоградская обл.) и Нивенском (Калининградская обл.) месторождениях. Продуктивные пласты данных месторождений характеризуются относительной простотой минерального состава. Главные породообразующие минералы – галит, сильвин и карналлит – обычно встречаются парами: галит – сильвин (сильвинитовая руда), галит – карналлит (карналлитовая руда). Значительно реже встречаются смешанные многокомпонентные руды. Плотность соляных пород изменяется в пределах от 1,8 до 2,4 т/м<sup>3</sup>. Пласты характеризуются полосчато-слоистым строением и представляют собой чередование соляных слоёв и галопелитовых прослоек.

Крупнейшим месторождением калийных руд на территории Российской Федерации является Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВМКМС). Месторождение имеет исключительно благоприятные горно-геологические условия, величина разведанных запасов более 3,6 млрд т. Продуктивные отложения сильвин-галит-карналлитового состава располагаются на глубине 250...450 м. Характерными для спокойного в общем залегания пластов месторождения являются куполообразные поднятия и впадины соляной толщи, все пласты имеют складки

тектонического происхождения с амплитудой до 8...10 м. Применяется камерная система разработки продуктивных пластов с повсеместным использованием комплектов горного оборудования – механизированных комбайновых комплексов [118].

Основные продуктивные пласты «Красный-II» и «АБ» имеют продольные углы наклона до 15°, поперечные – до 10°. Вынимаемая мощность пластов изменяется от 3,5 до 7 м. Структура руд – неравномерно-зернистая, с преобладанием крупнозернистой (5...8 мм) для каменной соли и мелко- и среднезернистой (0,5...4,5 мм) для сильвинитов и карналлитов. Кристаллы слагающих минералов ориентированы хаотично. Трещиноватость, характерная для угольных пластов, практически отсутствует. Массовая доля несоляной составляющей руд – сульфатов (гипс, ангидрит), карбонатов (кальцит, доломит, магнезит) и алюмосиликатов (слюда, полевой шпат) – составляет от 2 до 15 %. Некоторые физико-механические свойства калийных руд пласта «Красный-II» приведены в таблице 1.1 [54, 84].

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства калийной руды пласта «Красный-II» Верхнекамского калийного месторождения

Наименование параметра	Значение
Предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	33,0...44,8
Предел прочности на растяжение $\sigma_{раст}$ , МПа	0,62...0,65
Коэффициент крепости $f$ по шкале проф. М. М. Протодьяконова	3,0...4,4
Модуль Юнга $E$ , ГПа	11...22
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,16...0,44
Плотность сильвинитовой руды в массиве $\gamma_k$ , т/м <sup>3</sup>	2,1...2,4
Насыпная плотность руды при машинной выемке $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	1,28...1,34
Сопrotивляемость сильвинитовой руды резанию $A_p$ , кН/м	370...490
Абразивность сильвинитовой руды $a_{кр}$ , мг/км	34...42
Коэффициент трения при контакте резца с разрушаемым массивом $\mu$	0,30...0,45
Угол естественного откоса руды в покое $\rho_p$ , град	35...40

Разрушение калийных руд, как правило, имеет межкристаллитный характер. Зародышами разрушения являются локализованные по границам зерен газовой-жидкие флюидные включения размером 0,1...2,0 мкм [125]. По категориям разрушаемости калийные руды относятся к весьма крепким породам [168].

В качестве показателя, положенного в основу методик определения силовых и энергетических параметров процесса разрушения калийного массива резанием, принята сопротивляемость калийных руд резанию  $A_p$ . Средние значения сопротивляемости резанию и абразивности некоторых калийных пластов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сопротивляемость резанию и абразивность пород калийных пластов [69]

Месторождение, рудоуправление	Сопротивляемость резанию $A_p$ , кН/м		Абразивность, $a_{кр}$ , мг/км	
	Пласты			
Верхнекамское	Красный-II	АБ	Красный-II	АБ
БКПРУ-2	444	433	37,6	37,1
БКПРУ-4	430	428	36,6	35,9
СКРУ-1	490	470	41,9	39,3
СКРУ-2, 3	485	458	41,6	39,1
Старобинское	II калийный горизонт	III калийный горизонт	II калийный горизонт	III калийный горизонт
РУ-1	390	340	35,3	35,4
РУ-2	338	340	34,9	35,7
РУ-3	335	330	35,3	36,0
РУ-4	373	330	35,0	36,1

Величина сопротивляемости калийной руды резанию  $A_p$  связана с пределами прочности руды на сжатие  $\sigma_{сж}$  и сдвиг  $\tau$  эмпирическими зависимостями (1.1) и (1.2) соответственно

$$\sigma_{сж} = 0,09A_p; \quad (1.1)$$

$$\tau = 0,33\sigma_{сж}, \quad (1.2)$$

где  $A_p$  – сопротивляемость калийной руды резанию, кН/м;  $\tau$  – предел прочности калийной руды на сдвиг, МПа;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности калийной руды на сжатие, МПа [136].

Сопротивляемость резанию сильвинитовой руды пласта «Красный-II» ВМКМС составляет  $A_p = 370...490$  кН/м, что превышает значения данного показателя для углей в 3...3,5 раза [10, 19]. Калийные руды ВМКМС относятся к группе наименее абразивных горных пород, однако характеризуются высокой вязкостью, что существенно увеличивает удельные затраты энергии при их механизированной добыче [36, 38, 77]. При подземной добыче калийных руд на месторождениях Российской Федерации используется камерная система разработки продуктивных пластов, где отжим пород практически отсутствует, что является неблагоприятным фактором для работы добычных комбайнов.

Доказано, что сопротивляемость резанию  $A_p$  и абразивность  $a_{кр}$  руды для конкретного участка пласта определяются с учетом содержания в пласте отдельных компонентов по выражениям (1.3) и (1.4) [69]

$$A_p = \left( 340 + \frac{320 + \frac{4000}{M_{KCl} + 8}}{M_{н.о} + 0,8} \right) K_p = \left( 340 + \frac{320 + \frac{4000}{(100 - M_{NaCl}) + 8}}{M_{н.о} + 0,8} \right) K_p; \quad (1.3)$$

$$a_{кр} = 0,09A_p - 0,1M_{KCl} + 1,27M_{н.о}, \quad (1.4)$$

где  $M_{KCl}$ ,  $M_{NaCl}$ ,  $M_{н.о}$  – массовое содержание  $KCl$ ,  $NaCl$  и нерастворимого остатка в разрушаемой руде, соответственно, %;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий реологические свойства руды, определяется выражением (1.5)

$$K_p = \frac{0,48}{0,42 + \frac{63 - 0,63M_{KCl}}{318 - M_{KCl}}}. \quad (1.5)$$

Массовое содержание  $M_{KCl}$ ,  $M_{NaCl}$ ,  $M_{н.о}$  принимают по данным геологической службы рудника.



Таким образом, продуктивные пласты калийно-магниевых руд представляют собой плотные кристаллические массивы с включением несолевых минералов, разрушение которых наиболее рационально осуществлять добычными комбайнами с исполнительными органами режущего типа.

Добываемая механизированным способом калийная руда характеризуется гранулометрическим составом, качество которого определяется содержанием пылевидных частиц руды крупностью менее 0,25 мм. Высокое содержание руды класса «-0,25 мм» обуславливает необходимость применения усложненных схем обогащения, что существенно увеличивает издержки предприятия. Доказано, что увеличение массовой доли частиц класса «-0,25 мм» в обогащаемой руде на 1 % определяет снижение извлечения полезного компонента в среднем на 0,1...0,2 %, что снижает прибыль горнодобывающего предприятия [126].

Эффективность процесса разрушения калийного массива оценивается по величине удельных энергозатрат процесса резания и количеству труднообогатимых классов «-0,25 мм» в добываемой руде. Минимизация данных показателей является актуальной задачей для горнодобывающих предприятий калийной отрасли.

## **1.2 Комбайновые комплексы калийных рудников**

### **1.2.1 Разработка калийных пластов с использованием узкозахватных комбайнов**

Добыча калийных руд подземным способом осуществляется с использованием следующих систем разработки продуктивных пластов: камерной, камерно-столбовой и длинными очистными забоями с обрушением пород кровли. Механизация технологических процессов отделения руды от массива, погрузки руды в средства транспорта и возведения крепи обеспечивается применением механизированных

комбайновых комплексов, где в качестве добычных машин используются узкозахватные очистные и проходческо-очистные комбайны с исполнительными органами режущего типа [36, 39, 37].

Основным преимуществом системы разработки калийных месторождений длинными очистными забоями являются высокая степень извлечения руды (до 95 %) и, соответственно, малые потери полезного ископаемого в целиках. Очистные комбайны работают в зоне отжима, что существенно уменьшает удельные затраты энергии на отделение руды от массива. Отработка маломощных пластов характеризуется незначительным разубоживанием руды. Однако использование данной системы отработки продуктивных калийных пластов возможно только при наличии мощной водозащитной толщи (ВЗТ) в вышележащих горизонтах при отсутствии существенного водопритока. Добыча калийных руд длинными очистными забоями осуществляется на месторождениях Канады, Республики Беларусь, США, Франции, Испании.

Специалистами отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятий разработаны и опробованы системы с валовой и селективной выемкой руды длинными очистными забоями. При этом очистные механизированные комбайновые комплексы калийных рудников создавались, как правило, на основе выпускаемого оборудования для угольной отрасли с учетом специфики и горнотехнических условий калийных месторождений [135, 149, 152, 166].

Внедрение системы разработки продуктивных пластов длинными очистными забоями на Старобинском месторождении осуществлялось с применением узкозахватных комбайнов МК-67 (для выемки тонких пластов) и КШ-3М (для отработки пластов средней мощности).

Данные комбайны, успешно использовавшиеся на угольных месторождениях, характеризовались неудовлетворительными показателями работы при добыче вязких и крепких калийных руд. Низкая энерговооруженность и ненадежность цепного механизма подачи обусловили

малую техническую производительность данных комбайнов, не превышающую 10...15 тыс. т руды в месяц. Несколько лучшими показателями характеризовался перспективный комплекс СК2В с узкозахватным комбайном 2РКУ16К.

В процессе его эксплуатации достигнуты следующие показатели производительности: 0,8 тыс. т/смену, 1,6 тыс. т/сутки, 25,8 тыс. т/месяц. Низкая надежность перспективного комплекса СК2В не позволила достичь проектной производительности, вследствие чего результаты опытно-промышленной эксплуатации признаны неуспешными [105].

В настоящее время на рудниках Беларуси широко применяются импортные узкозахватные комбайны (таблица 1.3) ЭВ-200/230ЛН, СЛ-300НЕ, ЭДВ-300/760Л, ЭДВ-600, СЛ-500С, ЭСА-150Л (ФРГ), Электра 340-СОЛ, Электра 700-СОЛ (Великобритания). Данные комбайны комплектуются автоматизированными механизмами подачи с гидравлическими приводами «Эйкоматик» и электромеханическими приводами «Эйкотроник», совершенными телеметрическими системами, обеспечивающими контроль содержания метана в призабойном пространстве, контроль положения комбайна и секции крепи в лаве, оперативное диагностирование комбайна, крепи и конвейера.

При создании узкозахватных комбайнов калийных рудников активно используется передовой опыт предприятий угольного машиностроения [110]. Недостатком данных добычных машин является существенное измельчение руды при отделении её от массива серповидными стружками и при погрузке лопастями шнеков на забойный конвейер.

Таблица 1.3 – Технические характеристики узкозахватных комбайнов калийных рудников [152]

Наименование параметров	Вынимаемая мощность пласта, м								
	0,9-1,6			1,6-2,6					
	Электра 340-СОЛ «Андерсон» (Велико-британия)	ЭВ-200/230 ЛН «Айкхофф» (ФРГ)	ЭДВ-300/760-Л «Айкхофф» (ФРГ)	КГС-800С/2БП «Фамур», Польша	Электра 700-СОЛ «Андерсон» (Велико-британия)	СЛ-300 «Айкхофф» (ФРГ)	ЭДВ-300/760-Л-230-СВ «Айкхофф» (ФРГ)	СЛ-500С «Айкхофф» (ФРГ)	ЭСА-150Л «Айкхофф» (ФРГ)
Исполнительный орган	одношнековый	одно-шнековый	двух-шнековый	двух-шнековый	двух-шнековый	двух-шнековый	трех-шнековый	двух-шнековый	одно-шнековый
Диапазон регулирования по мощности пласта, мм	1250	900...1300	1400...2600	1400...3200	1800...2500	1400...2520	1400...2600	1400...2600	1400...3390
Число оборотов, мин <sup>-1</sup>	47	48	44	32,4	47	51	90; 44	71; 51	39
Диаметр шнека, мм	1250	900...1300	1350	1400	1300	1400	630; 1400; 1600	850; 1400	1400
Мощность электродвигателя исполнительного органа, кВт	300	230	2×380	2×300	2×300	2×300	2×380+230	2×300	150
Механизм подачи, тип	электро-механический	гидрав-лический	гидрав-лический	гидрав-лический	электро-механический	электро-механический	гидрав-лический	электро-механический	гидрав-лическая
Тяговое усилие, кН	300	96...196	284...568	330...660	600	270...537	284...568	277...554	280
Скорость подачи, м/мин	0...13	0...9,0 0...4,5	0...6 0...12	0...8 0...16	0...13	0...7 0...12	0...6 0...12	0...7 0...13	0...5
Габариты, мм: – длина – высота	– 917	7600 830	10700 1380	15070 1870	11730 1730	11300 1490	13800 1380	13690 1490	4800 1480

### 1.2.2 Проходческо-очистные комбайны калийных рудников

Геологическое строение месторождений калийных солей зачастую характеризуется наличием водоносных пород, располагающихся над продуктивными пластами. При этом использование системы разработки пластов длинными очистными забоями с посадкой кровли невозможно вследствие высокой вероятности нарушения целостности водозащитной толщи и формирования притоков грунтовых вод в пространство рудника. Наличие геологических и техногенных нарушений, связывающих водоносный горизонт и соляную толщу, делает калийное месторождение (или его участок) практически недоступным для разработки [53, 54, 112, 115, 190].

Обеспечение целостности ВЗТ на калийных рудниках России достигается использованием камерной системы разработки продуктивных пластов с оставлением ленточных целиков. Шахтные поля рудников разбиваются на панели и блоки, отрабатываемые выработками длиной около 200 м. Сечения выработок и размеры межкамерных ленточных целиков подбираются, исходя из опыта ведения работ на смежных участках шахтного поля, из устойчивости пород кровли и расчетных нагрузок на целики.

В качестве добычных машин при использовании камерной системы разработки калийных пластов применяются проходческо-очистные комбайны, оснащенные, как правило, исполнительными органами бурового типа с резцовым породоразрушающим инструментом.

Развитие механизированной проходки выработок в калийных рудниках России началось в конце 40-х годов XX века, когда на руднике СКРУ-1 ВМКМС была запущена в работу трофейная штрекопроходческая машина производства немецкой фирмы «Шмидт-Кранц» (рисунок 1.1) [149].

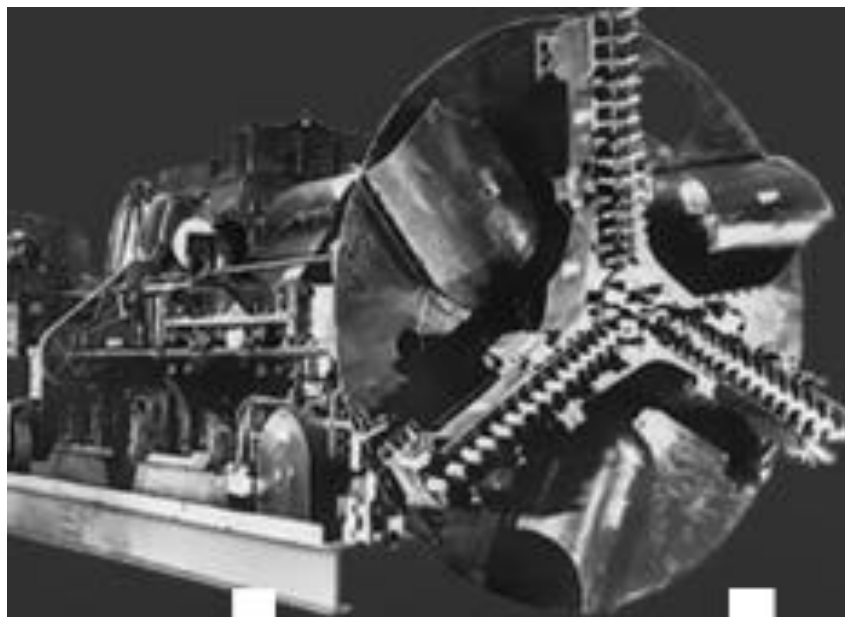


Рисунок 1.1 – Штрекпроходческая машина «Шмидт-Кранц»

Этот комбайн комплектовался исполнительным органом бурового типа в виде трехлучевой коронки и шагающим подающим механизмом, обеспечивал проходку выработок круглого сечения диаметром 3 м по пластам сильвинита с углами наклона до  $8^\circ$ .

На основе конструкции комбайна «Шмидт-Кранц» специалистами института «Сибгипромаш» был разработан отечественный комбайн ШБМ-2 (рисунок 1.2, а), производившийся на Ясиноватском машиностроительном заводе. Отличием комбайна ШБМ-2 от прототипа являлось наличие буроскалывающего исполнительного органа, бермовых фрез для зачистки почвы и формирования арочного сечения выработки, ковшовых грузчиков. Следствием нерациональной конструкции породоразрушающего исполнительного органа являлась низкая производительность комбайна, которая не превышала  $Q_T = 1,5$  т/мин. В последующей модификации комбайна (ШБМ-3) буроскалывающий исполнительный орган был заменён на режущий (рисунок 1.2, б). Данные добычные машины характеризовались надёжностью, простотой конструкции и высокой ремонтопригодностью. Общее количество комбайнов ШБМ, использовавшихся в калийной промышленности страны по данным на 1972 год, составляло 70 единиц [161].

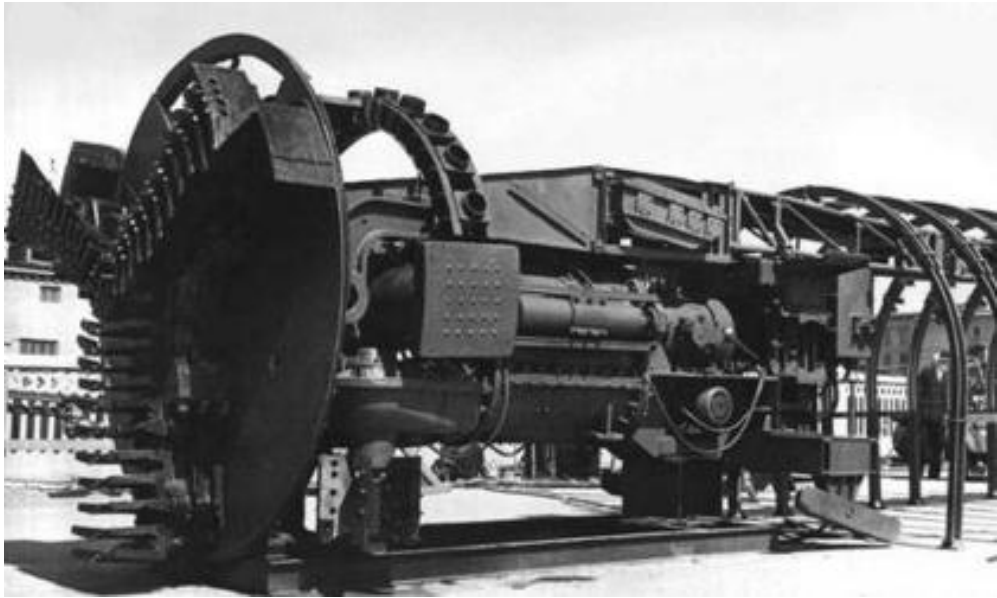
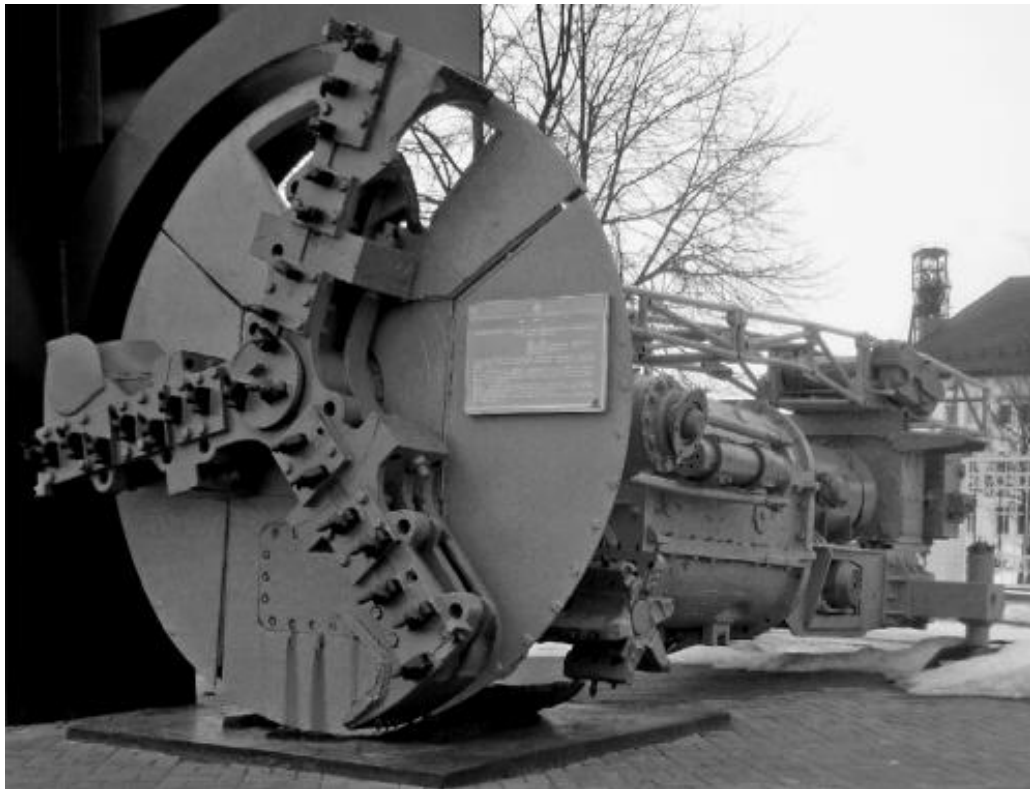
*а**б*

Рисунок 1.2 – Комбайны для добычи калийной руды с шагающим подающим механизмом: *а* – ШБМ-2; *б* – ШБМ-3

Анализ опыта эксплуатации и конструктивных особенностей комбайнов ШБМ показал, что наличие шагающего подающего механизма негативно отражается на эффективности использования данных добычных

машин. Следующий отечественный комбайн, разработанный для калийной отрасли конструкторами института «Гипроуглемаш» и поступивший на опытно-промышленные испытания в 1965 году, оснащался гусеничным ходовым оборудованием, что обеспечивало существенное сокращение времени на выполнение маневровых операций и зарубку комбайна.

Проходческо-очистной комбайн, получивший название ПК-8 (рисунок 1.3), комплектовался буроскалывающим исполнительным органом и обеспечивал техническую производительность  $Q_T = 2$  т/мин. В 1971 году комбайн модернизировали: буроскалывающий исполнительный орган был заменён на орган со сплошным резанием, что обусловило повышение технической производительности, снижение динамической нагруженности главного привода и увеличение показателей надежности нового комбайна по сравнению с предшествующей модификацией. В настоящее время модернизированные комбайны ПК-8 выпускаются в ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» (г. Солигорск, республика Беларусь) под шифром ПКС-8. Данные комбайны имеют техническую производительность  $Q_T = 4$  т/мин [78, 80].

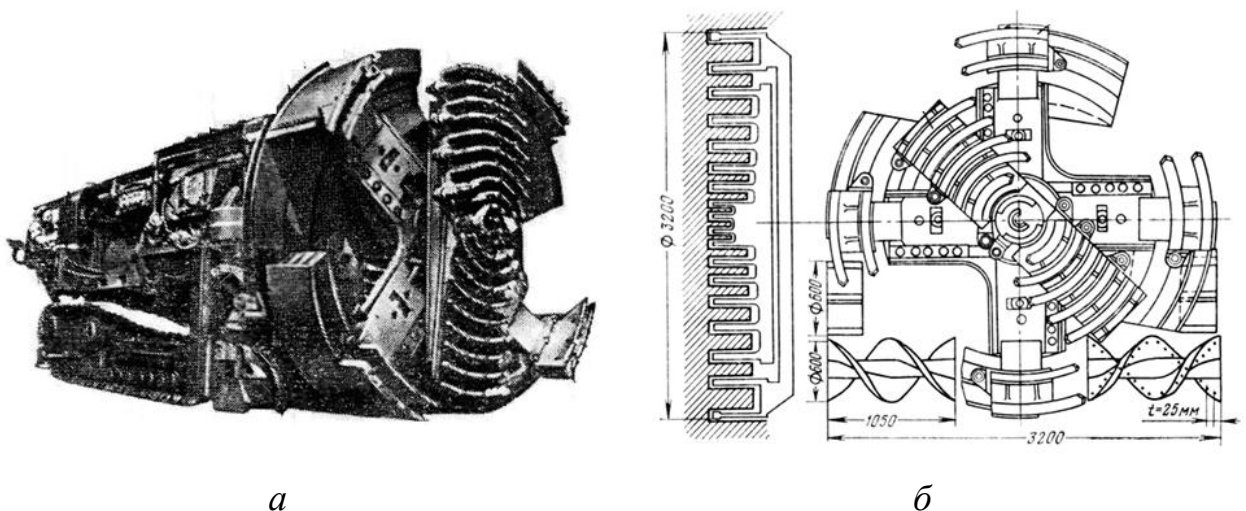


Рисунок 1.3 – Комбайн ПК-8:

*a* – общий вид; *б* – схема исполнительного органа



Наряду с использованием проходческо-очистных комбайнов, оснащенных исполнительными органами бурового типа и обеспечивающих сплошную отработку забоя, предпринимались попытки внедрения добычных машин с исполнительными органами барабанного и стреловидного типа. Низкая техническая производительность и неудовлетворительная устойчивость таких комбайнов являются факторами, до настоящего времени ограничивающими их широкое применение на калийных рудниках России [15, 62, 105, 149].

На сегодняшний день в калийной промышленности России наибольшее распространение получили проходческо-очистные комбайны с планетарно-дисковыми исполнительными органами [1]. Создание такого типа исполнительных органов принято относить к 1864 году, когда английским изобретателем Brenton была построена проходческая машина (рисунок 1.4), использованная при строительстве галерей в известняковом массиве во Франции. Машина Brenton обеспечивала проходку выработок круглой формы, диаметром 2,1...2,2 м со скоростью до 0,15 м/ч [6, 42, 77].

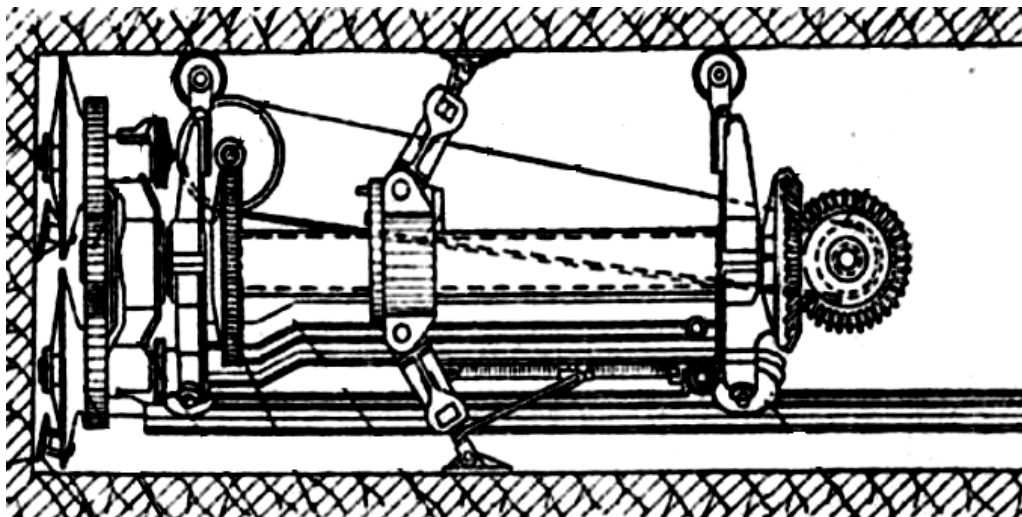


Рисунок 1.4 – Проходческая машина Brenton с планетарно-дисковым породоразрушающим исполнительным органом

В 1930-40 годах чешской фирмой «*Bat'a*» изготавливались проходческие комбайны с плоским планетарно-дисковым исполнительным

органом (рисунок 1.5, *а*). При работе данных исполнительных органов забой разрушался пересекающимися гипоциклоидными резами (рисунок 1.5, *б*), что обеспечивало энергоэффективные режимы функционирования комбайнов [43].

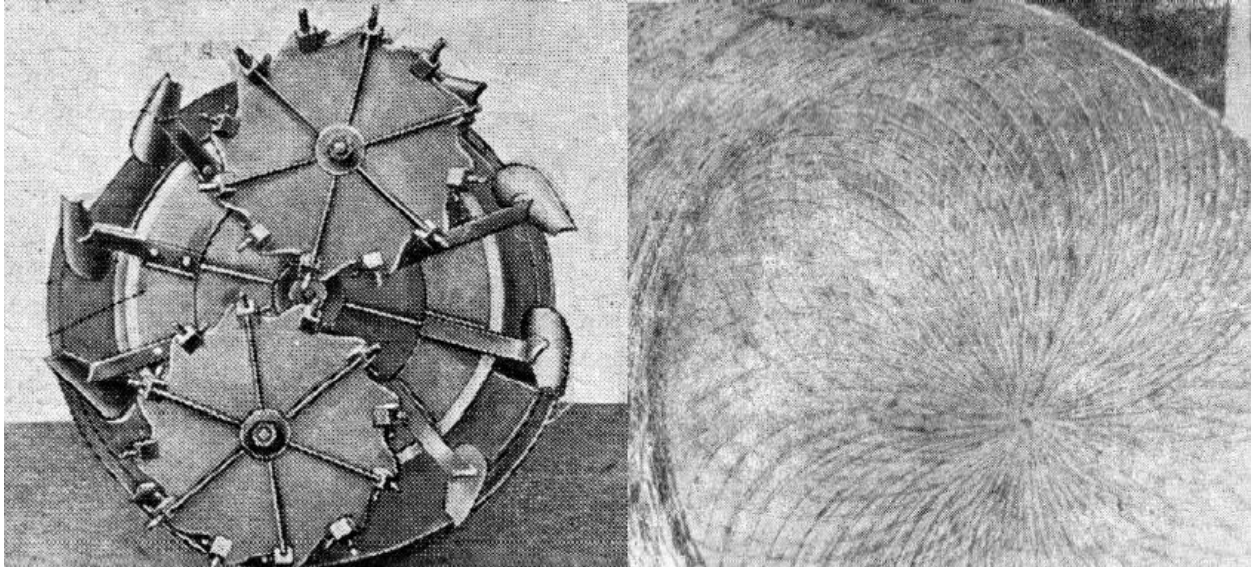
*а**б*

Рисунок 1.5 – Плоский планетарно-дисковый исполнительный орган (*а*) проходческого комбайна фирмы «*Bat'a*» и расположение резов на забое (*б*) при его работе

Дальнейшее развитие планетарно-дисковых органов в странах Западной Европы связано с именем австрийского инженера Вольмейера, руководившего разработкой горных комбайнов с планетарными породоразрушающими органами в компании *Atlas Copco* (1956-1970 гг.) [15, 16, 35].

Первый отечественный комбайн с пространственным планетарно-дисковым исполнительным органом ПКГ-1 (рисунок 1.6) разработан инженером Я. Я. Гуменником, изготовлен и испытан в Кузбассе на шахте «Байдаевская» в 1953 году. Основным преимуществом конструкции породоразрушающего исполнительного органа, предложенного Я. Я. Гуменником, являлось сосредоточение всей мощности приводов на малом количестве резцов, попеременно находящихся в контакте с забоем [6].

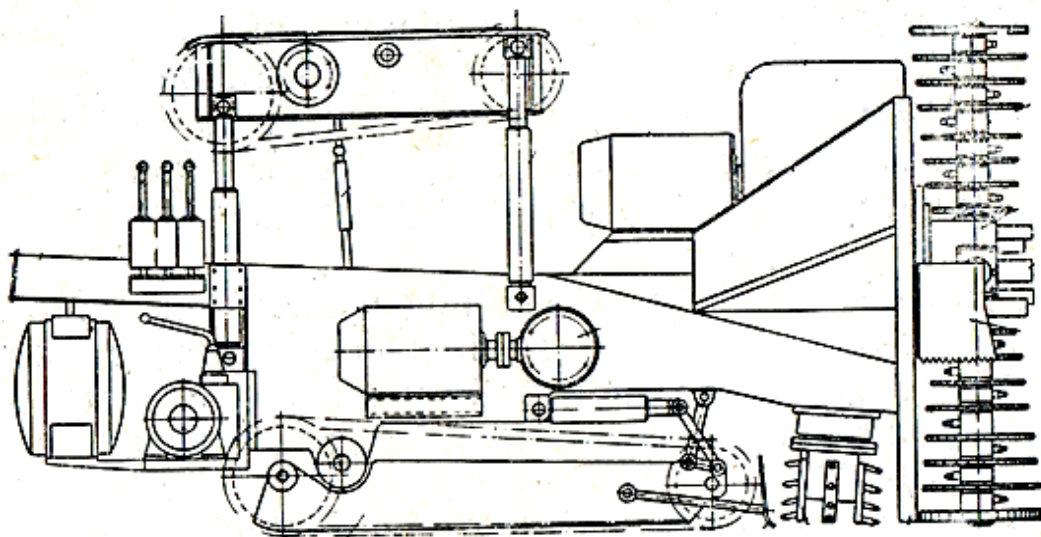


Рисунок 1.6 – Комбайн ПКГ-1

Дальнейшие работы по совершенствованию комбайнов с планетарно-дисковыми исполнительными органами, выполненные сотрудниками института «Гипроуглемаш», послужили основой для разработки проходческо-очистного комбайна «Караганда-7/15» (рисунок 1.7) и его модификаций «7/15М» и «7/15С», серийно выпускавшихся с 1969 по 1976 год. Данные комбайны характеризовались весьма сложной кинематической схемой привода качающегося планетарно-дискового исполнительного органа, оснащались скребковыми конвейерами-перегрузателями и гусеничным ходовым оборудованием. Сложность конструкции обуславливала значительное количество отказов приводов исполнительных органов, а также возникновение существенных трудностей при решении задачи оптимизации параметров процесса разрушения калийного массива резцами комбайнов «Караганда-7/15» [11, 131].

Одним из путей увеличения производительности проходческо-очистных комбайнов калийных рудников являлось увеличение площади обрабатываемого забоя, то есть увеличение сечения выработок, проводимых комбайнами. Указанное возможно было реализовать использованием двоярных планетарно-дисковых исполнительных органов, повышением массы и металлоёмкости комбайнов и увеличением установленной мощности

их приводов, что было реализовано в конструкциях комбайнов типа «Урал», разработанных в институте «Гипроуглемаш» в начале 70-х годов XX века.

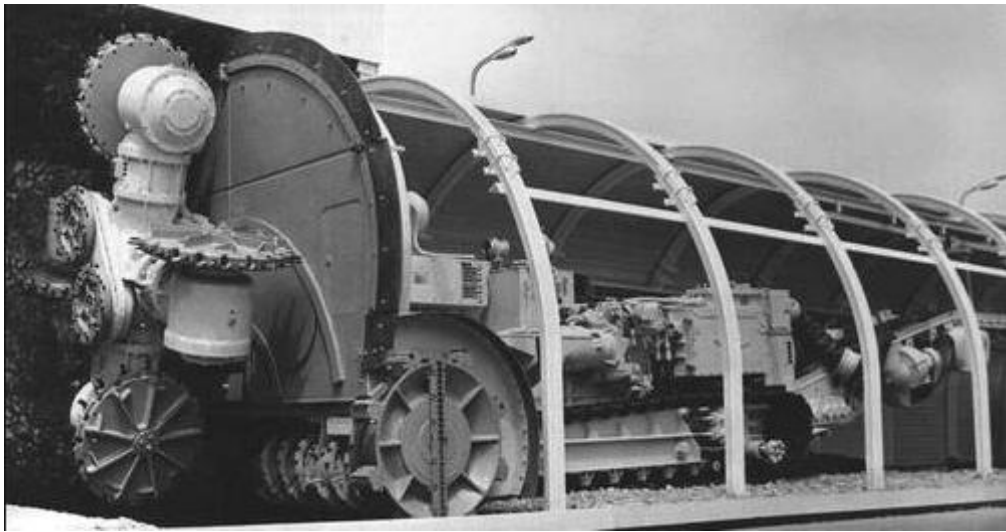


Рисунок 1.7 – Комбайн «Караганда-7/15»

Отметим, что предпринимались также попытки внедрить комбинированные роторные (сдвоенные и строенные) исполнительные органы. Характерным примером являются проходческо-очистные комбайны ПК-10, опытные образцы которых эксплуатировались на рудниках Верхнекамья в 1970-72 годах.

Серийное производство комбайнов «Урал-10КС» и «Урал-20КС» начато «Копейским машиностроительным заводом» в 1976 году. С 1981 года. модификации данных комбайнов, оснащённые доработанными редукторами, модернизированной гидроаппаратурой и регуляторами нагрузки электроприводов типа «ПРИЗ», выпускались под обозначением «Урал-10КСА» и «Урал-20КСА» [87, 121, 139, 149].

Выпуск комбайнов «Урал-10А» и «Урал-20А» начат в 1984 году. Отличием от предыдущих модификаций являлось наличие аппаратуры дистанционного управления и обеспечения полуавтоматического режима работы, устройств защиты приводных электродвигателей от перегрузок, лазерных установок для контроля положения комбайна в очистной камере.

В настоящее время наиболее современным и производительным отечественным проходческо-очистным комбайном является комбайн «Урал-20Р» (рисунок 1.8), внедрение которых на рудники ВМКМС проводилось с 2001 года [1]. Данные комбайны в целом аналогичны по конструкции ранее выпускавшимся модификациям и отличаются от них более совершенными узлами гидравлики и электрики, редукторами с модернизированными подшипниковыми узлами и улучшенной термообработкой шестерен, большей установленной мощностью приводов [67, 118].

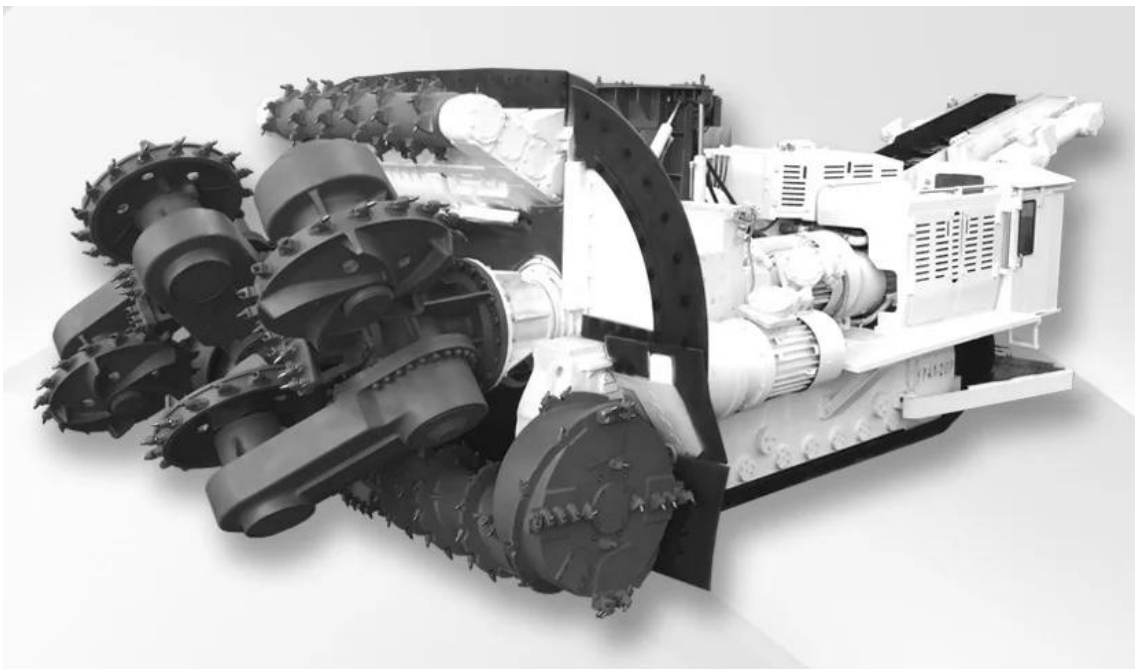


Рисунок 1.8 – Проходческо-очистной комбайн «Урал-20Р-11»

Компоновка планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р-11» аналогична комбайнам «Урал-10». Техническая производительность увеличена до 8 т/мин по сравнению с 6,4 т/мин для комбайнов «Урал-20» ранних модификаций.

Комбайны «Урал» используются на калийных рудниках Старобинского (Беларусь), Гарлыкского (Туркменистан) и Тюбегатанского (Узбекистан) месторождений, применяются при разработке каменной соли на Соль-

Илецком (Оренбургская область), Тыретьском (Иркутская область) и Артёмовском (Украина) месторождениях.

Добыча калийных руд в странах ЕС, Канаде и США осуществляется с использованием проходческо-очистных комбайнов производства компаний «Joy» (2BT-6), «Goodman» (модели 426 и 526), «Sandvik» (модели 1012ASD, 780A, 900A «Marietta»). Данные добычные машины комплектуются роторными породоразрушающими исполнительными органами с электроприводами большой установленной мощности [81, 110, 131, 133].

Опытная эксплуатация комбайнов 900A «Marietta» (рисунок 1.9) компании «Sandvik» на рудниках ВМКМС показала следующие преимущества данных добычных машин над комбайнами российского производства:

- отсутствие конических передач в конструкциях приводов рабочего оборудования, что повышает надежность трансмиссий;
- разрушение калийного массива роторными исполнительными органами с постоянными параметрами резания, простота оптимизации процесса разрушения массива по величине удельных затрат энергии;
- использование резцов с большим радиальным вылетом обеспечивает увеличение технической производительности комбайнов свыше 10 т/мин;
- наличие высокопроизводительного конвейера-перегрузателя обеспечивает полную и своевременную отгрузку отделенной от массива руды из призабойного пространства;
- комбайн комплектуется современными системами индикации, радиосвязи, автоматического управления и мониторинга технического состояния узлов и агрегатов [70].

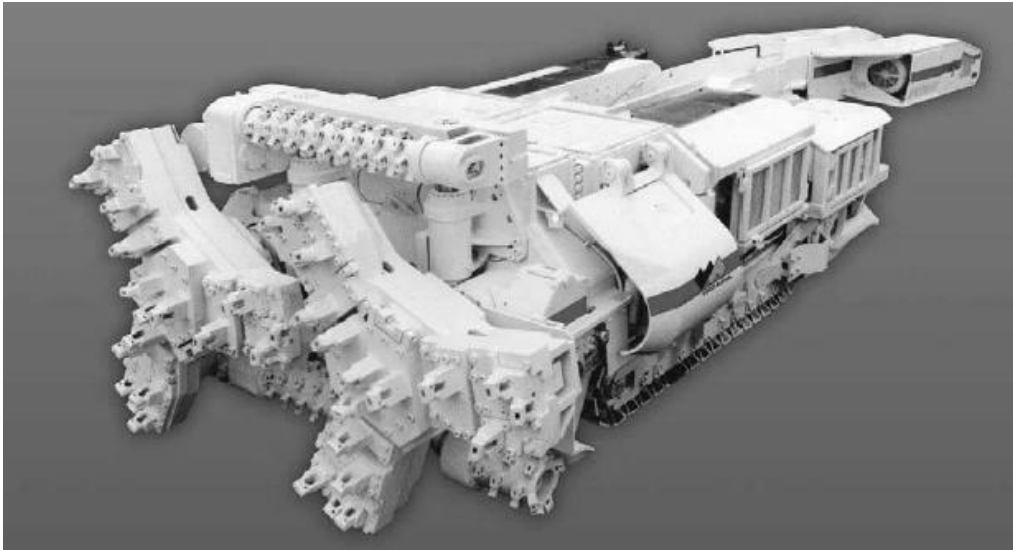


Рисунок 1.9 – Проходческо-очистной комбайн 900А «*Marietta*» производства компании «*Sandvik*»

Несмотря на перечисленные достоинства, зарубежные проходческо-очистные комбайны характеризуются меньшей эффективностью при использовании в условиях калийных рудников России. Их закупочная стоимость в разы превышает стоимость отечественных комбайнов; они сложны в обслуживании и ремонте; узлы электронных и гидравлических систем плохо защищены от агрессивного воздействия соляной пыли; для заправки гидросистем необходимы дорогостоящие рабочие жидкости. Указанные факторы обусловили отказ от широкого внедрения иностранных добычных машин на калийных рудниках России.

Отметим, что российскими машиностроителями предпринимались попытки создать высокопроизводительные проходческо-очистные комбайны с роторными исполнительными органами для добычи калийных руд. Так, в начале 1990-х годов на базе комбайна «Урал-20А» под руководством кандидата технических наук Л. И. Старкова создан и испытан опытный комбайн «Урал-Ротор». К сожалению, неблагоприятная социально-экономическая ситуация, возникшая в России с началом перестройки, не позволила довести данные работы до создания серийного образца [149, 172].

На момент написания работы на руднике АО «Еврохим-УКК» Верхнекамского месторождения АО «Копейский машиностроительный завод» осуществляет испытания опытного комбайна «Урал-310» (рисунок 1.10), разработанного как аналог комбайна 900А «*Marietta*» компании «*Sandvik*» [68, 190, 191].

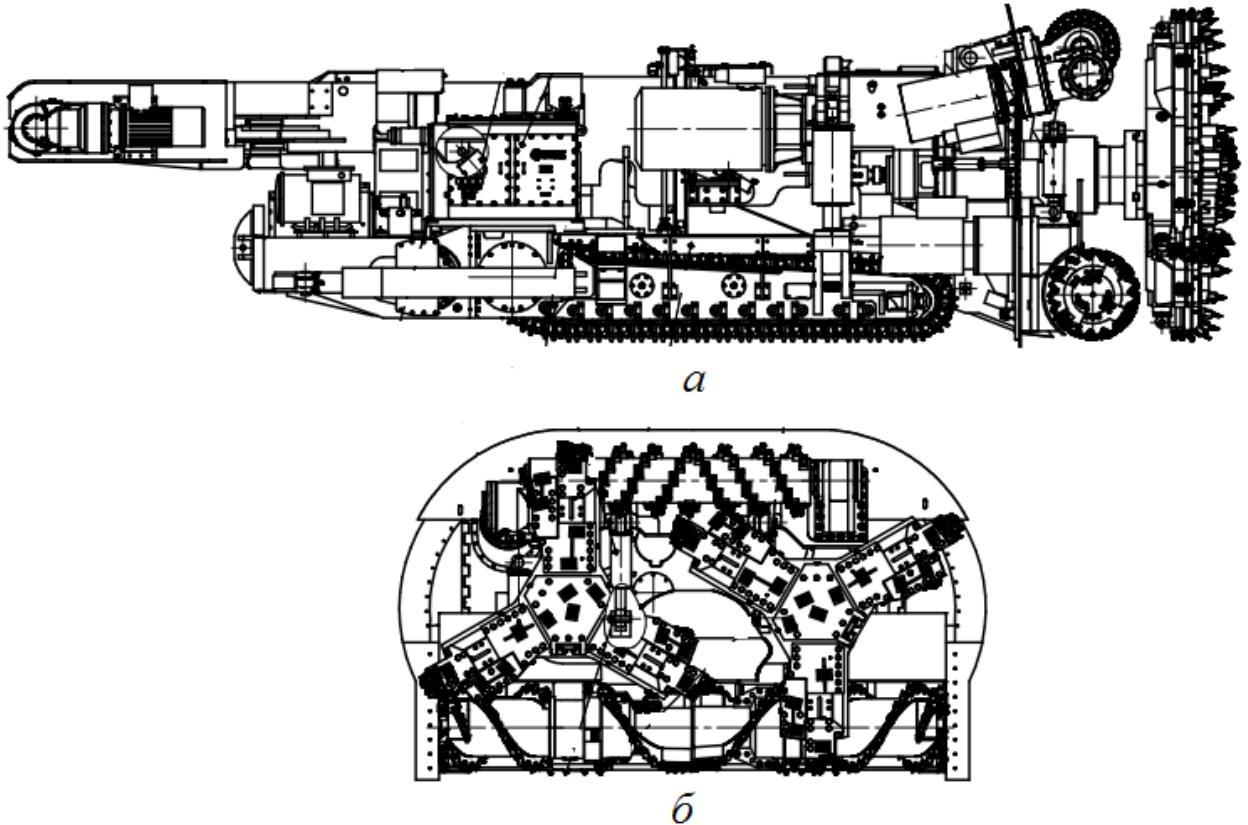


Рисунок 1.10 – Опытный проходческо-очистной комбайн «Урал-310»:

*a* – вид сбоку; *б* – вид спереди [68]

В настоящее время в практике горного машиностроения при разработке перспективных конструкций проходческо-очистных комбайнов калийных рудников основными тенденциями являются:

- увеличение массы комбайнов и установленной мощности приводов добычных машин;
- совершенствование элементов электро- и гидроприводов, упрощение кинематических схем механических трансмиссий [1];
- разрушение калийных массивов стружками больших сечений [47];



– внедрение систем мониторинга параметров работы, автоматического и дистанционного управления комбайном [48, 49, 138, 201, 212].

В технической литературе анализ особенностей процесса разрушения калийных руд резцами горных комбайнов осуществляется, как правило, по опосредованным характеристикам и обобщенным показателям. При этом не учитывается физическая сущность процесса резания, что затрудняет поиск неявных путей совершенствования рабочего инструмента и исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников.

Актуальным является поиск решений задач создания научно-методологических основ и технических решений, направленных на совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования.

### **1.3 Анализ конструктивных особенностей проходческо-очистных комбайнов «Урал»**

#### **1.3.1 Породоразрушающие исполнительные органы и погрузочное оборудование комбайнов «Урал-20Р»**

Проходческо-очистные комбайны «Урал» являются уникальными добычными машинами, выпускаемыми отечественной промышленностью уже около 50 лет. Существенный потенциал для модернизации, заложенный советскими специалистами при разработке данных комбайнов, позволяет в настоящее время успешно использовать комбайны «Урал» при разработке калийных месторождений России и стран СНГ, при этом обеспечивать технико-экономические показатели работы, сравнимые с добычными машинами ведущих зарубежных производителей [10, 18, 132, 133, 135].

Конструктивные особенности комбайнов «Урал» рассмотрим на примере наиболее современной и производительной модели «Урал-20Р-11/12» (рисунок 1.11). Данные добычные машины осуществляют проведение

горных выработок овально-арочного сечения площадью  $15,5 \text{ м}^2$ , предназначены для ведения очистных работ по пластам соляных пород мощностью от 3,1 м. Комбайны «Урал-20Р-11/12» обеспечивают техническую производительность  $Q_T = 8 \text{ т/мин}$  при сопротивляемости разрушаемых пород резанию  $A_p = 450 \text{ кН/м}$  [67, 69].

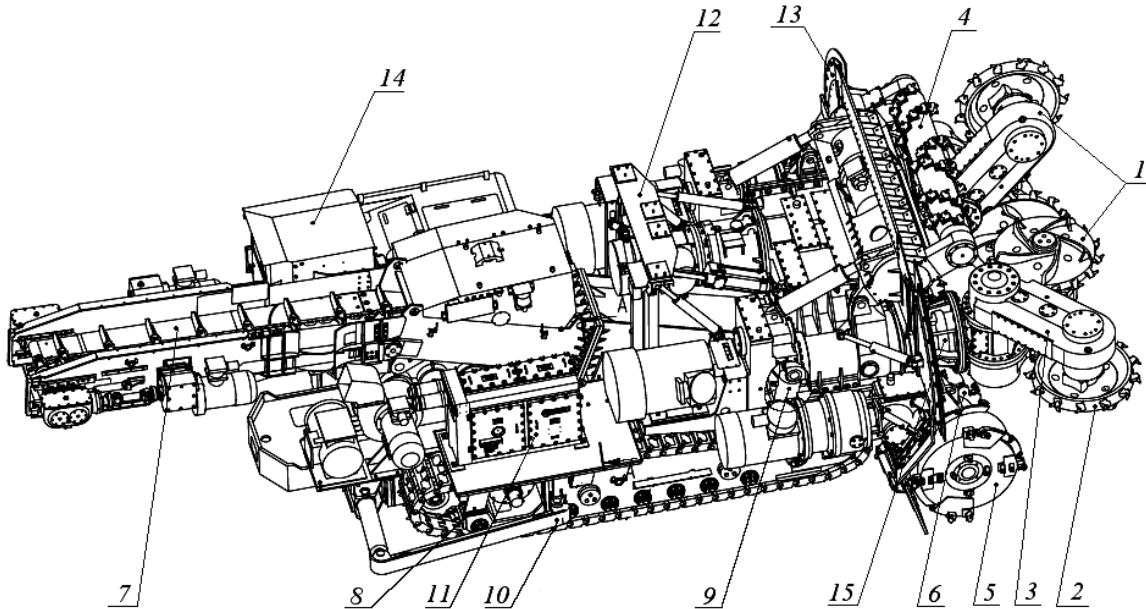


Рисунок 1.11 – Основные узлы проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р-11»

Конструкция комбайнов «Урал-20Р-11/12» включает сдвоенный пространственный планетарно-дисковый исполнительный орган 1 с роторными забурниками (не показаны на рисунке) и резовыми дисками 2, смонтированными на поворотных редукторах 3. Для отработки пород кровли выработки используется отбойное устройство 4 барабанного типа. Выравнивание почвы и оформление боковых поверхностей выработки осуществляются посредством бермового органа, включающего бермы 5 и шнеки 6, реализующие погрузку руды на скребковый конвейер-перегрузатель 7. Перемещение комбайна осуществляется гусеничным ходовым оборудованием 8.

Изменение положения породоразрушающих исполнительных органов комбайна и направления движения добычной машины в вертикальной

плоскости осуществляется посредством гидродомкратов 9. Боковые лыжи 10 облегчают реализацию поворота комбайна в горизонтальной плоскости [182].

Коммутационное электрооборудование комбайна размещается во взрывозащищенной магнитной станции 11. Комбайны «Урал» оснащаются бурильной установкой 12 для проведения дегазационных шпуров.

Ограждающий щит 13 препятствует распространению соляной пыли из зоны работы породоразрушающих и погрузочных исполнительных органов. Кабина 14 комбайна предназначена для защиты машиниста от шума, вибрации и пыли, там же размещены органы управления добычной машиной.

При работе комбайнов «Урал-20Р» около 90 % площади забоя разрушается резцовыми дисками. Резцы, установленные на цилиндрических поверхностях дисков, участвуют в сложном движении, осуществляемом в двух направлениях: относительном (вокруг осей дисков) и переносном (вокруг оси раздаточного редуктора – водила 15). Относительное вращение резцовых дисков осуществляется от центра к периферии забоя, что обеспечивает разрушение калийного массива радиальными расходящимися резами с переменным шагом и толщиной стружки [66, 67, 80].

Переносное вращение планетарных органов комбайна «Урал-20Р» реализуется в противоположных направлениях таким образом, что процесс разрушения калийного массива совмещается с процессом перемещения отделенной от забоя руды к приёмному окну скребкового конвейера.

Параметры процесса разрушения калийного массива резцами пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» изменяются в зависимости от угла поворота резцовых дисков. Толщина стружки, отделяемой от калийного массива, рассчитывается по формуле (1.6)

$$h = \frac{10^3 V_n \sin \varphi_i}{Z_d n_{\text{пер}}}, \quad (1.6)$$

где  $h$  – толщина стружки, отделяемой от массива, мм;  $\varphi_i$  – угол поворота резцового диска, град;  $n_{\text{пер}}$  – частота переносного вращения резцовых дисков,

об/мин;  $Z_d$  – количество резцовых дисков на исполнительном органе, шт.;  $V_n$  – скорость подачи комбайна, м/мин, определяемая по формуле (1.7)

$$V_n = \frac{Q}{\gamma_k S}, \quad (1.7)$$

где  $Q$  – фактическая производительность комбайна, т/мин;  $\gamma_k$  – плотность калийного массива, т/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь обрабатываемого забоя, м<sup>2</sup>.

Изменение шага резания  $t$  в зависимости от угла поворота резцового диска  $\varphi_i$  пространственного планетарно-дискового органа рассчитывается по формуле (1.8)

$$t = \frac{2\pi(C - r_d \cos \varphi_i)}{Z_p i}, \quad (1.8)$$

где  $t$  – шаг резания, мм;  $r_d$  – радиус резцового диска, мм;  $Z_p$  – количество резцов на диске, шт;  $i$  – отношение частоты относительного вращения резцовых дисков к переносной частоте вращения, определяемое по формуле (1.9)

$$i = n_{отн} / n_{пер}, \quad (1.9)$$

где  $n_{отн}$  – частота относительного вращения резцовых дисков, об/мин;  $C$  – расстояние от оси вращения диска до оси вращения водила, мм,

$$C = \sqrt{r_{вод}^2 - A^2}, \quad (1.10)$$

где  $r_{вод}$  – радиус вращения водила, мм;  $A$  – смещение плоскости резцового диска от плоскости симметрии, мм (рисунок 1.12) [15, 39, 57, 62].

Смещение плоскости резцовых дисков комбайнов «Урал» относительно плоскости симметрии планетарно-дисковых исполнительных органов на некоторую величину  $A$  в сторону переносного вращения обеспечивает эффект самозатягивания при разрушении забоя резцами дисков исполнительных органов. Таким образом, приводы переносного вращения планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал» зачастую работают с минимальными нагрузками (см. главу 4) и существенным резервом по мощности [207, 213].

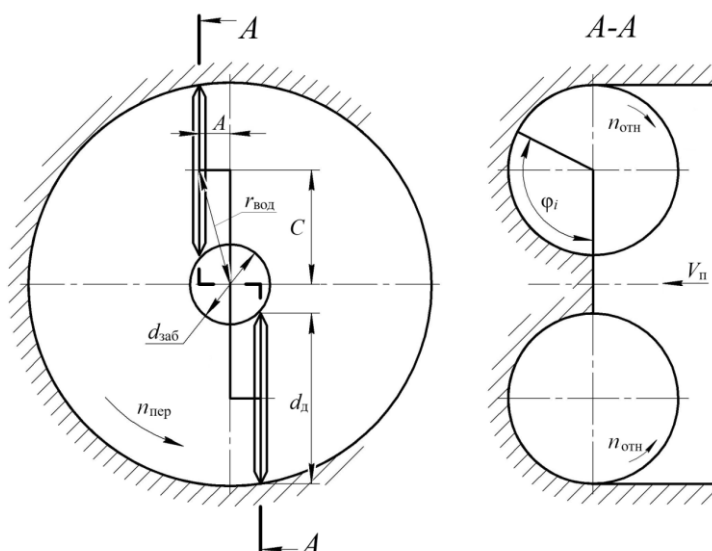


Рисунок 1.12 – Схема планетарно-дискового исполнительного органа:

$d_d$  – диаметр диска по резцам;  $d_{заб}$  – диаметр забурника;  $A$  – смещение диска относительно плоскости симметрии исполнительного органа;  $C$  – расстояние от оси вращения диска до оси вращения водила;  $r_{вод}$  – радиус вращения водила;  $V_{п}$  – скорость подачи комбайна;  $\varphi_i$  – угол поворота резцового диска;  $n_{пер}$  – частота переносного вращения дисков;  $n_{отн}$  – частота относительного вращения дисков

Одним из недостатков пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» является разрушение центральных и периферийных участков забоя стружками малой толщины, что определяет повышенные затраты энергии процесса добычи руды и значительное количество мелких труднообогатимых классов крупностью «-0,25 мм» в продуктах отбойки. При этом шаг резания также изменяется по всей траектории резов (рисунок 1.13), что определяет возникновение сложностей при решении задачи оптимизации процесса разрушения калийного массива по условию обеспечения минимальных удельных энергозатрат [161].

Другим недостатком планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал» является отсутствие механических устройств демпфирования или предотвращения сверхнормативных нагрузок (муфт, срезных штифтов и разрушаемых крепежей). Наличие разветвленных многоступенчатых трансмиссий в приводах исполнительных органов

зачастую обуславливает неэффективность работы автоматических средств защиты комбайна от перегрузок по величинам токов приводных электродвигателей. В результате значительная часть отказов, возникающих при работе комбайнов «Урал», приходится на узлы приводов планетарно-дисковых исполнительных органов (см. раздел 1.5).

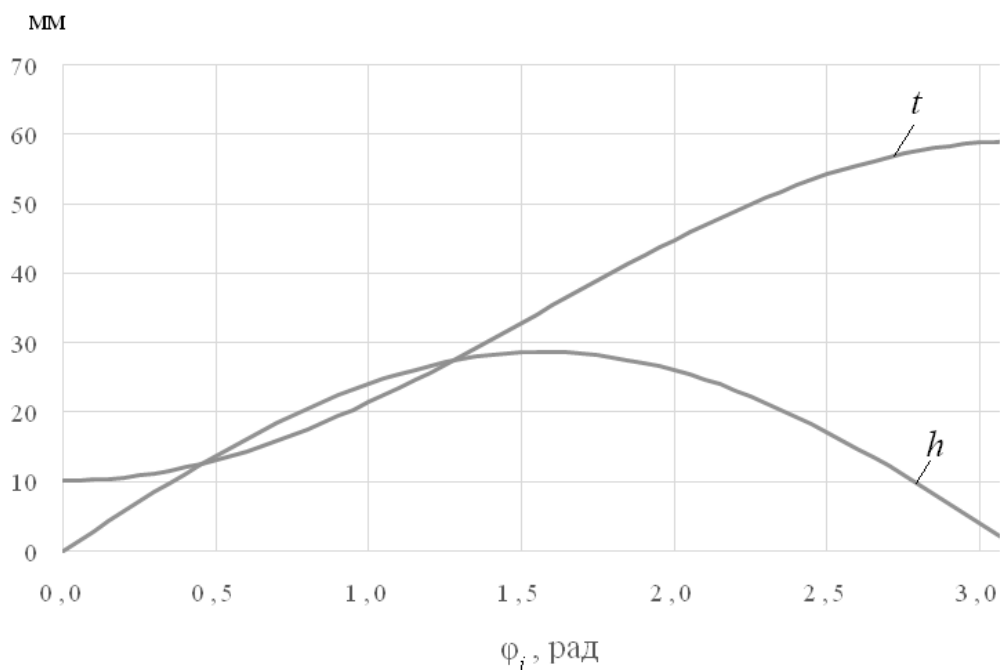


Рисунок 1.13 – Изменение шага резания  $t$  и толщины стружки  $h$  в зависимости от угла поворота резцового диска комбайна «Урал-20Р»

Существенное количество мелких труднообогатимых классов руды формируется при разрушении массива резцами верхнего отбойного устройства, берм и шнеков комбайна «Урал-20Р». Массовое содержание мелких классов в калийной руде, отделенной от массива вспомогательными исполнительными органами, в 2...3 раза выше, чем при отработке забоя резцовыми дисками планетарных органов. Указанное обусловлено последовательной схемой расстановки резцов на вспомогательных исполнительных органах комбайна и малой глубиной резов [28, 26, 171, 174].

Максимальное значение толщины стружки для барабанных и шнековых исполнительных органов рассчитывается по формуле (1.11)

$$h_{\text{ш. max}} = \frac{52,4 D_{\text{ш}} V_{\text{п}}}{V_{\text{р}} m}, \quad (1.11)$$

где  $h_{\text{ш. max}}$  – максимальное значение толщины стружки, отделяемой от массива шнековым (барабанным) исполнительным органом, мм;  $D_{\text{ш}}$  – диаметр шнека (барабана) по резцам, мм;  $m$  – число резцов в линии резания, шт.;  $V_{\text{р}}$  – скорость движения резца, м/с.

Шаг резания для барабанных и шнековых исполнительных органов является величиной постоянной, не зависящей от режимных параметров работы комбайна, и рассчитывается по формуле (1.12)

$$t = \frac{B}{n-1}, \quad (1.12)$$

где  $B$  – ширина шнека или барабана, мм;  $n$  – число линий резания, шт [123].

Направление вращения верхнего отбойного устройства (встречное движению комбайна, резы направлены сверху вниз) выбрано таким образом, чтобы минимизировать возможность выхода негабаритов с кровли выработки. В то же время силы реакции забоя, действующие на резцы отбойного устройства, направлены противоположно весу добычной машины, что обуславливает снижение тяговой способности гусеничного ходового оборудования комбайна и уменьшает напорное усилие на забой. Указанное негативно отражается на работе комбайна при проведении выработок с положительными углами наклона (движение комбайна вверх) [172, 175].

Перемещение отделенной от массива руды в призабойном пространстве к погрузочному окну скребкового конвейера-перегрузателя комбайна «Урал-20Р» осуществляется погрузочными лопатками резцовых дисков и лопастями шнеков. Циркуляция руды в спиральных каналах и многократное перебрасывание руды через ступицы шнеков приводят к её измельчению, снижению качества гранулометрического состава, а также обуславливают значительное увеличение удельных затрат энергии на перемещение и погрузку руды. Наличие зазоров между лопастями шнеков и

щитом ограждения является причиной утечек руды и формирования слоя просыпи на почве выработки.

Работа скребкового конвейера-перегрузателя комбайна «Урал-20Р» сопровождается значительными вибрациями рамы и неравномерностью движения тягового органа. С учетом значительного угла установки конвейера к плоскости ходовой тележки комбайна производительность перегружателя может существенно уменьшаться при проходке комбайном выработок с отрицательными углами наклона (движение вниз), что обуславливает циркуляцию и измельчение отделенной от массива руды в призабойном пространстве [174].

Анализ конструктивных особенностей комбайнов «Урал» показывает, что принципиальные конструктивные схемы комбайнов калийных рудников не претерпели изменений с 70-х годов прошлого века. Совершенствование режимов работы породоразрушающих исполнительных органов и погрузочного оборудования добычных машин калийных рудников с целью повышения энергоэффективности их функционирования является актуальной задачей, решение которой представляет научный и практический интерес.

### **1.3.2 Резцы комбайнов калийных рудников**

Исполнительные органы отечественных проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд оснащаются резцами РС-14 (РС-14У) и ПС1-8У (рисунок 1.14) [18, 58, 67, 71].

Резцы РС-14 (см. рисунок 1.14, *a*) – неповоротные, предназначены для установки на верхнем отбойном устройстве, шнеках и бермовых фрезах. Резцовые диски планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» оснащаются удлиненными неповоротными резцами РС-14У [127].



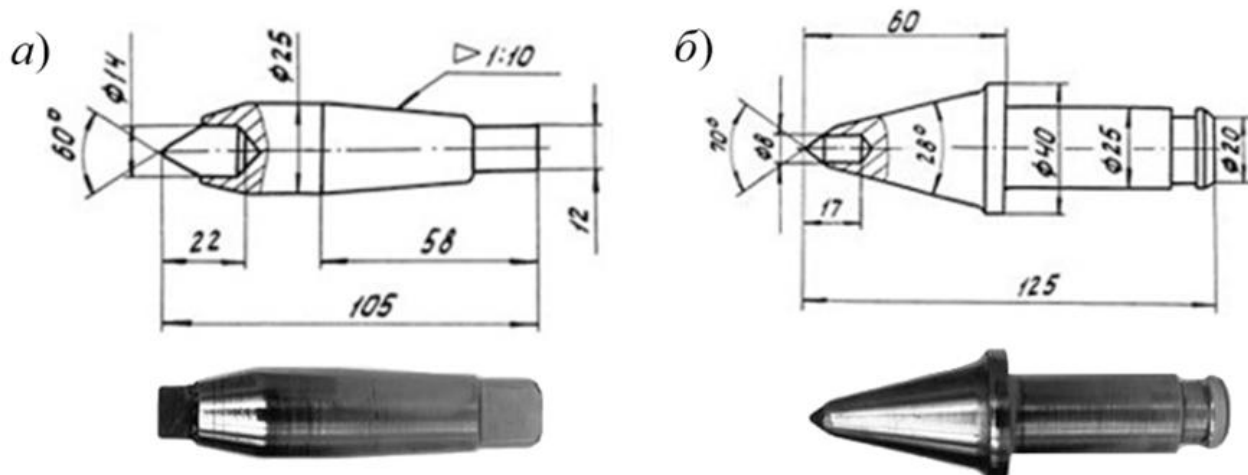


Рисунок 1.14 – Резцы комбайнов для добычи калийной руды:

*a* – РС-14; *б* – РС1-8У

Неповоротные резцы характеризуются простым и надежным способом крепления, что минимизирует вероятность их потери вследствие разбалтывания в посадочном отверстии кулака-резцедержателя. Угол установки резцов РС к плоскости забоя на резцовых дисках комбайнов «Урал» составляет  $43^\circ$ , таким образом, передний угол резца равен  $\gamma_p = 18^\circ$ , а задний  $\beta_p = 12^\circ$ . На вспомогательных органах комбайна – верхнем отбойном устройстве, шнеках и бермовых фреззах – угол установки резцов РС увеличен и составляет  $53^\circ$ , что обусловлено необходимостью обработки почвы и кровли при движении комбайна в наклонной выработке с углами до  $12^\circ$ .

В случае затупления твердосплавной вставки резцы РС-14 и РС-14У можно перетачивать для повторного использования. Резцы РС применяются для разрушения вязких калийных руд или при резании стружками малой толщины [18, 177, 176].

Резцы РС1-8У – тангенциальные, с конической головной частью (см. рисунок 1.14, б), устанавливаются в кулаках резцедержателях с возможностью поворота относительно собственной оси. Данные резцы применяются для разрушения относительно хрупких калийных руд последовательными крупными сколами. За счет поворота резца износ головной части осуществляется равномерно, что обуславливает

самозатачивание резца в процессе работы. Недостатком поворотных резцов является износ установочных отверстий кулаков-резцедержателей вследствие вращения державок [74].

Резцы планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал» движутся по сложным криволинейным траекториям и контактируют с забоем периодически, что определяет благоприятные условия для их охлаждения и положительно отражается на сроке службы породоразрушающего инструмента [137]. Скорость движения резца (скорость резания), установленного на резцовом диске комбайна «Урал» рассчитывается по формуле (1.13)

$$V_p = \frac{\pi d_d n_{отн}}{60}, \quad (1.13)$$

где  $V_p$  – скорость движения резца (скорость резания), м/с;  $d_d$  – диаметр резцового диска, м;  $n_{отн}$  – частота относительного вращения резцового диска, об/мин [8, 9, 25, 138].

Скорость движения резца определяется кинематикой исполнительных органов и является существенным фактором, влияющим на энергоэффективность функционирования добычной машины и устойчивость её работы. При увеличении скорости резания калийной руды уменьшается доля неупругих деформаций массива, снижается диспергирование руды в предрезцовом пространстве, улучшается качество гранулометрического состава добываемой руды. В то же время увеличение скорости резания определяет возрастание динамической нагруженности резцов комбайна, что повышает удельный расход резцов, и, как следствие, увеличиваются материальные и временные потери, связанные с заменой резцового инструмента при работе проходческо-очистных комбайнов [155]. В работе [176] указывается, что затраты на породоразрушающий инструмент составляют до 20 % эксплуатационных затрат в горной отрасли.

При разрушении калийной руды рациональная скорость резания находится в диапазоне 2...5 м/с.

Траектория движения резца, установленного на поверхности резцового диска комбайна «Урал», за один оборот исполнительного органа образует тороидальную поверхность (рисунок 1.15) [62, 187].

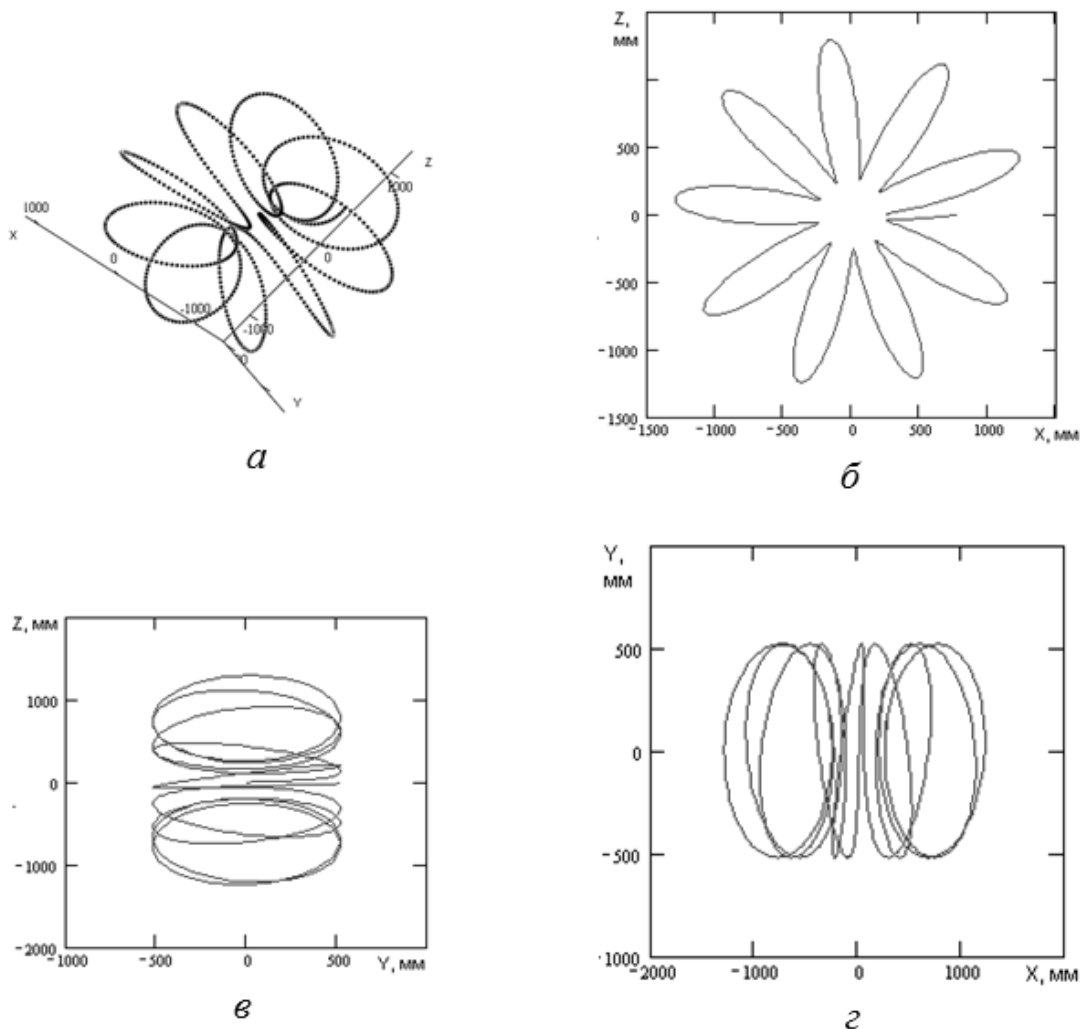


Рисунок 1.15 – Траектория движения резца, закреплённого на поверхности поворотного диска исполнительного органа комбайна «Урал-10А»:

*a* – в трёхмерном пространстве; *б* – в проекции на вертикальную плоскость забоя;

*в* – в проекции на вертикальную плоскость, перпендикулярную к плоскости забоя;

*г* – в проекции на горизонтальную плоскость

Траектория движения резца при скорости подачи комбайна  $V_{\Pi} = 0$  описывается системой уравнений (1.14)

$$\begin{cases} X = (r_b - r_d \cos \varphi_i) \cos\left(\frac{\varphi_i}{n_{\text{отн}} / n_{\text{пер}}}\right); \\ Y = (r_b - r_d \cos \varphi_i) \sin\left(\frac{\varphi_i}{n_{\text{отн}} / n_{\text{пер}}}\right); \\ Z = r_d \sin \varphi_i. \end{cases} \quad (1.14)$$

При  $V_{\text{п}} \neq 0$  резец осуществляет три вида движения: относительное (вокруг оси резцового диска), переносное (вокруг оси водила) и поступательное при подаче комбайна на забой [62, 121, 122].

Следствием особенностей кинематики пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов является изменение типов резов в зависимости от положения резца относительно забоя. Так, центральная часть забоя разрушается последовательными резами, средняя – шахматными резами, периферийная – блокированными резами (рисунок 1.16).

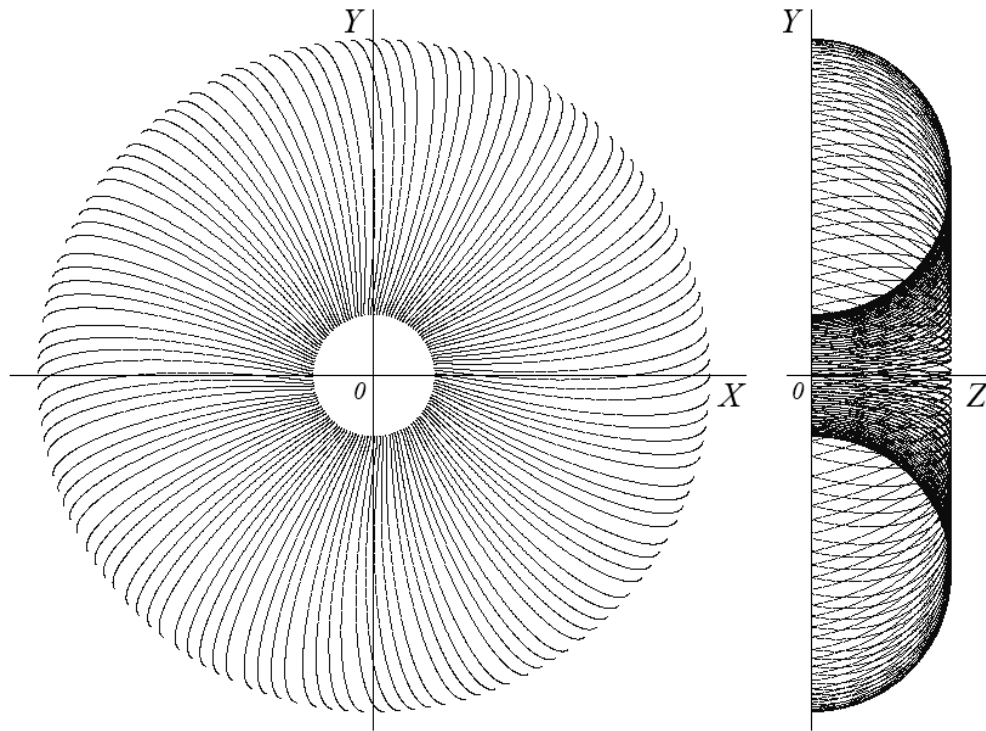


Рисунок 1.16 – Схема расположения резов на поверхности забоя при работе планетарно-дискового исполнительного органа комбайна «Урал-20Р»

Породоразрушающие инструменты на резцовых дисках комбайнов устанавливаются под углом  $\lambda_p = 16,5 \dots 18,5^\circ$  (рисунок 1.17), что обусловлено

необходимостью минимизации контакта боковых поверхностей резцов с разрушаемым массивом. Рациональное значение угла разворота резца определяется выражением (1.15)

$$\lambda_p = \lambda_v + \lambda, \quad (1.15)$$

где  $\lambda_v$  – угол между продольной осью резцового диска и вектором абсолютной скорости движения резца, град;  $\lambda$  – угол сноса резца, град,  $\lambda = 1,5^\circ \dots 2^\circ$ .

Воздействие боковых нагрузок на поворотные резцы типа ПС1-8У обуславливают их устойчивое вращение в процессе работы и, как следствие, самозатачивание и равномерный износ. В то же время при работе неповоротных резцов типа РС боковые нагрузки со стороны массива являются причиной износа головных частей державок резцов и выламывания твердосплавных вставок (рисунок 1.18) [46, 79, 145, 151].

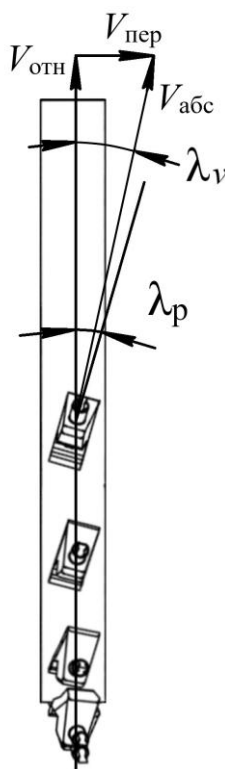


Рисунок 1.17 – Схема установки резцедержателей на поверхности диска, предусматривающая наличие угла разворота резцов  $\lambda_p$  относительно плоскости диска

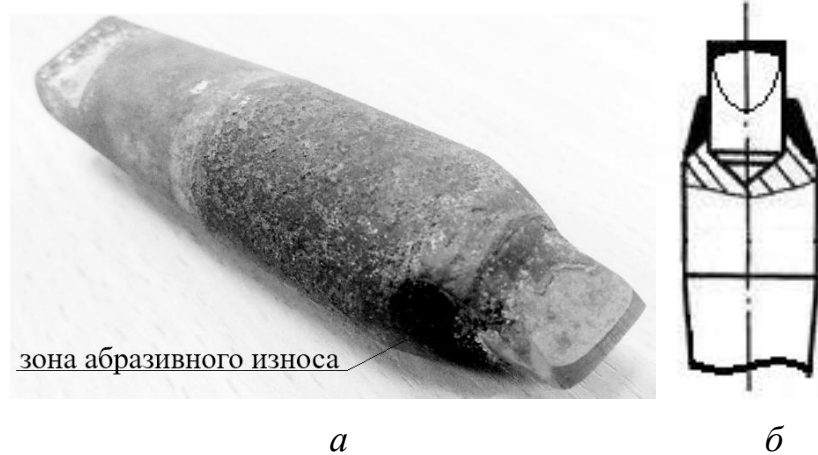


Рисунок 1.18 – Резец РС-14, изношенный воздействием боковых нагрузок:  
*а* – общий вид резца; *б* – схема расположения зон наибольшего износа

Увеличение срока службы резцов и снижение удельных затрат энергии процесса диспергирования калийной руды боковыми поверхностями резцов возможны посредством разработки технических решений, направленных на создание самоустанавливающихся резцов, обеспечивающих автоматическое изменение угла разворота  $\lambda_p$  в соответствии с траекториями резов [151].

Конструкция и параметры резцов проходческо-очистных комбайнов оказывают существенное влияние на энергоэффективность процесса разрушения калийного массива и качество гранулометрического состава добываемой руды. Вопросы обоснования рациональных параметров породоразрушающего инструмента калийных комбайнов рассмотрены в главах 2 и 5 настоящей работы.

### **1.3.3 Системы индикации, управления и защиты проходческо-очистных комбайнов калийных рудников**

Электрооборудование комбайнов калийных рудников выполняется во взрывобезопасном исполнении, обеспечивает подачу электроэнергии приводным двигателям, управление этими двигателями, сигнализацию, защиту и освещение [66, 67, 83, 157].

Питание комбайнов «Урал» реализуется по двум гибким кабелям от передвижных трансформаторных подстанций, выполняющих также защиту от токов короткого замыкания и утечек в питающей сети посредством устройств ИКУ-2 [50, 67]. Силовое электрооборудование в зависимости от комплектации комбайнов рассчитано на напряжение 660 или 1140 В. Контроль предельной загрузки двигателей осуществляется аппаратами «КОРД».

Цепи сигнализации и управления питаются напряжением 36 и 127 В, соответственно, от установленных в магнитных станциях комбайнов понижающих трансформаторов.

Заземление комбайнов «Урал» выполняется в соответствии с инструкцией, изложенной в [67], посредством жил заземления питающих кабелей и специальной заземляющей сети.

С 2012 года комбайны «Урал-20Р-11/12» оснащаются электрогидравлическими системами управления (СЭУ) производства ООО «МК «Ильма» (г. Томск), обеспечивающими управление гидросистемой гусеничного хода, цилиндрами установочных перемещений и бурильной установки, а также реализующими термодинамический мониторинг редукторов комбайнов и газовый контроль атмосферы выработки. СЭУ позволяет передавать информацию от комбайна по силовому кабелю в диспетчерскую сеть предприятия в режиме реального времени.

Результаты эксплуатационного контроля регистрируются и хранятся в энергонезависимой памяти СЭУ, откуда могут быть скопированы бесконтактно на флэш-карту специалистом рудника для дальнейшей обработки на персональном компьютере.

Использование инновационной СЭУ производства ООО «МК «Ильма» обеспечило возможность контроля режимов работы и нагруженности приводов комбайнов в реальных условиях функционирования. В то же время следует отметить и недостатки системы:

– низкая эффективность термодинамического мониторинга обуславливает необходимость периодического диагностирования узлов комбайна с использованием методов вибродиагностики и химико-физического анализа смазочных материалов;

– регистрация действующих значений токов двигателей не позволяет достоверно оценивать нагруженность приводов комбайнов вследствие «мягкой» характеристики шахтной сети;

– отсутствует возможность выполнения оценки энергоэффективности функционирования комбайна;

– отсутствие информации о перемещении комбайна затрудняет определение эксплуатационной производительности добычной машины и эффективности её использования во времени;

– ручное управление комбайном зачастую обуславливает нерациональные режимы работы, что негативно отражается на энергетических показателях процесса разрушения соляного массива, надежности выемочных машин и устойчивости работы механизированных комплексов в целом [166, 181, 193, 194].

Следует отметить, что, несмотря на указанные недостатки, механическое, гидравлическое и электрическое оборудование комбайнов «Урал» является в настоящее время наиболее адаптированным к использованию в калийной промышленности России [189]. Актуальной остаётся задача выбора технически обоснованных режимов работы и создания способов и алгоритмов автоматического управления данными добычными машинами, обеспечивающих энергоэффективное функционирование комбайнов в условиях калийных рудников.



## 1.4 Условия эксплуатации и нагрузки приводов комбайнов калийных рудников при их функционировании

### 1.4.1 Горнотехнические и горно-геологические условия эксплуатации проходческо-очистных комбайнов

Сложность условий эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников определяется степенью влияния неблагоприятных горнотехнических и горно-геологических факторов [164]. Выработки калийных рудников характеризуются искривленностью в плане и профиле, большой протяженностью, стесненностью рабочего пространства и непостоянством рабочего места. Атмосфера отличается взрывоопасностью, влажностью и химической активностью, наличием взвешенных абразивных частиц, что усложняет эксплуатацию добычных машин [11, 38, 173, 178, 213].

Размеры и форма выработок при отработке продуктивных пластов определяют область рационального применения, установленную мощность и характер изменения нагрузок в элементах приводов проходческо-очистных комбайнов, возможность применения средств доставки руды с заданной производительностью [15, 62, 115, 161].

Отечественные комбайны «Урал» проходят выработки арочной формы сечения (рисунок 1.19). Ширина комбайнового хода определяется габаритами исполнительного органа комбайна, а число ходов к камере – устойчивостью пород кровли. Межкамерные целики в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей имеют ширину 1,5...7,0 м. Для обеспечения целостности ВЗТ камеры и целики располагаются соосно.

Величина потерь руды в очистной камере зависит от формы проводимой выработки и определяется выражением (1.16)

$$\Pi_{\%} = \frac{F_{\text{оп}} - F_{\text{к}}}{F_{\text{оп}}} 100 \%, \quad (1.16)$$

где  $F_{\text{оп}}$  – площадь описанного вокруг контура выработки прямоугольника,  $\text{м}^2$ ;  
 $F_{\text{к}}$  – площадь сечения выработки,  $\text{м}^2$ .

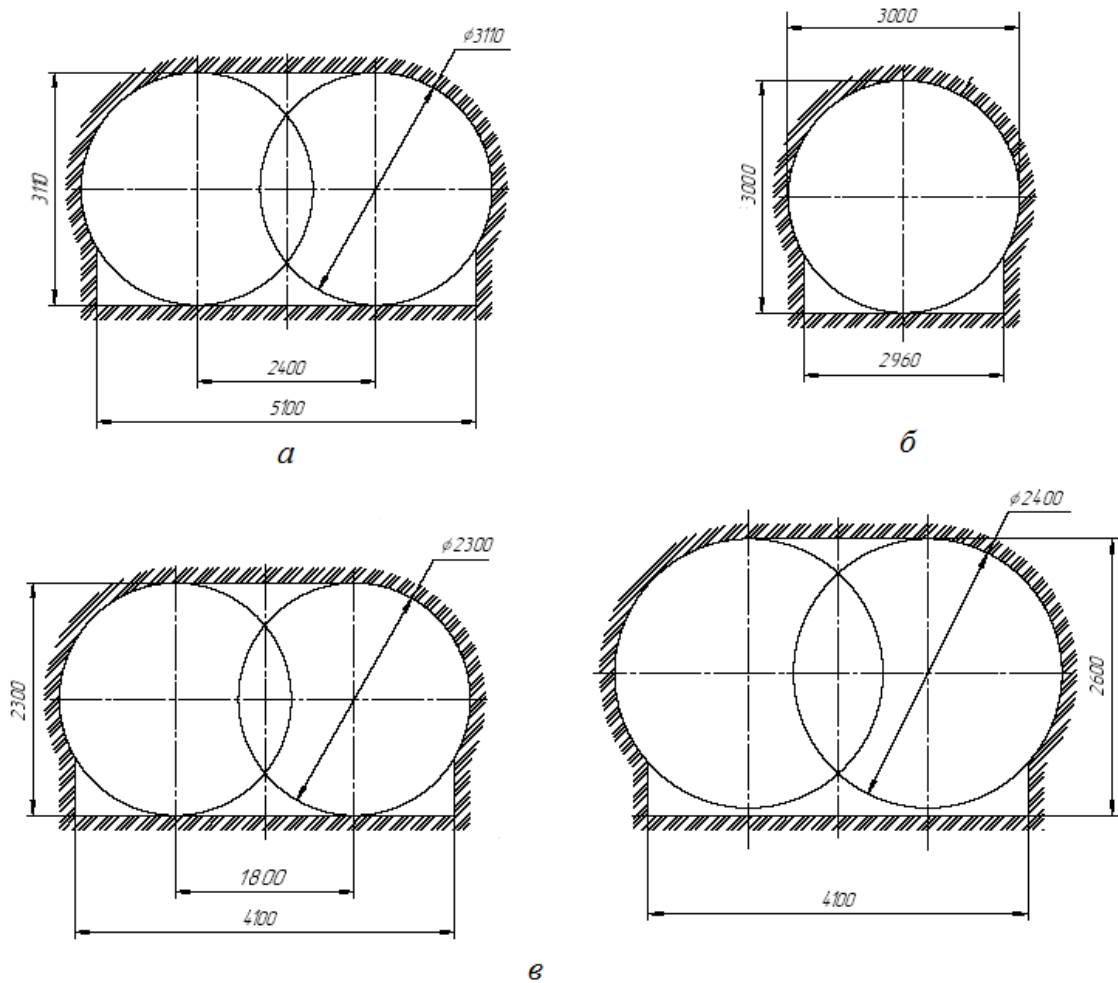


Рисунок 1.19 – Размеры и форма сечений выработок, проводимых проходческо-очистными комбайнами: *а* – «Урал-20Р»; *б* – «Урал-61»; *в* – «Урал-10А»

На рисунке 1.20 представлена принципиальная схема камерной системы разработки пластов «Красный-II» и «АБ» ВМКМС. Заездные выработки проведены под углом  $45^\circ$  к оси откаточного штрека. Из каждой заездной выработки проводятся 2...3 очистные камеры с межосевым расстоянием 9 м. Ширина камеры, проводимой за один ход комбайном «Урал-20Р», составляет 5,2 м, комбайном «Урал-10А» – 4,3 м. Мощность целиков составляет 3,8 и 4,7 м, соответственно [53, 84, 115, 149].

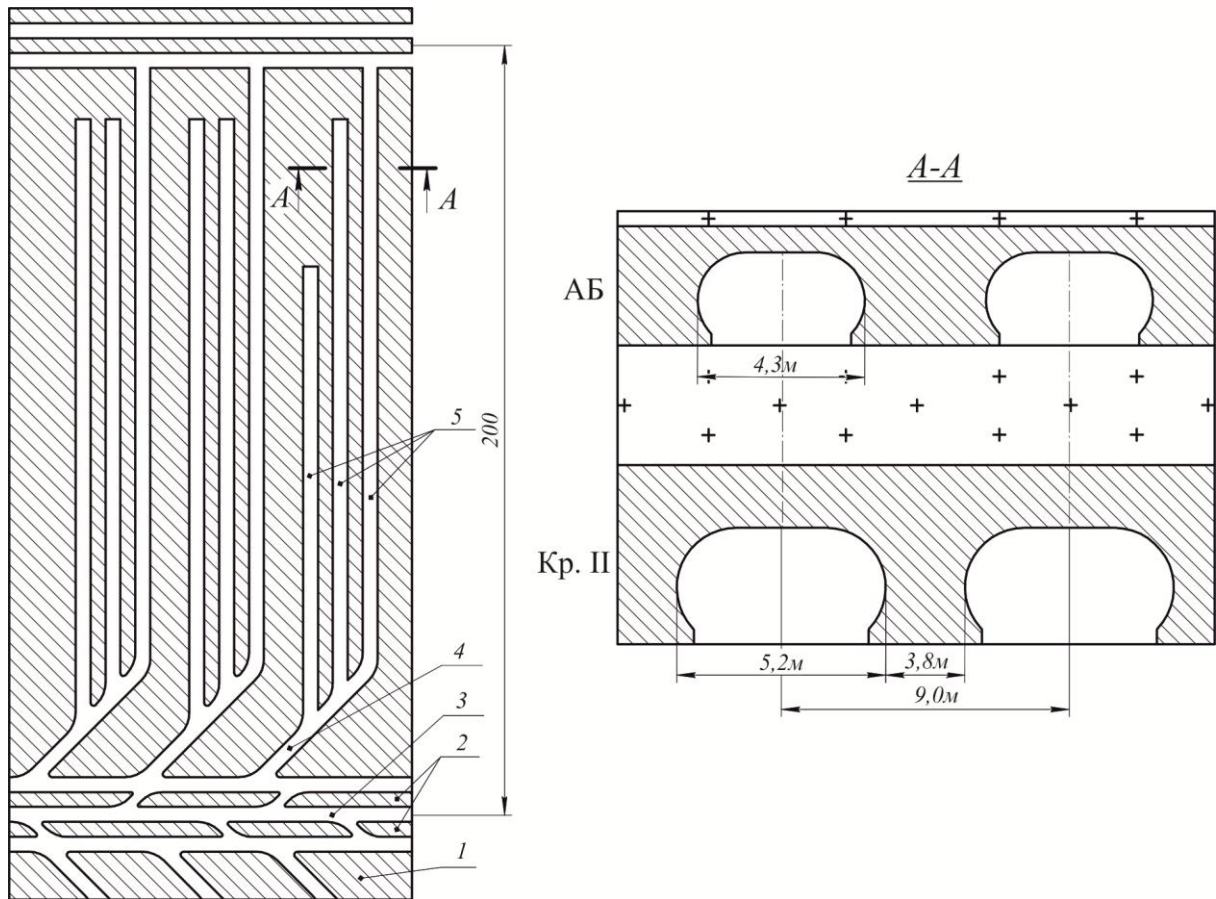


Рисунок 1.20 – Пример камерной системы разработки пластов на руднике Верхнекамского месторождения калийных солей: 1, 2 – ленточные целики; 3 – откаточный штрек; 4 – заездная выработка; 5 – очистные камеры [161]

В том случае, если мощность пласта калийной руды превышает 4 м, применяют двухслойную отработку очистных камер. Первым ходом комбайн работает всей площадью исполнительного органа (глухим забоем) и осуществляет выемку верхнего слоя пласта. После отгона комбайна вторым ходом обрабатывается нижний слой, осуществляется подрубка продуктивного пласта. При этом площадь разрушаемого забоя меньше площади сечения исполнительного органа проходческо-очистного комбайна (рисунок 1.21). Пропорционально уменьшению площади забоя снижается производительность комбайна, увеличиваются удельные энергозатраты процесса добычи калийной руды, однако несколько улучшается гранулометрический состав добываемой руды.

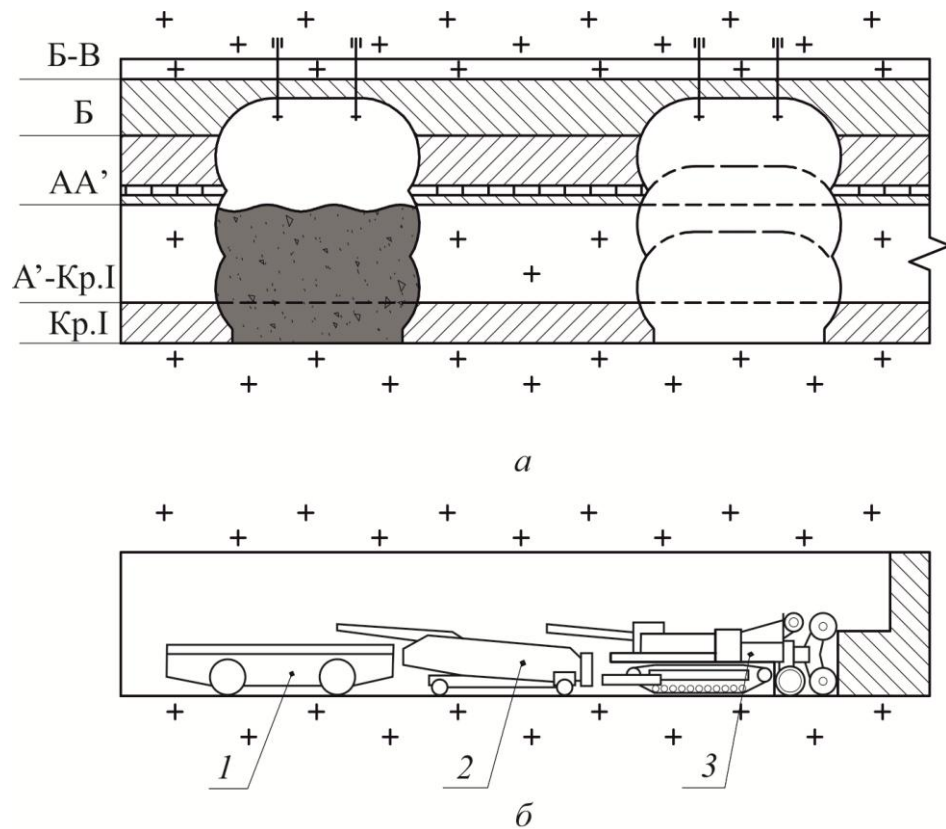


Рисунок 1.21 – Схема отработки продуктивных пластов с подрубкой:  
*а* – поперечное сечение выработок; *б* – продольное сечение выработки;  
 1 – ШСВ; 2 – накопительный бункер; 3 – комбайн [210, 211]

Разрушение калийного массива полным сечением исполнительного органа проходческо-очистного комбайна является наиболее благоприятным режимом работы, обеспечивает максимальную эксплуатационную производительность добычной машины при минимальных удельных затратах энергии и динамических нагрузках в элементах приводов [179].

Существенное ограничение эксплуатационной производительности и, как следствие, эффективности использования комбайнов в очистных камерах обуславливается использованием транспортирующих машин циклического действия – шахтных самоходных вагонов. Зачастую уже при длине доставки более 60...70 м комбайн успевает заполнить бункер-перегрузатель и простаивает в ожидании самоходного вагона [91, 90]. Повышение технологического уровня организации работ в очистной камере возможно посредством применения средств непрерывного транспорта (передвижных

или телескопических конвейеров) или транспортированием руды от комбайна несколькими ШСВ [92].

#### **1.4.2 Общие сведения о нагруженности приводов комбайнов, функционирующих в условиях калийных рудников**

Достоверная оценка нагруженности приводов добычных комбайнов калийных рудников позволяет обосновать энергоэффективные режимы их работы и повысить качество добываемой руды по гранулометрическому составу. Исследование процесса формирования нагрузок приводов рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников представляет теоретический и практический интерес.

Существенный вклад в решение задачи исследования процессов формирования нагрузок в элементах приводов горных добычных машин внесли В. А. Бреннер, В. В. Габов, А. В. Докукин, А. Б. Жабин, С. К. Кабиев, Л. И. Кантович, Н. Г. Картавый, М. Д. Коломийцев, Ю. Д. Красников, Е. З. Позин, Р. Ю. Подэрни, В. М. Рачек, В. И. Солод, Л. И. Старков, Г. Д. Трифанов, Н. В. Чекмасов и др. [17, 15, 27, 42, 41, 49, 62, 66, 72, 146, 149, 160, 171].

Среди основных факторов, влияющих на нагруженность приводов и энергоэффективность функционирования проходческо-очистных комбайнов, отметим следующие.

1. Горно-геологические и горнотехнические условия работы комбайнов.
2. Физико-механические свойства разрушаемой руды.
3. Кинематика исполнительных органов комбайна.
4. Тип и состояние породоразрушающего инструмента.
5. Технический и технологический уровень организации работ в очистной камере.
6. Квалификация и психофизическое состояние операторов добычных и транспортирующих машин [189].

Мгновенная нагрузка на приводах рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов (рисунок 1.22) формируется тремя составляющими в соответствии с выражением (1.17)

$$P(T) = P_1(T) + P_2(T) + P_3(T), \quad (1.17)$$

где  $P(T)$  – мгновенное значение нагрузки в приводе комбайна;  $P_1(T)$  – составляющая нагрузки, определяемая физико-механическими свойствами разрушаемого пласта калийной руды;  $P_2(T)$  – составляющая нагрузки, определяемая кинематикой исполнительных органов и технологией работы комбайна;  $P_3(T)$  – составляющая нагрузки, определяемая режимными параметрами работы, в частности, скоростью подачи комбайна на забой [161, 162, 187].



Рисунок 1.22 – Формирование нагрузок в элементах приводов исполнительных органов комбайнов калийных рудников

Определение средних значений нагрузок приводов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников возможно посредством

использования математических зависимостей, изложенных в отраслевой методике ВНИИ «Галургии» [69, 123]. Однако следует отметить, что используемые в расчетах величины коэффициентов получены эмпирическим путём и характеризуются широкими диапазонами значений, что обуславливает ошибки при определении мгновенных нагрузок приводов добычных машин математическими методами.

В работах [58, 59, 60, 64, 72, 80] указывается, что корректная оценка нагруженности приводов горных добычных машин возможна посредством непрерывной регистрации активных мощностей электродвигателей комбайнов и скорости их подачи на забой. При этом в качестве показателей эффективности функционирования комбайна в заданный временной период принимают величины эксплуатационной производительности, удельных затрат энергии на добычу калийной руды, количество труднообогатимых мелких классов в добываемой руде, а также показатели, характеризующие технологический уровень использования комбайна в очистной камере [34].

Наиболее существенными особенностями процесса формирования нагрузок на элементах приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал» являются:

- зависимость величин и характера изменения нагрузок приводов от кинематики исполнительных органов и скорости подачи комбайна на забой;
- нестационарность статистических характеристик сил сопротивления на исполнительных органах, связанных с изменением параметров резания и сил сопротивления калийного массива разрушению.

Непрерывная регистрация и анализ информации о мгновенных нагрузках приводов проходческо-очистных комбайнов в процессе работы в условиях калийных рудников позволят разработать высокоэффективные и надежные добычные машины мехатронного класса.

### 1.5 Анализ статистики отказов и систем технического обслуживания и ремонта комбайнов калийных рудников

Данные специалистов сервисных и инженерно-технических служб горнодобывающих предприятий калийной отрасли России показывают, что наибольшее количество отказов проходческо-очистных комбайнов возникает по причине нарушения технологии ведения работ в очистной камере (31 %), некачественно или несвоевременно выполненного ремонта (29 % и 21 % отказов, соответственно), низкого качества запасных частей и деталей, закупаемых у сторонних поставщиков (рисунок 1.23) [180, 189].

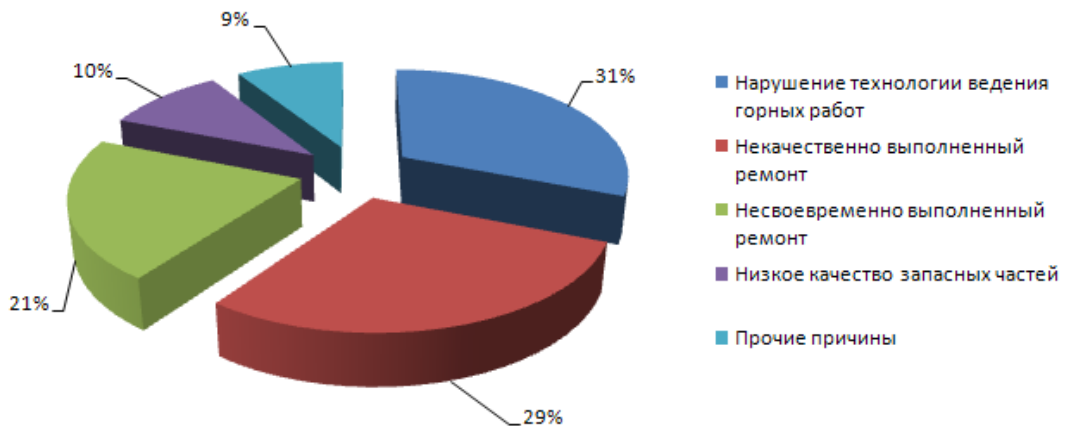


Рисунок 1.23 – Причины аварийных отказов комбайнов «Урал» на одном из рудников ВМКМС за период с 01.01.2018 по 31.12.2018

Основными причинами отказов механических трансмиссий проходческо-очистных комбайнов калийных рудников являются:

- работа неполным комплектом резцов или поврежденными резцами;
- нарушение нормативных режимов работы (превышение скорости подачи комбайна на забой, перегрузка электродвигателей);
- нарушение режима смазки, утечки смазочных материалов через уплотнения;
- некачественный монтаж и регулировка подшипниковых узлов, муфт, зубчатых зацеплений и т.п.



Отсутствие эффективных устройств демпфирования динамических нагрузок, систем контроля нагруженности и автоматического управления приводами комбайнов «Урал» является причиной существенной части отказов трансмиссий этих добычных машин. Наиболее частыми являются отказы, связанные с выходом из строя подшипников, выходных валов, конических шестерен поворотных редукторов планетарно-дисковых исполнительных органов, редукторов бермовых исполнительных органов и тихоходных редукторов конвейеров (таблица 1.4) [186].

Таблица 1.4 – Аварийные отказы редукторов комбайнов «Урал-20Р»

Наименование узла	Доля от общего числа аварийных отказов, %
Поворотный редуктор планетарно-дискового исполнительного органа	35,6
Редуктор бермового исполнительного органа	14,6
Тихоходный редуктор конвейера	14,5
Редуктор раздаточный планетарно-дискового исполнительного органа	9,7
Редуктор гусеничного хода	8,7
Редуктор конвейера быстроходный	5,7
Редуктор относительного вращения планетарно-дискового исполнительного органа	3,8
Редуктор отбойного устройства	2,9
Редуктор маслостанции	2,6
Редуктор переносного вращения планетарно-дискового исполнительного органа	1,9

Отказы электросистемы комбайнов «Урал» происходят вследствие следующих причин:

- нарушения изоляционных свойств обмоток и кабелей при отсыревании, загрязнении, нагреве и механических повреждениях;
- неудовлетворительного состояния контактных поверхностей;
- нарушения соединений в цепях управления.

Отказы гидросистемы комбайнов «Урал» чаще всего обусловлены отсутствием профилактического надзора, несвоевременным ремонтом узлов, повреждением трубопроводов, нерегулярной чисткой фильтров и масляных центробежных сепараторов, неправильной настройкой клапанов, вращением

вала приводного двигателя маслостанции в противоположную сторону, использованием некачественного или загрязненного маслом [161].

Нормативной документацией завода-изготовителя предусмотрено выполнение обслуживания и ремонтов комбайнов «Урал» с использованием планово-предупредительной системы (ППР) [163]. Структура ремонтного цикла комбайнов «Урал-20Р» включает ежемесячные ремонтные осмотры РО длительностью трое суток, текущие  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и капитальный К ремонты, и может быть представлена выражением (1.18)

$$P_{\text{ц}} = 12PO + 2T_1 + 2T_2 + T_3 + K. \quad (1.18)$$

Капитальный ремонт К проводится через 7200 ч работы (1 год эксплуатации), ремонты  $T_1$  – через 1200 ч,  $T_2$  – через 2400 ч,  $T_3$  – через 3600 ч.

Режимы работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников зачастую являются гораздо менее напряженными по сравнению с расчетными, используемыми заводами-изготовителями для составления графиков ППР. При выполнении плановых ремонтов нередко осуществляется замена деталей не до конца выработавших ресурс, что определяет увеличение затрат предприятий на сервис добычных машин [3, 4].

На рудниках ВМКМС используется система технического сервиса, предусматривающая выполнение ремонтно-восстановительных работ оборудования комбайновых комплексов силами машинистов и горнорабочих, осуществляющих его непосредственную эксплуатацию. Как правило, сотрудники подрядных организаций и ремонтных служб не привлекаются к выполнению ремонтных работ, что позволяет горнодобывающим предприятиям существенно снизить временные и материальные затраты на проведение технического обслуживания и ремонтов комбайнов.

По данным автора, такая система организации ремонтных работ обеспечивает снижение материальных затрат на сервис проходческо-очистных комбайнов до 7 раз по сравнению с выполнением планово-предупредительных ремонтов силами сотрудников ремонтно-механических

мастерских или подрядных организаций, однако обуславливает низкое качество при выполнении ремонтов гидравлических и электрических систем, осуществлении центровок, балансировочных и регулировочных работ, требующих привлечения высококвалифицированных специалистов [5, 186].

Освоение автоматизированных систем контроля нагруженности приводов и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников позволит достоверно оценивать наработку добычной машины и осуществлять расчет остаточного ресурса узлов и деталей комбайна. Прогноз остаточного ресурса будет тем точнее, чем более стандартизированы условия эксплуатации и ремонта комбайна [193].

Анализ регистрационных записей инженерно-техническими работниками горнодобывающего предприятия позволит получить полное представление о том, как эксплуатировался комбайн в течение рабочей смены, что позволяет определить неявные причины снижения эффективности ведения работ в очистной камере. Накопление статистических данных об отказах и соответствующих им диагностических признаках обуславливает возможность прогнозирования времени выхода узлов проходческо-очистных комбайнов из строя с высокой степенью вероятности, что обеспечивает работоспособность добычных машин, а также равномерную и обоснованную загрузку ремонтного персонала.

## **1.6 Выводы по главе 1**

1. Пласты калийно-магниевого руд представляют собой плотные кристаллические массивы с включением несолевых минералов, разрушение которых наиболее рационально осуществлять выемочными машинами с исполнительными органами режущего типа.

2. Эффективность разрушения калийно-магниевого руд оценивают по обобщенным показателям: удельным энергозатратам процесса разрушения и количеству пылевидных труднообогатимых классов в калийной руде. При этом, как правило, не учитывается физическая сущность процесса резания,

что затрудняет поиск неявных путей совершенствования исполнительных органов и рабочего инструмента проходческо-очистных комбайнов калийных рудников.

3. Принципиальные конструктивные схемы комбайнов калийных рудников не претерпели изменений с 70-х годов прошлого века, что определяет необходимость создания энергоэффективных добычных машин нового технического уровня.

4. Ручное управление добычных машин калийных рудников обуславливает нерациональные их режимы работы, что негативно сказывается на энергоэффективности процесса добычи руд, надежности комбайнов и устойчивости работы механизированных комплексов в целом.

5. Разработка высокоэффективных и надежных проходческо-очистных комбайнов калийных рудников мехатронного класса может быть реализована с учетом данных о нагруженности их элементов в процессе работы в реальных условиях эксплуатации.

На основании анализа структуры и свойств калийного массива, конструктивных особенностей и технологии использования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников сформулированы **задачи** исследования.

1. Проведение теоретических и экспериментальных исследований процесса разрушения калийного массива одиночным резцом и установление закономерностей процесса отделения последовательных элементарных сколов, составляющих срез, от калийного массива при разрушении резцами проходческо-очистных комбайнов.

2. Проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния режимных параметров процесса разрушения калийного массива резанием на величину и характер изменения нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент и приводы проходческо-очистных комбайнов.

3. Проведение теоретических и экспериментальных исследований по оценке эффективности работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников.

4. Проведение теоретических и экспериментальных исследований по выявлению закономерностей процесса формирования гранулометрического состава калийных руд, добываемых с использованием проходческо-очистных комбайнов.

5. Разработка методологии выбора энергоэффективных режимов работы и совершенствования оборудования проходческо-очистных комбайнов с учетом установленных закономерностей процесса отделения от калийного массива последовательных элементарных сколов, составляющих срез.

6. Разработка алгоритма управления приводами проходческо-очистных комбайнов, обеспечивающего снижение удельных затрат энергии на разрушение калийного массива резцами планетарно-дисковых исполнительных органов.

7. Обоснование новых технических решений по совершенствованию рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов, направленных на повышение эффективности процесса разрушения калийных руд.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КАЛИЙНЫХ РУД РЕЗЦАМИ ГОРНЫХ КОМБАЙНОВ

### 2.1 Обзор теорий прочности твердых тел

В научно-технической литературе под разрушением твердого тела понимают его хаотическое или направленное разделение на части [7, 12, 20, 165]. В первом случае требуется отделить от исходного твердого тела (массива) кусок произвольной формы, а во втором – важно разделить исходный объем твердого тела по строго заданным поверхностям или границам составляющих частей.

Разрушение твердых тел, происходящее вследствие зарождения и роста трещин, называют хрупким. Процесс хрупкого разрушения горных пород протекает, как правило, за весьма малые временные периоды и характеризуется соответствующей работой разрушения (удельными затратами энергии), величина которой определяется вязкопластическими свойствами горных пород, пределами упругости и прочности [23, 31].

Способность материала сопротивляться продвижению в нём трещины называют вязкостью. Процесс разрушения горных пород, имеющих большую прочность и высокую вязкость, характеризуется наибольшими удельными затратами энергии [24].

Процесс разрушения горных пород представляет собой многофакторный, случайный процесс зарождения и развития трещин. Отделение от массива элементарного объема породы (скола) происходит вследствие прорастания одной из трещин в предрезцовом пространстве и выхода её на свободную поверхность массива. Такая трещина называется магистральной [51].

Отмечено, что при увеличении скорости нагружения вязких горных пород увеличивается их склонность к хрупкому разрушению, так как уменьшается интенсивность развития процессов пластического деформирования породы в зоне развития трещин [8]. Указанное

обуславливает снижение удельных затрат энергии на разрушение горной породы [128].

Первые попытки создания научно-обоснованных теорий прочности твердых тел относятся к середине XIX века, когда в рамках развития молекулярно-кинетической теории пришло представление о твердых телах как о «конструкциях» из атомов, прочность которых должна определяться силами межатомного сцепления. Тогда же впервые были определены значения сил межатомного сцепления, что позволило рассчитать теоретическую прочность твердых тел (работы М. Борна, Дж. де Бура, Ф. Цвики) [76].

Рассчитанные значения теоретической прочности твердых тел были в сотни раз выше реальных значений, получаемых с использованием инструментальных методов измерений. Объяснение данного противоречия было дано в работах А. Гриффитса, который сформулировал гипотезу о том, что прочность твердых тел определяется в первую очередь не силами взаимодействия атомов, составляющих тело, а наличием в разрушаемом теле исходных дефектов – зародышей разрушения. Данная идея, получившая развитие в работах О. Орована и Г. Ирвина, лежит в основе современных представлений о механике хрупкого (трещинного) разрушения горных пород.

При моделировании процесса разрушения по Гриффитсу рассматривается упругое тело с трещиной площадью  $S_T$ . Развитие трещины (приращение площади её поверхности) на величину  $\delta S_T$  возможно за счет работы  $\delta A$  внешних сил, приложенных к телу. При этом упругая энергия тела уменьшается на величину  $\delta W$ , а поверхностная энергия трещины увеличивается на  $\delta \Pi$ . Величина  $\delta \Pi$  интерпретирована Гриффитсом как изменение поверхностной энергии тела. Энергетический критерий равновесного состояния трещины предложено определять выражением (2.1)

$$\delta(\Pi - W) = 0. \quad (2.1)$$

При  $\delta \Pi > \delta W$  происходит развитие трещины в теле, то есть трещина является устойчивой. При  $\delta \Pi < \delta W$  развитие трещины прекращается,

трещина неустойчива. Выражение (2.1) можно представить в виде зависимостей (2.2)

$$\gamma_{\text{п}} - \frac{\delta W}{\delta S_{\text{T}}} = 0; \quad \gamma_{\text{п}} = \frac{\delta \Pi}{\delta S_{\text{T}}}. \quad (2.2)$$

где  $\gamma_{\text{п}}$  – поверхностное натяжение, константа материала, характеризующая удельную работу разрушения межатомных связей идеально хрупкого и линейно-упругого материала, Дж/м<sup>2</sup>.

Значение разрывающего напряжения  $\sigma_G$  определяется выражением (2.3)

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{2E\gamma_{\text{п}}}{\pi(1-\nu^2)}}, \quad (2.3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга, ГПа.

Значение разрывающего напряжения  $\sigma$ , при котором возможно продвижение трещины, называется критическим напряжением. Таким образом, при  $\sigma > \sigma_G$  трещина растёт, а при  $\sigma < \sigma_G$  – нет [76, 165, 187].

Теоретические положения и зависимости, полученные А. Гриффитсом, могут быть применены для описания разрушения идеально хрупкого тела, процесса, характеризующегося малыми удельными затратами энергии и развивающегося автокаталитически при достижении заданного напряженного состояния тела. Однако рост трещин в кристаллических материалах всегда сопровождается неупругим деформированием, что учтено в работах Г. Ирвина.

Ирвин описал изменение напряженно-деформированного состояния в вершине трещины с учетом пластических деформаций и предложил определять свободную поверхностную энергию материала выражением (2.4)

$$\gamma_{\text{п}} = \gamma_{\text{хр}} + \gamma_{\text{пл}}, \quad (2.4)$$

где  $\gamma_{\text{хр}}$  – свободная поверхностная энергия материала, характеризующая работу хрупкого разрушения, Дж/м<sup>2</sup>;  $\gamma_{\text{пл}}$  – свободная поверхностная энергия материала, характеризующая работу пластического деформирования материала в вершине трещины, Дж/м<sup>2</sup>.



Механизм распространения трещин, описанный Ирвином, получил название квазихрупкого разрушения. При этом работа пластического деформирования материалов оказалась значительно больше работы хрупкого разрушения межатомных связей и определяется выражением (2.5)

$$\gamma_{\text{пл}} \approx 100\gamma_{\text{хр}}. \quad (2.5)$$

При квазихрупком разрушении скорость распространения трещины в разрушаемом материале описывается выражением (2.6)

$$v_{\text{max}} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{\gamma_{\text{к}}}}, \quad (2.6)$$

где  $\gamma_{\text{к}}$  – плотность разрушаемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Теория, созданная А. Гриффитсом, объяснила несоответствие теоретической и реальной прочности твердых тел. Однако, оставаясь в рамках этой теории, весьма проблематично описать ряд других закономерностей процесса разрушения: возникновение трещин, явление статической усталости материалов, постепенный рост трещин [128, 129].

Одновременно с работами А. Гриффитса выполнялись исследования О. Мора, сформулировавшего предположение, что промежуточное направление тензора напряжений не влияет на прочность материала, а предельное состояние возникает на площадках, которые всегда проходят через направления главного напряжения.

Теория прочности Мора широко используется в горной практике для расчета несущей способности целиков. В рамках данной теории возможно с удовлетворительной точностью представить свойства пород в виде паспортов прочности [7]. В то же время аналитические описания диаграмм О. Мора математически сложны и не имеют практического применения (работы К. В. Руппенеята, М. М. Протодьяконова-мл., ВНИМИ, ИГД им. Скочинского, ТПИ).

Основы кинетической теории прочности твердых тел заложены в 50-х годах XX века в работах академика С. Н. Журкова. В рамках данной теории принимается, что разрушение тела является сложным кинетическим

процессом, который развивается во времени под действием напряженно-деформированного состояния и лишь завершается появлением трещины и разделением твердого тела на части. Фундаментальным понятием кинетической теории является температурно-временная зависимость прочности (2.7)

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma_v \sigma_p}{kT}\right), \quad (2.7)$$

где  $t_p$  – время от момента приложения нагрузки до разрушения твердого тела (долговечность материала под нагрузкой), с;  $t_0$  – период тепловых флуктуаций,  $t_0 \approx 10^{-14} \dots 10^{-13}$  с;  $U_0$  – начальная энергия разрушения, Дж;  $\gamma_v$  – коэффициент активационного объёма, м<sup>3</sup>/моль;  $\sigma_p$  – предел прочности материала на растяжение, Па;  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – температура разрушаемого тела, К;  $kT$  – мера энергии тепловых флуктуаций [51, 54, 134, 142, 196].

Всё большее число особенностей процесса разрушения горных пород устанавливается по мере совершенствования техники эксперимента и контрольно-измерительного оборудования. В настоящее время не существует универсальной теории прочности ввиду сложности математического описания и экспериментального подтверждения закономерностей процесса разрушения горных пород. Практическое применение нашли теории прочности, отражающие только основные особенности процесса разрушения горных пород.

## **2.2 Анализ представлений о процессе разрушения калийной руды резцами горных комбайнов**

### **2.2.1 Анализ положений теории разрушения горных пород резанием**

В отечественной науке основной вклад в изучение процесса разрушения углей и горных пород резанием внесли Л. И. Барон, А. И. Берон, В. Н. Гетопанов, В. З. Деветьев, С. К. Кабиев, В. З. Меламед, Е. З. Позин,

М. М. Протодяконов, Д. М. Светличный, А. Б. Соболев, В. И. Солод, В. В. Тон и др. [9, 13, 31, 38, 62, 107, 109, 117, 132, 147]. Результаты их исследований легли в основу экспериментально-статистической теории резания горных пород.

Аналитическая теория резания углей и горных пород разработана М. И. Слободкиным. В его работе [143] приведены основные зависимости, описывающие работу режущих исполнительных органов горных комбайнов. Там же впервые рассмотрен процесс формирования крупных сколов, отделяемых от массива резцами добычных машин; предложены математические формулы для расчета силовых и энергетических параметров процесса резания углей на основе их прочностных характеристик. Идеи М. И. Слободкина получили развитие в трудах В. А. Бреннера, А. Б. Жабина, Н. М. Качурина, А. В. Полякова, В. В. Семёнова, И. Г. Шмакина [17, 15, 48, 49, 135, 140, 136].

В соответствии с современными представлениями процесс разрушения горных пород резанием является случайным, многофакторным процессом чередования фаз контактного дробления породы и образования крупных элементарных сколов [31].

При внедрении резца в горный массив в предрезцовом пространстве возникают высокие контактные напряжения, сконцентрированные в малом объеме. По мере дальнейшего перемещения резца и нарастания напряжений начинается процесс дробления породы и образования на передней грани резца ядра уплотнения.

Ядро уплотнения состоит из мелкодисперсной объемно-сжатой породы и имеет ярко выраженную зонную структуру, включающую застойную зону (внутри данной зоны нет перемещения раздробленной породы) и движущуюся часть, удаляемую из предрезцового пространства при отделении от массива небольших сколов.

Дальнейшее внедрение резца в массив обуславливает увеличение площади контакта передней грани резца с породой и нарастание усилий,

необходимых для дробления разрушаемого материала. Создаются условия для отделения от массива небольших сколов и связанного с этим частичного уменьшения силы резания, что подтверждается экспериментально, на основе полученных осциллограмм сил резания (рисунок 2.1) [13, 24, 109].

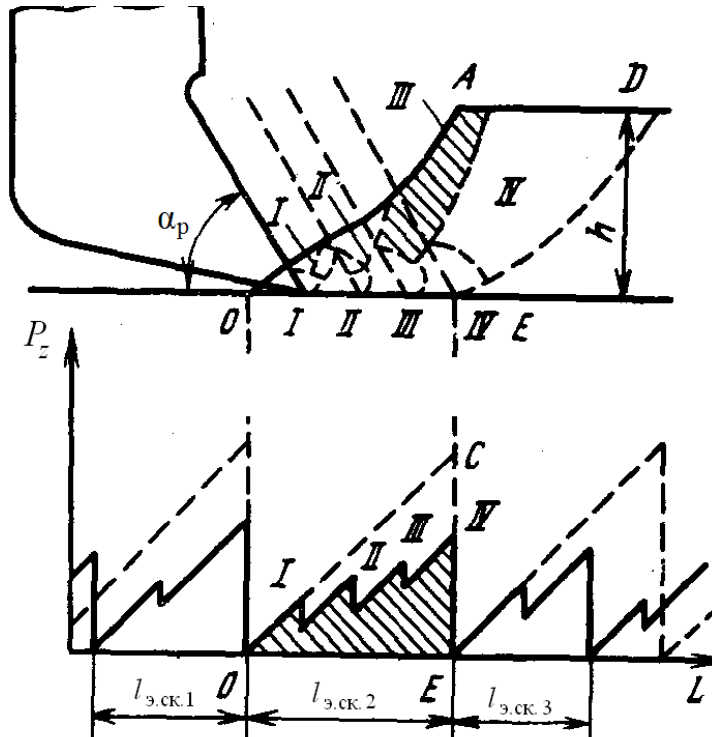


Рисунок 2.1 – Схема процесса разрушения горной породы одиночным резцом:

$P_z$  – сила резания;  $\alpha_p$  – угол резания;  $l_{э.ск}$  – длина элементарного скола

При заданной величине заглубления резца в массив в зоне напряженно-деформированного состояния возникают предельные напряжения, обуславливающие образование и развитие магистральной трещины и отделение от массива крупного элементарного скола по трем плоскостям скалывания: двум боковым и одной нижней. Усилие резания снижается от максимального значения до близкой к нулю величине.

Отделение крупного скола от разрушаемого массива происходит по плоскостям наименьшего сопротивления. Существенное влияние на процесс образования и развития магистральной трещины оказывают микродефекты (микротрещины, границы зёрен, газовые включения), находящиеся в зоне напряженно-деформированного состояния породы, формируемой резцом.

При излишне больших углах резания или весьма вязких породах отделение элементарного скола от массива может осуществляться вследствие развития трещины поперечного сдвига. Параметры резца определяют форму и объем мелкодисперсной породы в ядре уплотнения (рисунок 2.2) [14].

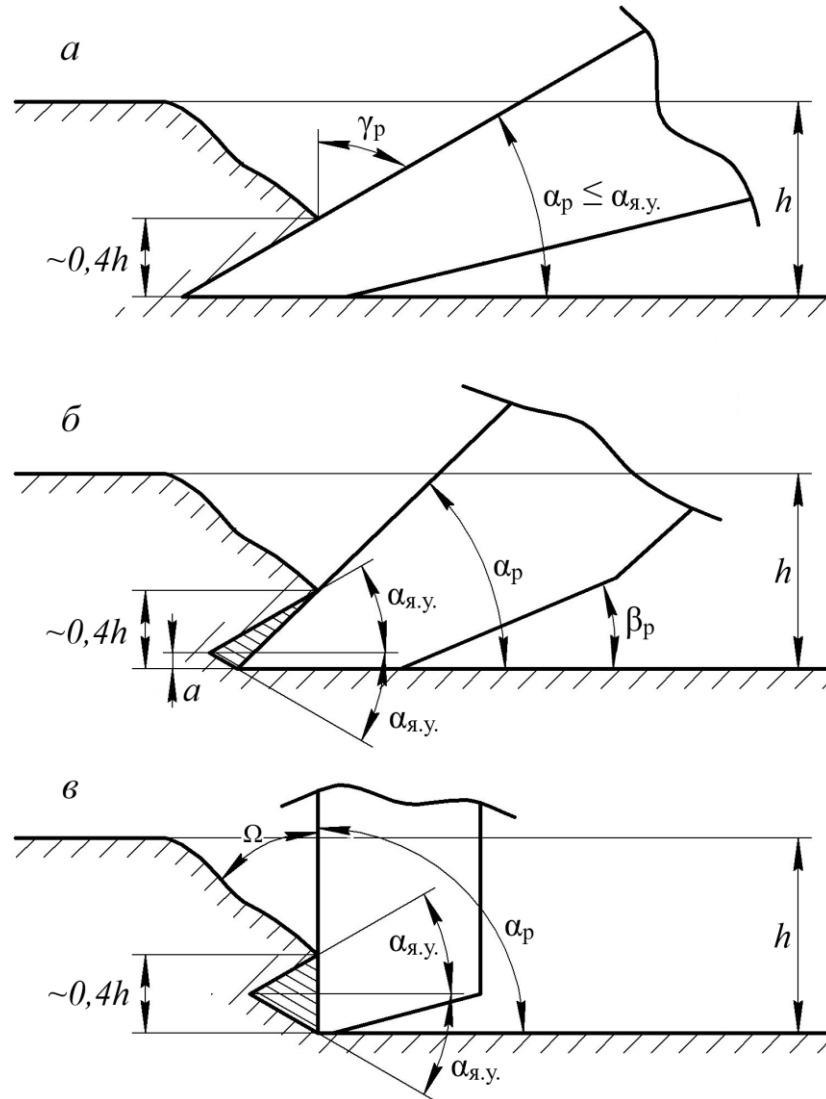


Рисунок 2.2 – Изменение формы и объема ядра уплотнения в зависимости от параметров резцов [122]

Ядро уплотнения имеет клиновидную форму с углом образования сторон  $\alpha_{я.у.}$ , равным по величине углу внутреннего трения разрушенной породы (для калийной руды  $\alpha_{я.у.} = 25...40^\circ$ ). Таким образом, наименьший объем ядра уплотнения при разрушении горного массива обеспечивается при использовании резца с малым углом резания  $\alpha_p \leq \alpha_{я.у.}$  [122].

Силы, действующие на контактные поверхности резца в процессе разрушения горной породы, носят переменный характер, имеют максимум в области, прилегающей к режущей кромке, и уменьшаются при удалении от кромки резца по гиперболическим зависимостям. Распределённые силы при выполнении расчетов обычно заменяют сосредоточенными в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.3.

Нормальная сила  $N_{\pi}$  и сопротивление трению  $\mu N_{\pi}$  действуют на переднюю грань резца. Равнодействующая  $R_{\pi}$  данных сил раскладывается на сопротивление резанию передней гранью резца  $P_z$  (сила резания) и сопротивление подачи резца  $Y_2$ .

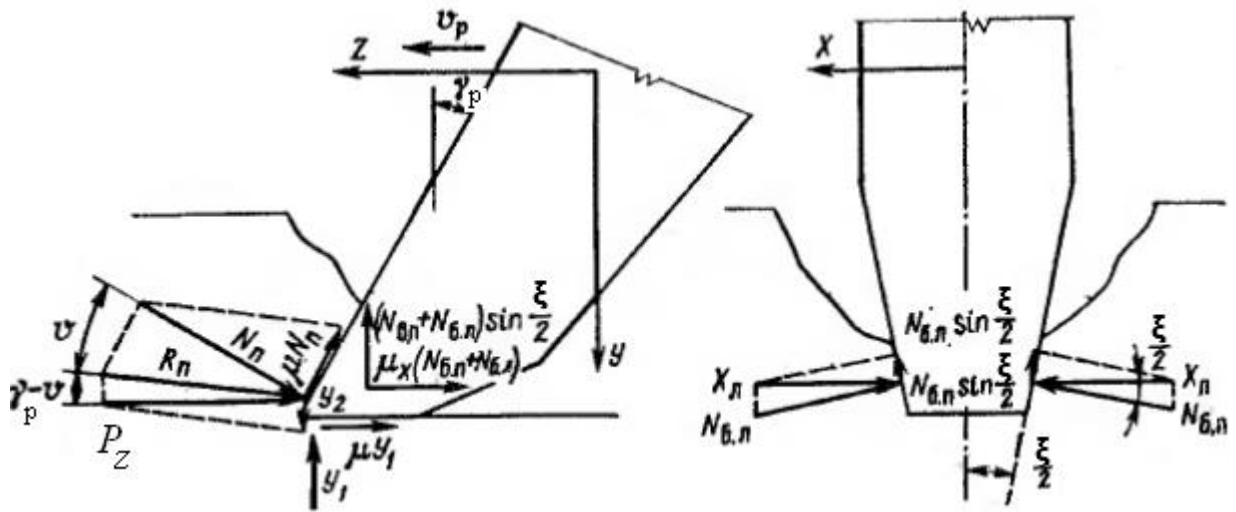


Рисунок 2.3 – Схема сил, действующих на резец

Сила резания  $P_z$  является геометрической суммой проекций на ось  $OZ$  равнодействующих сил по боковым и передней граням резца. Также при выполнении исследований принято определять силу подачи  $P_y$  и боковые силы  $P_x$  в соответствии с выражениями (2.8)–(2.10)

$$P_z = N_{\pi} (\cos \gamma_p + \mu \sin \gamma_p) + \mu_y Y_1 + \mu_x (N_{b.p.} + N_{b.l.}); \quad (2.8)$$

$$P_y = Y_1 \pm N_{\pi} (\sin \gamma_p - \mu \cos \gamma_p) + (N_{b.p.} + N_{b.l.}) \sin \left( \frac{\xi}{2} \right); \quad (2.9)$$

$$P_x = (N_{b.p.} + N_{b.l.}) \cos \left( \frac{\xi}{2} \right), \quad (2.10)$$

где  $Y_I$  – сила, отжимающая резец от массива, Н;  $N_{б.п.}$  и  $N_{б.л.}$  – силы, действующие по нормали, соответственно к правой и левой боковым поверхностям резца, Н;  $\xi$  – угол между боковыми поверхностями резца, град;  $\gamma_p$  – передний угол резца, град;  $\mu$  – коэффициент трения разрушенной породы о переднюю грань резца;  $\mu_y$  и  $\mu_x$  – коэффициенты трения задней и боковых поверхностей резца о породу [13, 109].

Процесс разрушения горного массива одиночным резцом сопровождается зарождением и развитием трещин, на распространение которых существенное влияние оказывают имеющиеся в массиве нарушения естественного или искусственного (техногенного) происхождения. Наличие зародышей разрушения в горном массиве определяет нестабильность геометрических параметров, формы и частоты реализации крупных сколов, поэтому в рамках экспериментально-статистической теории резания горных пород процесс разрушения рассматривают как многофакторный и случайный, математически описываемый соответствующими статистическими характеристиками [21, 54, 77].

Величина удельных затрат энергии процесса разрушения горной породы резцами добычной машины зависит от физико-механических свойств разрушаемой породы, геометрии и степени износа резцового инструмента, а также глубины и степени взаимного влияния резов [32, 131, 165]. При реализации блокированных резов с выровненной поверхности массива одиночным резцом с эталонными параметрами (ширина режущей кромки 20 мм, угол резания  $50^\circ$ , задний угол  $10^\circ$ , плоская передняя грань, угол между боковыми поверхностями  $0^\circ$ ) сила резания определяется выражением (2.11)

$$P_Z = A_p h, \quad (2.11)$$

где  $P_Z$  – сила резания, Н;  $A_p$  – сопротивляемость породы резанию, Н/мм;  $h$  – глубина реза, мм.

Удельные затраты энергии на разрушение горного массива одиночным резцом рассчитываются по формуле (2.12)

$$H_w = \frac{P_z L_{уд}}{3,6\gamma_k}, \quad (2.12)$$

где  $H_w$  – удельные затраты энергии на разрушение массива резанием, кВт·ч/т;  
 $L_{уд}$  – удельный путь резания, км/м<sup>3</sup>, определяемый выражением (2.13)

$$L_{уд} = \frac{L\gamma_k}{G}, \quad (2.13)$$

где  $L$  – длина реза, м;  $G$  – масса продуктов разрушения, кг;  $\gamma_k$  – плотность породы в массиве, т/м<sup>3</sup>.

Удельные затраты энергии при разрушении породы одиночным резцом складываются из следующих составляющих:

- диспергирование породы в предрезцовом пространстве, неупругие деформации породы – свыше 50 % затрат энергии;
- диспергирование и неупругое деформирование породы боковыми и задней поверхностями резца – свыше 20 % затрат энергии;
- образование магистральных трещин и отделение от массива последовательных элементарных сколов – менее 2 % затрат энергии;
- упругие деформации породы в предрезцовом пространстве, резца и элементов привода резца – менее 3 % затрат энергии [51, 108, 150, 168, 208].

То есть затраты энергии на диспергирование и пластическое деформирование породы резцом несоизмеримо высоки по сравнению с энергозатратами на образование магистральных трещин и отделение от массива крупных сколов породы.

Изложенное выше позволяет сформулировать положения, которые легли в основу дальнейшего исследования.

1. Разрушение твердых и необводненных горных пород осуществляется последовательными элементарными сколами, однако в типовых методиках расчета силовых показателей процесса резания данное явление никак не учитывается.

2. Удельные затраты энергии на диспергирование и неупругое деформирование породы, трение режущего инструмента о разрушаемый



массив несоизмеримо велики по сравнению с энергозатратами на развитие магистральных трещин и отделение от массива крупных элементарных сколов.

3. Процесс разрушения горной породы резанием, при котором отношение объема дробимой породы к объему крупных элементарных сколов минимально, характеризуется наименьшими удельными затратами энергии. Данный критерий следует принять основным при оценке энергоэффективности процесса разрушения калийных руд резанием [16, 26].

### **2.2.2 Анализ процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийного массива одиночным резцом**

Разрушение калийной руды резцами горных комбайнов является сложным многофакторным процессом чередования фаз контактного дробления руды и отделения от массива крупных элементарных сколов. Данный процесс является квазихрупким, сопровождается пластическим деформированием руды контактными поверхностями резца и интенсивным трещинообразованием.

Анализ графика изменения силы резания при разрушении калийной руды одиночным резцом (рисунок 2.4) позволяет охарактеризовать каждую из фаз формирования последовательного элементарного скола в срезе [31].

Процесс формирования последовательных сколов носит циклический характер. Время протекания каждого цикла  $t_{ц}$  характеризуется периодами нарастания и спада силы резания и состоит из следующих фаз:

- фаза зачистки – дробление руды при внедрении резца в массив (см. рисунок 2.4, участок I-II);
- формирование ядра уплотнения и пластическое деформирование руды (участок III-IV);
- спад силы резания при отделении от массива мелких сколов калийной руды (участки II-III и IV-V);

– образование и ветвление микротрещин, нарастание силы резания до пикового значения (участок V-VI);

– образование и развитие магистральной трещины, отделение от массива крупного элементарного скола и спад силы резания до минимального значения (участок VI-VII).

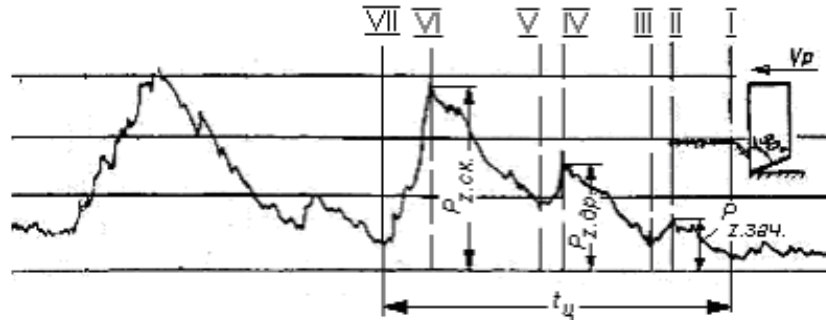


Рисунок 2.4 – Изменение силы резания при разрушении калийного массива  
одиночным резцом

Удельные затраты энергии разрушения калийной руды одиночным резцом зависят не только от шага резания и толщины стружки (абсолютных параметров стружки), но и от особенностей процесса формирования последовательных элементарных сколов, составляющих срез [187, 208].

При внедрении резца в калийный массив (рисунок 2.5) образуются площадки контакта: передняя, которой резец дробит и скалывает породу; задняя и боковые, которыми резец деформирует и диспергирует руду на вновь образуемых поверхностях разрушения.

Площадь передней площадки контакта определяется по формуле (2.14):

$$S_{\text{п}} = \frac{h_{\text{x,max}}}{\cos \gamma_{\text{p}}} b_{\text{p}} k_{\text{ф}}, \quad (2.14)$$

где  $h_{\text{x,max}}$  – высота площадки контакта с рудой по передней грани резца, мм;  $b_{\text{p}}$  – ширина режущей кромки, мм;  $k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы, учитывающий влияние формы режущей кромки и передней грани резца на величину площадки контакта.

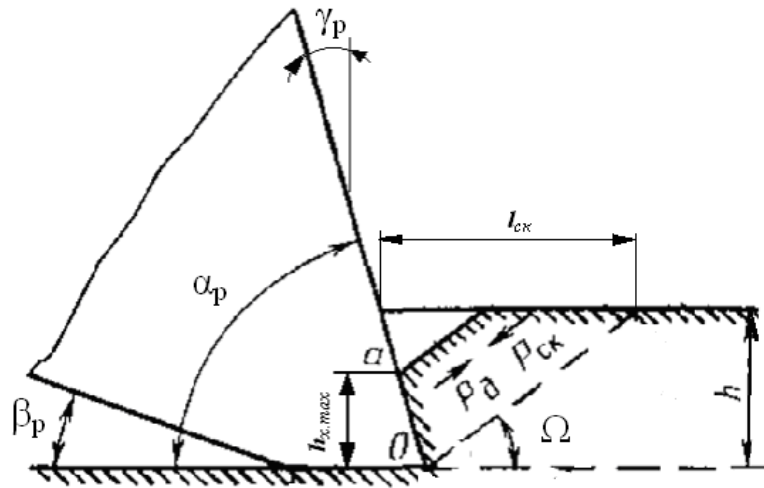


Рисунок 2.5 – Схема формирования элементарного скола калийной руды

Высота площадки контакта резца с рудой циклически изменяется в процессе резания от нуля до некоторого максимального значения  $h_{x,max}$ , соответствующего моменту отделения от массива крупного элементарного скола. При этом усилие  $P_{ск}$ , необходимое для отделения крупного скола от рудного массива, становится равным усилию дробления руды  $P_{др}$

$$P_{ск} = P_{д}. \quad (2.15)$$

Отметим, что чем раньше выполняется условие (2.15) при формировании последовательных элементарных сколов, тем ниже будут удельные затраты энергии на разрушение калийного массива в целом.

Одним из факторов, определяющих величину силовых и энергетических показателей процесса формирования последовательных элементарных сколов, является форма режущей кромки и передней грани резца, что показано ниже (см. подраздел 2.3.1).

Отделение каждого крупного скола от калийного массива реализуется по трем плоскостям разрушения: нижней и двум боковым. Направление плоскостей разрушения определяется углом скола и углами бокового развала соответственно. Согласно [137], при определении параметров последовательных элементарных сколов значения данных углов принимаются постоянными. Однако при распространении магистральной трещины в разрушаемом калийном массиве напряженное состояние в её

вершине непрерывно изменяется, что на практике обуславливает образование поверхностей разрушения сложных форм, вогнутых или выпуклых в сторону открытых поверхностей.

В работе [140] приводится полуэмпирическая формула (2.16) для расчета значений угла скола при разрушении калийной руды одиночным резцом с плоской передней гранью резами с выровненной поверхности

$$\Omega = 97,8 - \mu(24,3 + 0,175\alpha_p) - 0,61\alpha_p, \quad (2.16)$$

где  $\Omega$  – угол скола, град;  $\mu$  – коэффициент трения калийной руды по передней поверхности резца;  $\alpha_p$  – угол резания, град.

По данным [138, 140] при разрушении калийной руды одиночным резцом с плоской передней гранью значение коэффициента трения  $\mu = 0,46$ . В соответствии с выражением (2.16) для эталонного резца с углом резания  $\alpha_p = 50^\circ$  значение угла скола  $\Omega = 52,2^\circ$ .

Величина угла бокового развала (рисунок 2.6) зависит от вязкости разрушаемой калийной руды и рассчитывается по формуле (2.17)

$$\psi = 90 - \psi_0 - 9h^{2/3}, \quad (2.17)$$

где  $\psi$  – угол бокового развала, град.;  $\psi_0$  – коэффициент вязкости калийной руды, град,  $\psi_0 = 25 \dots 30^\circ$ .

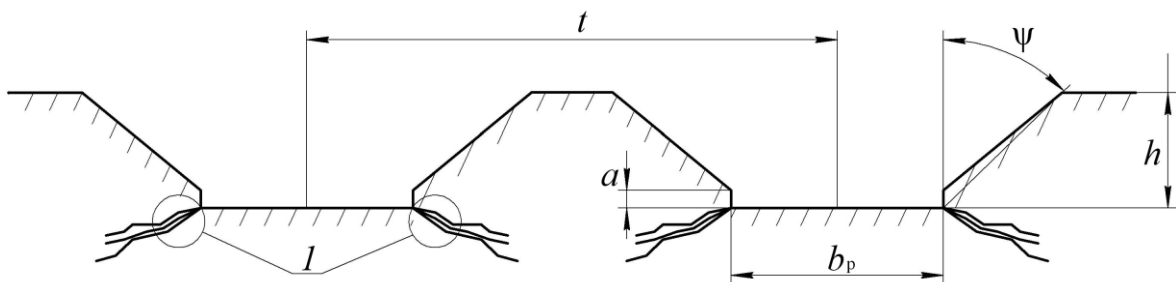


Рисунок 2.6 – Поперечное сечение резов

Таким образом, при резании с выровненной поверхности площадь сечения реза определяется параметрами резца, толщиной стружки и хрупко-пластическими свойствами разрушаемого калийного массива, рассчитывается по формуле (2.18)

$$S_p = b_p h + h^2 \operatorname{tg} \psi, \quad (2.18)$$

где  $S_p$  – площадь сечения реза,  $\text{мм}^2$  [39].

При разрушении вязкой калийной руды резцом с прямоугольной режущей кромкой боковой развал реза образуется не на всю глубину. Боковые поверхности пересекаются с дном реза под прямым углом и характеризуются наличием выраженного изгиба на расстоянии  $a$  от дна реза (см. рисунок 2.6). На дне реза формируется слой нарушенной руды толщиной до 2 мм.

Области пересечения боковых и нижних поверхностей резцов характеризуются наличием зон концентрации наведенных трещин, расположенных под углом  $10 \dots 30^\circ$  к плоскости резания (см. рисунок 2.6, поз. 1). Длина наведенных трещин составляет  $5 \dots 10$  мм и может быть рассчитана по формуле (2.19)

$$c = \frac{2,25b_p}{10^r} - 0,5b_p, \quad (2.19)$$

где  $c$  – средняя длина сконцентрированных по краям резцов наведенных трещин, мм [150].

Величина безразмерного параметра  $r$  рассчитывается по формуле (2.20)

$$r = \frac{(0,5b_p)^{1,5} \frac{H}{\sigma_{\text{дл}}} K_{1c}}{2,3P_z \sin \varphi}, \quad (2.20)$$

где  $H$  – твёрдость калийной руды по Виккерсу,  $H = 34 \dots 50 \text{ HV}$ ;  $\sigma_{\text{дл}}$  – предел длительной прочности калийной руды,  $\sigma_{\text{дл}} = 11,1 \text{ МПа}$ ;  $K_{1c}$  – вязкость разрушения калийной руды,  $K_{1c} = 3,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ ;  $P_z$  – сила резания, Н;  $\varphi$  – угол заострения резца, град.

По результатам исследований, приведенных в работе [168], наиболее выраженные наведенные трещины в калийной руде образуются при использовании резцов с прямоугольной режущей кромкой шириной  $b_p = 3 \dots 8$  мм, с углом заострения  $\varphi = 45 \dots 140^\circ$ .

Анализ процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийных руд резанием позволяет сделать следующие выводы.

1. Процесс резания калийной руды представляет собой циклическое чередование фаз контактного дробления и отделения от массива крупных сколов. Повышение энергоэффективности каждой фазы в цикле определяет увеличение эффективности процесса разрушения в целом.

2. Уменьшение доли энергозатратных процессов пластического деформирования и диспергирования руды в предрезцовом пространстве и интенсификация процессов, способствующих образованию и развитию магистральных трещин при образовании каждого последовательного элементарного скола, обусловят существенное повышение энергоэффективности процесса разрушения калийных руд резанием.

3. Формирование траектории движения магистральной трещины и снижение доли релаксационных процессов, происходящих в вершине трещины при её развитии обусловят снижение удельных затрат энергии на разрушение калийного массива и позволят осуществлять разрушение массива элементарными сколами заданной формы и крупности.

4. Существенное повышение энергоэффективности процесса разрушения калийного массива возможно посредством наиболее полного использования в процессе разрушения имеющихся в массиве стартовых трещин и ослаблений, в том числе наведенных трещин, локализованных вдоль пересекающихся поверхностей резов.

5. Рациональное расположение зон концентрации наведенных трещин позволит оказывать определяющее влияние на процесс образования и развития магистральной трещины при отделении от калийного массива крупных элементарных сколов.

## 2.3 Влияние схем резания калийной руды на процесс формирования последовательных элементарных сколов и нагруженность резцов

### 2.3.1 Общие сведения о влиянии схем резания на процесс разрушения калийной руды резцами горных комбайнов

Процесс разрушения калийной руды резцами добычных машин имеет целью отделение от массива элементарных сколов руды, удобных по своему фракционному составу для погрузки, транспортирования и дальнейшей переработки.

Традиционно в технической литературе в зависимости от толщины стружки  $h$ , шага резания  $t$  и взаимного расположения поверхностей разрушения различают следующие схемы резания (рисунок 2.7):

- блокированное и полублокированное резание (см. рисунок 2.7, а, б);
- резание с выровненной поверхностью (см. рисунок 2.7, в);
- свободное резание (см. рисунок 2.7, г);
- повторное резание с поверхности (см. рисунок 2.7, д);
- последовательная схема резания (см. рисунок 2.7, е);
- шахматная схема резания (см. рисунок 2.7, ж).

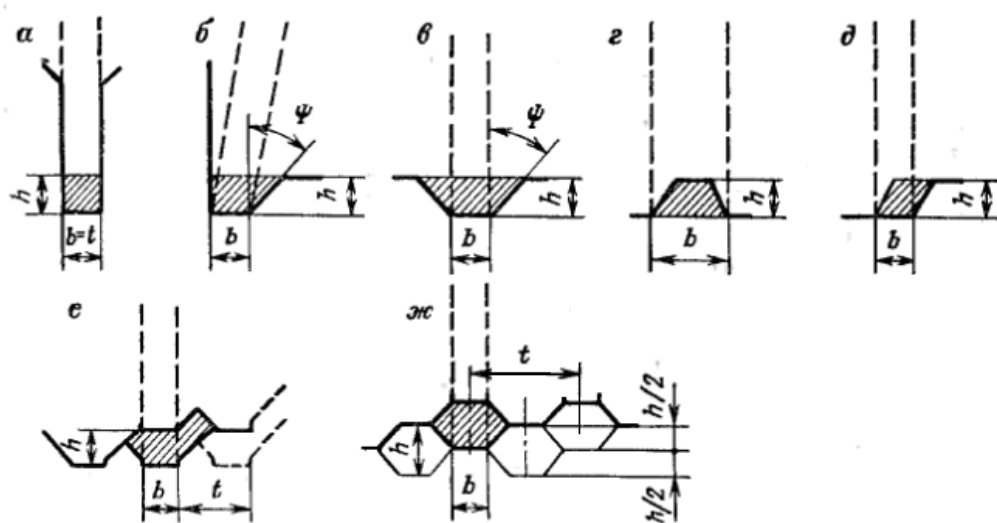


Рисунок 2.7 – Традиционные схемы резания

Утверждается, что наиболее энергоэффективно процесс разрушения калийной руды реализуется шахматными, последовательными и тангенциальными резами. Реализация заблокированного и полублокированного резания обуславливает низкую энергоэффективность разрушения калийного массива [77, 85, 131, 146, 206].

Последовательная схема резания характеризуется односторонним обнажением забоя и отсутствием опережения между соседними резами в направлении подачи комбайна. Параметры последовательных элементарных сколов, составляющих срез, нестабильны, что обуславливает измельчение руды (увеличивается количество труднообогатимых пылевидных классов в добываемой руде) и увеличение удельных затрат энергии на разрушение калийного массива (рисунок 2.8, а, б).

При реализации шахматной схемы резания (см. рисунок 2.7, ж) один из двух соседних резов является опережающим в направлении подачи исполнительного органа комбайна на половину толщины стружки [131]. Резцы комбайна разрушают целики, оставшиеся между резами предыдущего слоя, и создают поверхность забоя сложной геометрической формы с расположенными на ней параллельными зонами концентрации напряжений и локализации наведенных трещин.

Рациональный шаг резания  $t$  при использовании шахматной схемы подбирается из условия наиболее полной реализации в процессе разрушения стартовых трещин и ослаблений, сформированных на поверхности калийного массива резами предыдущего слоя. Таким образом, боковые поверхности элементарных сколов, составляющих срез, формируются в зонах локализации трещиноватостей и напряжений, то есть осуществляется активное влияние на параметры последовательных элементарных сколов в их поперечном сечении, что положительно отражается на энергоэффективности процесса разрушения и гранулометрическом составе добываемой руды (рисунок 2.8, в, г).



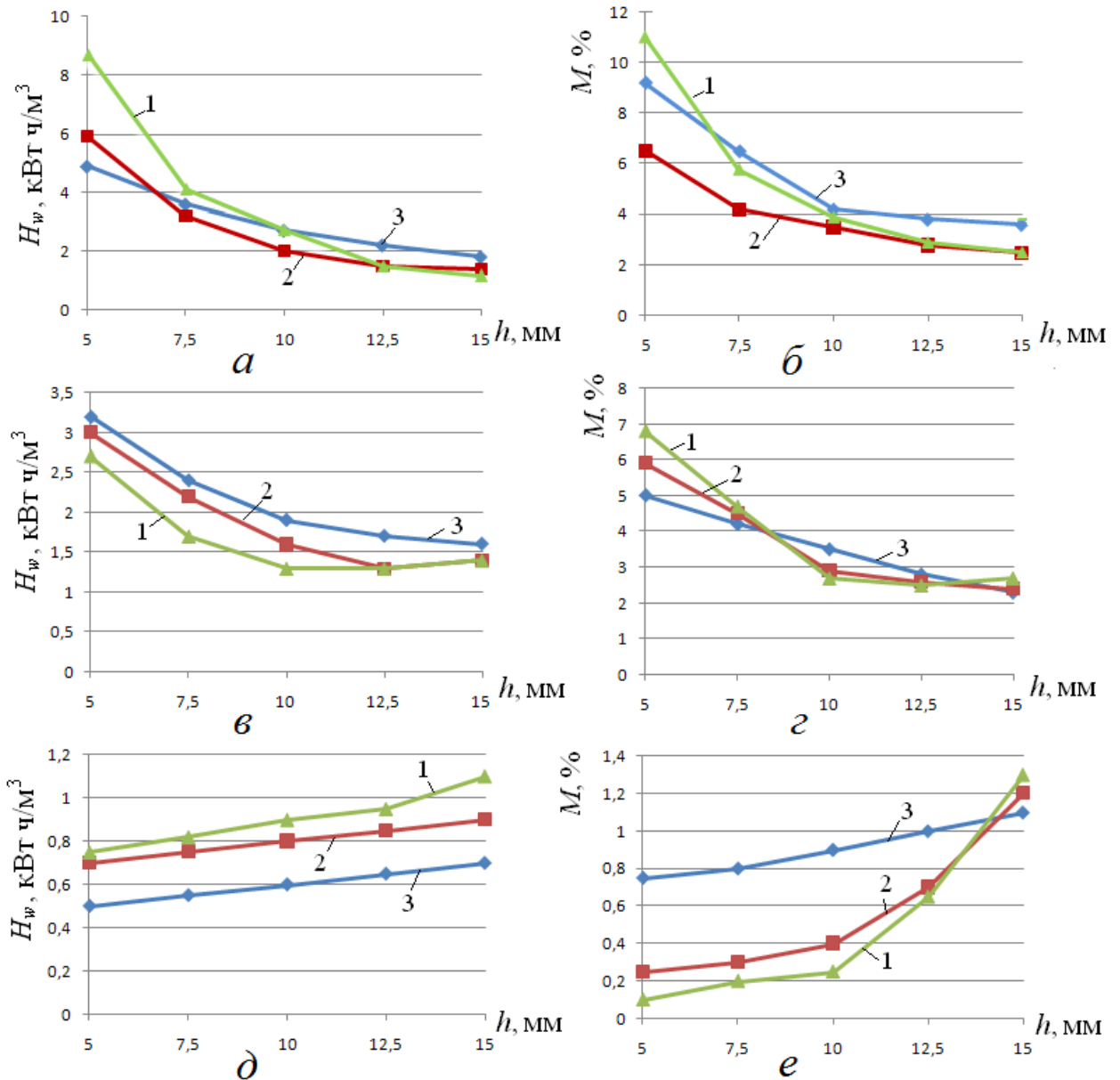


Рисунок 2.8 – Изменение показателей процесса разрушения калийного массива последовательными (*a*, *б*), шахматными (*в*, *г*) и перекрестными (*д*, *е*) резами от толщины стружки [150, 167]: *a* – изменение удельных затрат энергии при разрушении блоков калийной руды последовательными резами; *б* – изменение количества труднообогатимых классов при разрушении блоков калийной руды последовательными резами; *в* – изменение удельных затрат энергии при разрушении блоков калийной руды шахматными резами; *г* – изменение количества труднообогатимых классов при разрушении блоков калийной руды шахматными резами; *д* – изменение удельных затрат энергии при разрушении блоков калийной руды перекрестными резами; *е* – изменение количества труднообогатимых классов при разрушении блоков калийной руды перекрестными резами; 1 – шаг резания  $t = 50$  мм; 2 – шаг резания  $t = 40$  мм; 3 – шаг резания  $t = 30$  мм (резец PC-14)

Согласно результатам исследований, приведенным в [77, 133, 135], значение рационального шага резания  $t_{\text{рац}}$ , при котором процесс разрушения калийного массива шахматными резами будет характеризоваться максимальной энергоэффективностью и наибольшим количеством обогатимых классов в добываемой руде, определяется выражением (2.21)

$$t_{\text{рац}} = b_p + (1,8...2,8)htg\psi \approx (2...4)h, \quad (2.21)$$

где  $t_{\text{рац}}$  – рациональный шаг резания, мм [187].

В технической литературе диапазон рациональных значений параметров резания калийного массива принято задавать отношением шага резания к толщине стружки  $t/h$ . Исходя из выражения (2.21), рациональное отношение  $t/h=2...4$ .

Высокая скученность резов при  $t/h < 2$  обуславливает уменьшение площади поперечного сечения стружки и увеличение пылеобразования при разрушении калийного массива. Малые отношения  $t/h$  наименее благоприятны при использовании резцов с прямоугольной режущей кромкой, так как разрушение рудного массива происходит с практически выровненной поверхности забоя последовательными элементарными сколами малого объема.

Увеличение  $t/h > 4$  характеризуется уменьшением взаимного влияния резов друг на друга. Последовательные элементарные сколы, отделяемые от массива, формируются с образованием поверхностей «долома», получают вытянутую «лещадную» форму, что обуславливает высокую вероятность их повторного дробления при погрузке и транспортировании руды.

На основании анализа результатов исследований, приведенных в [77, 122], значение угла бокового развала резов  $\psi$  изменяется от величины  $t/h$  (в диапазоне  $0 < t/h < 7,2$ ) согласно зависимости (2.22) и рисунку 2.9

$$\psi = -0,4(t/h)^2 - 0,62(t/h) + 89. \quad (2.22)$$

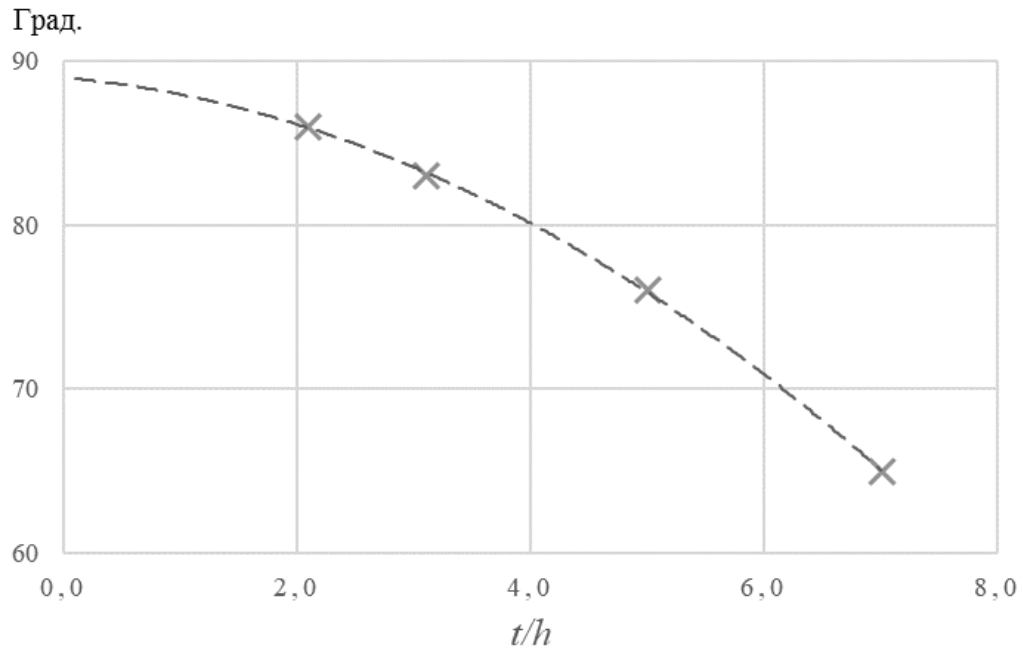


Рисунок 2.9 – Изменение угла бокового развала  $\psi$  в зависимости от величины  $t/h$  при шахматной схеме резания

Сила резания на одиночном неповоротном резце добычной машины при разрушении калийной руды рассчитывается по формуле (2.23)

$$P_Z = A_p h k_{t/h} k_b k_\alpha k_{\text{зат}} k_\phi k_\lambda, \quad (2.23)$$

где  $P_Z$  – сила резания на одиночном неповоротном резце, Н;  $A_p$  – сопротивляемость калийной руды резанию, Н/мм;  $h$  – глубина реза, мм;  $k_b$  – коэффициент ширины режущей кромки резца;  $k_{t/h}$  – коэффициент степени блокированности реза;  $k_{\text{зат}}$  – коэффициент затупления резца;  $k_\alpha$  – коэффициент угла резания;  $k_\lambda$  – коэффициент ориентации резца;  $k_\phi$  – коэффициент формы передней грани резца.

Коэффициент ширины режущей кромки резца рассчитывается по формуле (2.24)

$$k_b = 0,16 + 0,042b_p \quad (2.24)$$

где  $b_p$  – расчетная ширина режущей кромки резца, мм, определяется по ОСТ 12.44.258-84 [69].

Коэффициент степени блокированности реза рассчитывается по формуле (2.25)

$$k_{t/h} = \frac{\sqrt{64,8 - \left(\frac{t}{h} - 7,2\right)^2}}{5}. \quad (2.25)$$

При  $t/h > 7,2$  резы являются заблокированными (взаимное влияние соседних резов отсутствует), коэффициент степени блокированности реза  $k_{t/h} = 1$ .

Коэффициент затупления реза определяется выражением (2.26)

$$k_{\text{зат}} = 1 + 0,01S_{\text{зат}}, \quad (2.26)$$

где  $S_{\text{зат}}$  – площадь проекции площадки притупления задней грани реза на плоскость резания, мм<sup>2</sup>.

Коэффициент угла резания рассчитывается по формуле (2.27)

$$k_{\alpha} = 0,55 + 0,009\alpha_p. \quad (2.27)$$

Резцы на планетарно-дисковых исполнительных органах проходческо-очистных комбайнов устанавливаются с некоторым углом разворота  $\lambda_p$ , который учитывается при расчете силы резания  $P_z$  посредством введения в формулу (2.23) коэффициента ориентации реза, определяемого по формуле (2.28)

$$k_{\lambda} = \begin{cases} 1 - 0,024\lambda_p & \text{при } \lambda_p \leq 16^\circ \\ 0,61 + 0,029(\lambda_p - 16^\circ) & \text{при } \lambda_p > 16^\circ \end{cases}. \quad (2.28)$$

где  $\lambda_p$  – угол между проекцией оси реза на плоскость резания и направлением вектора абсолютной скорости движения реза [69, 123].

Коэффициент  $k_{\phi}$  выбирается, исходя из формы режущей кромки реза, по данным таблицы 2.1.

Анализ таблицы 2.1 показывает, что наиболее благоприятные условия формирования крупных последовательных элементарных сколов (снижение силовых и энергетических показателей процесса резания, а следовательно, и доли пылевидных классов в продуктах отбойки) обеспечиваются при разрушении калийного массива резами с полукруглой выпуклой либо

плоской формой передней грани, а также с полукруглой выпуклой формой режущей кромки.

Таблица 2.1 – Коэффициент формы передней грани  $k_f$  [123]:

Форма режущей кромки	Коэффициент формы передней грани $k_f$		
	Форма передней грани		
	плоская	полукруглая выпуклая	крышевидная
Полукруглая выпуклая	0,57 – 0,62	0,57	0,66 – 0,74
Прямоугольная долотчатая	0,93 – 1,0	–	–
Треугольная	0,79 – 0,84	0,68 – 0,71	0,77 – 0,85

Приведенные результаты экспериментальных и теоретических исследований позволяют оценить степень влияния реализуемой схемы резания и её параметров на процесс разрушения калийного массива. Так, при использовании шахматной схемы резания удельные затраты энергии на разрушение калийной руды на 30...40 % ниже, чем при использовании последовательной схемы. Аналогичный вывод следует из анализа зависимостей изменения массовой доли труднообогатимых классов руды в продуктах разрушения. Существенное снижение нагрузок на породоразрушающий инструмент возможно обеспечить посредством оптимизации формы и геометрических параметров резцов, а также рациональным положением резцов относительно траекторий резов.

### 2.3.2 Разрушение калийной руды перекрестными резами

Существенным недостатком шахматной схемы резания является случайный характер процесса распространения магистральной трещины при образовании нижней поверхности крупного элементарного скола. Указанное обуславливает увеличение удельных энергозатрат на «зачистку» дна реза при движении резца, излишнее дробление руды в предрезцовом пространстве и

снижение энергоэффективности каждого цикла формирования последовательного скола руды при разрушении калийного массива.

Таким образом, актуальной является задача поиска способов формирования всех поверхностей разрушения последовательных крупных сколов, отделяемых от массива.

К достоинствам планетарно-дисковых исполнительных органов горных комбайнов относят возможность создания на поверхности забоя сетки пересекающихся резов [29, 35, 42, 43, 62, 66, 77, 86, 87]. В научных трудах сотрудников ГИПРОУГЛЕМАШа, МГИ, КНИУИ, ПНИУИ, ПГТУ приведены результаты исследований процесса разрушения углей и горных пород пересекающимися резами.

Сотрудниками ПГТУ – доцентом Л. И. Старковым и Н. А. Харламовой выполнены исследования на лабораторном стенде по разрушению перекрестными резами блоков калийной руды, отобранных из пласта «Красный-II» Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей [150, 168]. Результаты исследований показали, что при использовании перспективной перекрестной схемы резания удельные затраты энергии процесса разрушения калийной руды снижаются до 30 % по сравнению с шахматной схемой резания. Количество труднообогатимых классов руды в продуктах разрушения уменьшается в 3...4 раза (см. рисунок 2.8, *д*, *е*).

Суть перекрестного резания заключается в следующем (рисунок 2.10). Калийный массив послойно разрушается взаимно пересекающимися резами, направленными вдоль осей  $OX$  и  $OZ$ . Шаг резов в обоих направлениях резания принимается равным  $t$ . Резы каждого последующего отработываемого слоя заглублены относительно дна поперечных резов на величину  $h_3$ .

В каждом направлении резания реализуется шахматная схема. При этом резы двух ближайших слоев, реализуемых в одном направлении, располагаются таким образом, что резы последующего слоя направлены

между резами предыдущего слоя и заглублены относительно них на величину  $2h_3$ .

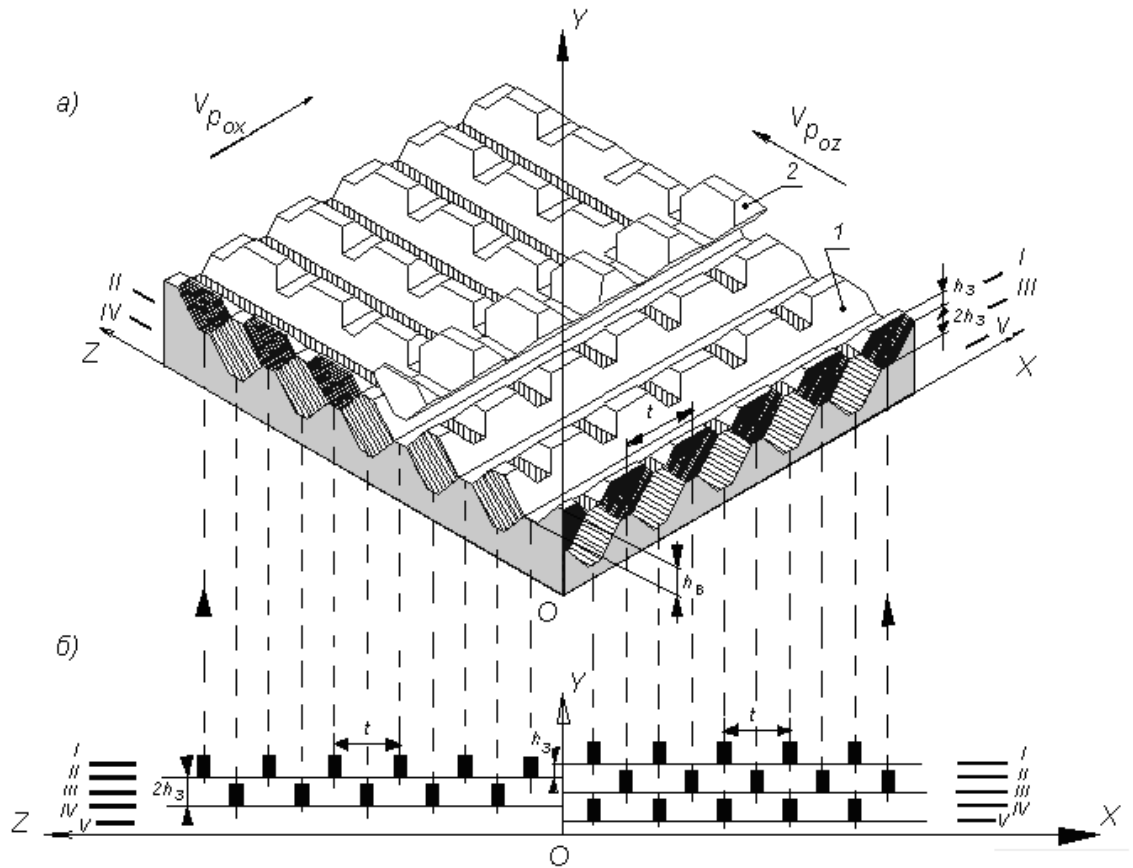


Рисунок 2.10 – Схема процесса разрушения калийного массива перекрёстными резами: *a* – поверхность массива, разрушаемого перекрёстными резами; *1* – массив; *2* – отделяемая от массива стружка переменного сечения; *б* – порядок отработки массива и схема расстановки резцов комбайна; *I, II, III, IV, V* – порядок расположения плоскостей резания (обрабатываемых слоёв руды); в плоскостях *II* и *IV* резцы движутся вдоль оси *OZ*; в плоскостях *I, III* и *V* резцы движутся вдоль оси *OX*

Отделяемая стружка (см. рисунок 2.10, поз. 2) характеризуется переменным сечением. Максимальная толщина стружки рассчитывается по формуле (2.29)

$$h = h_3 + h_B, \quad (2.29)$$

где  $h_3$  – величина заглубления реализуемого реза относительно дна реализованных поперечных резцов, мм;  $h_B$  – высота выступа, сформированного реализованными поперечными резами, мм [213].

Отличительной особенностью перспективной перекрестной схемы резания в сравнении с традиционными схемами является формирование поверхности забоя, характеризуемой наличием регулярных выступов, контуры которых сформированы ранее реализованными резами. Площадь сформированных поверхностей разрушения  $S_{\phi}$  определяется шагом резания  $t$ , величиной заглабления пересекающихся резов  $h_3$  и шириной режущей кромки используемого резца, то есть в соответствии с выражением (2.30)

$$S_{\phi} = f(t, h_3, b_p). \quad (2.30)$$

Формирование поверхности забоя, характеризующейся наличием областей локализации ослаблений и техногенных трещин, позволяет отделять от калийного массива элементарные объемы руды в виде единичных сколов с устойчивыми значениями геометрических параметров как в продольном, так и в поперечном направлениях [187, 214].

Формирование последовательных сколов заданной формы и крупности, составляющих большую часть добываемой калийной руды, обусловит снижение доли мелкодисперсных фракций в продуктах разрушения и позволит повысить энергоэффективность процесса добычи руды.

## **2.4 Обоснование рациональных параметров работы исполнительных органов и рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников**

### **2.4.1 Методология определения рациональных параметров планетарно-дисковых исполнительных органов калийных комбайнов**

Решение многокритериальной задачи обоснования рациональных параметров работы породоразрушающих органов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников может быть получено на основе результатов исследований по оценке влияния конструктивных, кинематических и режимных параметров на энергоэффективность использования добычных машин.



Наиболее важным параметром, определяющим энергоэффективность процесса разрушения калийного массива пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами комбайнов, является удельный путь резания  $L_{уд}$ . Из формулы (2.12) следует, что минимальное значение  $L_{уд}$  обуславливает достижение наименьших удельных затрат энергии процесса разрушения калийной руды и минимального количества пылевидных, труднообогатимых классов в добываемой руде.

Минимальный удельный путь резания  $L_{уд}$  обеспечивается при максимальной глубине резов  $h$  и скорости подачи  $V_{п}$  комбайна на забой. При работе проходческо-очистного комбайна в калийном руднике значение  $V_{п}$ , ограничивается следующими условиями:

- установленной мощностью электроприводов породоразрушающих исполнительных органов и рабочего оборудования;
- напорным усилием, создаваемым ходовым оборудованием;
- величиной радиального вылета резца (максимальной толщиной стружки) [15, 161].

В основном нагрузка на приводных двигателях породоразрушающих исполнительных органов добычных машин зависит от сопротивляемости калийного массива резанию  $A_p(T)$  и скорости подачи комбайна на забой  $V_{п}(T)$ . Мощность приводов режущих исполнительных органов  $N_p(T)$  определяется зависимостью (2.31)

$$N_p(T) = \xi_{тр} [A_p(T)K_{пр}V_{п}(T)K_{ри}V_p(T)], \quad (2.31)$$

где  $\xi_{тр}$  – коэффициент, характеризующий динамические свойства соответствующего привода добычной машины;  $K_{пр}$  – коэффициент, учитывающий отношение толщины стружки к скорости подачи комбайна;  $K_{ри}$  – коэффициент, характеризующий конструктивные параметры резцов, тип и параметры схемы резания;  $V_p(T)$  – изменение скорости резания во времени.

На комбайнах, оснащенных электромеханическими приводами с асинхронными двигателями без частотного регулирования скорость резания

$V_p(T) = \text{const}$ . Преобразуем выражение (2.31), объединив общим оператором  $\xi_t$  постоянные множители  $\xi_{\text{тр}}$ ,  $K_{\text{пр}}$ ,  $K_{\text{ри}}$  и  $V_p(T)$ , получаем зависимость (2.32)

$$N_p(T) = \xi_t [A_p(T)V_{\text{п}}(T)]. \quad (2.32)$$

Мощность  $N_{\text{п}}(T)$  приводных двигателей механизма перемещения комбайна зависит от напорного усилия  $F(T)$  и скорости подачи комбайна на забой  $V_{\text{п}}(T)$  и в общем виде определяется выражением (2.33)

$$N_{\text{п}}(T) = \lambda_{\text{T}} [F(T)V_{\text{п}}(T)], \quad (2.33)$$

где  $\lambda_{\text{T}}$  – коэффициент, характеризующий динамические свойства механизма подачи рассматриваемого комбайна.

В процессе функционирования проходческо-очистного комбайна в очистной камере скорость подачи  $V_{\text{п}}$  регулируется машинистом по условию (2.34)

$$\begin{cases} N_p \rightarrow \text{const}; \\ V_p = \text{const}; \\ V_{\text{п}} = \text{var}. \end{cases} \quad (2.34)$$

Трудность оптимизации процесса разрушения калийного массива по величине удельных затрат энергии обусловлена в первую очередь ручным способом управления добычными комбайнами, когда величина скорости подачи комбайна  $V_{\text{п}}$  определяется на основе информации (не всегда достоверной) о нагруженности приводов исполнительных органов [162].

Как указывалось выше, минимальные удельные затраты энергии при разрушении калийного массива с использованием традиционных схем резания обеспечиваются в рациональных диапазонах отношения шага резания к толщине стружки  $t/h = 2...4$ . Следует учитывать, что работа планетарно-дисковых исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов характеризуется переменными значениями  $t = \text{var}$  и  $h = \text{var}$ , то есть в зависимости от угла поворота резцового диска изменяется и отношение  $t/h$  по всей траектории реза (рисунок 2.11). Например, при работе проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11/12» с номинальной производительностью  $Q = 8$  т/мин большая часть резов осуществляется

породоразрушающими инструментами резовых дисков при мгновенных значениях  $t/h$ , находящихся вне диапазона рациональных величин. Траектории резов чрезмерно сближены, что обуславливает уменьшение сечений отделяемой от массива стружки [77, 79].

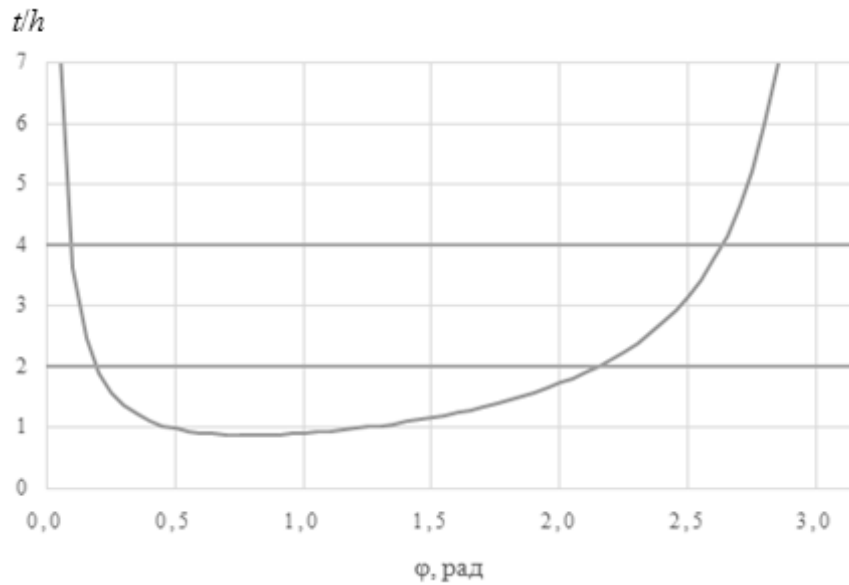


Рисунок 2.11 – Изменение отношения  $t/h$  от угла поворота резового диска комбайна «Урал-20Р-11/12» при производительности  $Q=8$  т/мин

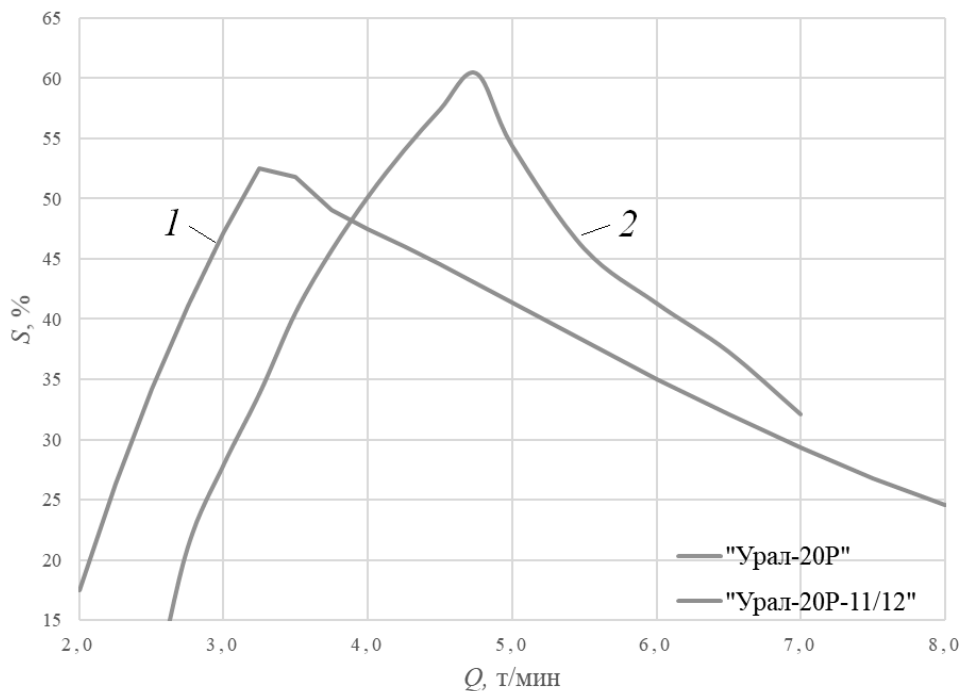


Рисунок 2.12 – Доля площади забоя, обрабатываемая планетарно-дисковыми органами комбайнов «Урал-20Р» при отношении  $t/h = 2 \dots 4$ :

1 – комбайны «Урал-20Р-11/12»; 2 – комбайны «Урал-20Р» ранних модификаций

Доля площади забоя, обрабатываемой с рациональными отношениями шага резания к толщине стружки  $t/h = 2...4$ , изменяется в зависимости от производительности комбайна (рисунок 2.12). Для комбайнов «Урал-20Р-11» при номинальной производительности  $Q = 8$  т/мин она составляет 23,4 %, что обуславливает снижение энергоэффективности функционирования данных добычных машин и определяет увеличение количества труднообогатимых классов в добываемой руде.

Для сравнения: работа планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» ранних модификаций с номинальной производительностью  $Q = 7$  т/мин сопровождалась разрушением 36,1 % площади забоя с рациональными значениями отношения шага резания к толщине стружки  $t/h$  (таблица 2.2).

Таблица 2.2. – Влияние конструкции и режима работы комбайна «Урал-20Р» на параметры обработки забоя породоразрушающим инструментом

Модификация комбайна, производительность	Доля площади забоя, %, обрабатываемой резцами планетарно-дискового исполнительного органа комбайна при параметрах резов:		
	$t/h < 2$	$t/h > 4$	$t/h = 2...4$
«Урал-20Р-11/12», $Q = 8$ т/мин	65,9	10,7	23,4
«Урал-20Р», $Q = 7$ т/мин	47,5	16,4	36,1

Выбор рациональных параметров разрушения массива планетарными исполнительными органами комбайнов «Урал» осуществляют по средним значениям шага резания  $t_{cp}$  и толщины стружки  $h_{cp}$ . Таким образом, рациональные значения параметров разрушения калийного массива планетарно-дисковым исполнительным органом при заданной скорости подачи комбайна  $V_{II}$  определяются выражением (2.35)

$$t_{cp}/h_{cp}=2...4, \quad (2.35)$$

где  $t_{cp}$  – средний шаг резания, мм;  $h_{cp}$  – средняя толщина стружки, мм.

Средние значения толщины стружки и шага резания для пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов

проходческо-очистных комбайнов рассчитываются по формулам (2.36) и (2.37) соответственно

$$h_{\text{ср}} = \frac{2V_{\text{п}}}{\pi Z_{\text{д}} n_{\text{пер}}}; \quad (2.36)$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{2\pi r_{\text{вод}}}{Z_{\text{р}} i}. \quad (2.37)$$

Изменение отношение среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$  для планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р-11/12» в зависимости от их производительности показано на рисунке 2.13. Диапазону рациональных значений  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 2 \dots 4$  соответствует производительность комбайнов  $Q = 3 \dots 6$  т/мин. При номинальной производительности комбайнов  $Q = 8$  т/мин забой разрушается сближенными резами с малыми сечениями стружки, что снижает энергоэффективность работы рассматриваемых добычных машин [161].

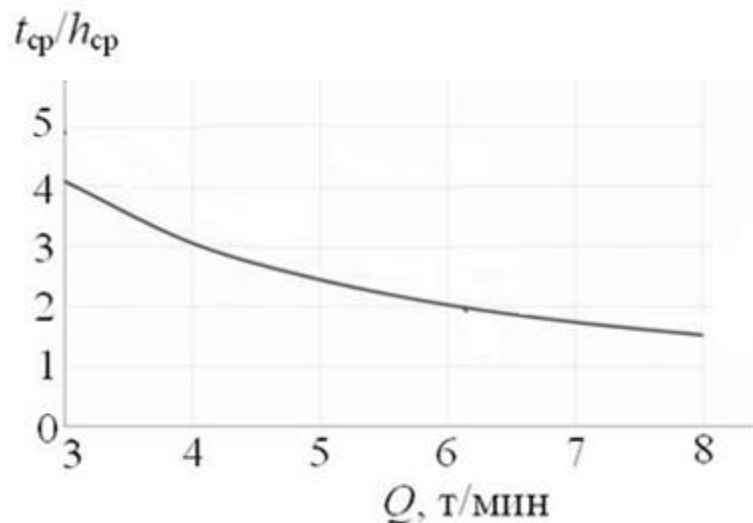


Рисунок 2.13 – Изменение отношения среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$  в зависимости от производительности  $Q$  комбайна «Урал-20Р-11/12»

Энергоэффективные режимы работы планетарно-дисковых исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников возможно обеспечить посредством разработки и внедрения средств автоматического управления приводными электродвигателями. При работе

добычной машины минимизация удельных затрат энергии процесса разрушения калийного массива и уменьшение количества труднообогатимых классов в добываемой руде обеспечиваются регулированием параметров работы комбайна по условию (2.38)

$$\begin{cases} t_{\text{cp}} / h_{\text{cp}} \rightarrow \text{const}; \\ V_{\text{p}} = \text{var}; \\ V_{\text{n}} = \text{var}. \end{cases} \quad (2.38)$$

Для комбайнов типа «Урал», оснащенных планетарно-дисковыми исполнительными органами, выполнение условия (2.38) наиболее просто реализуется изменением частоты переносного вращения  $n_{\text{пер}}$  исполнительных органов. Актуальной является задача обоснования способов и разработки алгоритмов управления приводами планетарно-дисковых исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов, что позволит создать для отечественной калийной отрасли новые добычные машины мехатронного класса.

#### **2.4.2 Методология определения рациональных параметров шнековых грузчиков проходческо-очистных комбайнов**

Погрузочное оборудование современных проходческо-очистных комбайнов калийных рудников, как правило, монтируется на общей силовой раме, состоит из шнеков, перемещающих отделенную от массива руду по почве от периферии выработки к загрузочному окну скребкового конвейера. Чаще всего погрузочные шнеки выполняются однозаходными, однако на некоторых моделях комбайнов используют и двухзаходные шнеки (например, «Урал-61»). На лопастях шнеков устанавливают неповоротные резцы, которые разрушают рудный массив у почвы выработки резами малой толщины (максимальная толщина стружки  $h_{\text{max}} < 7$  мм).

Наличие значительных динамических составляющих нагрузок на приводах берм и шнеков обусловлено в первую очередь особенностью конструкции и режимов работы погрузочных шнеков, подающих руду на

конвейер порционно (рисунок 2.14). Даже во время технологических пауз, когда комбайн работает в режиме холостого хода, приводы бермовых фрез загружены не менее чем на 50 % от номинальной нагрузки, так как при отключенном конвейере шнеки не транспортируют остающуюся в забое руду, а измельчают ее в призабойном пространстве [74, 141, 154].

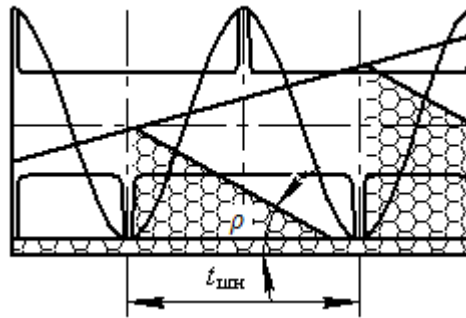


Рисунок 2.14 – Схема перемещения калийной руды лопастями однозаходного шнека

Производительность шнека по погрузке рассчитывается по известной формуле (2.39) [63, 85]

$$Q_{\text{шн}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{шн}}^2 - d_{\text{шн}}^2) \gamma m_{\text{шн}} n_{\text{шн}} \frac{K_3}{K_{\text{ц}}} \left( t_{\text{шн}} - \frac{\delta_{\text{шн}} N_3}{\cos \psi_{\text{шн}}} \right) \quad (2.39)$$

где  $Q_{\text{шн}}$  – производительность шнека по погрузке (в осевом направлении), т/мин;  $D_{\text{шн}}$  – диаметр лопасти шнека, м;  $d_{\text{шн}}$  – диаметр ступицы шнека, м;  $t_{\text{шн}}$  – шаг лопасти шнека, м;  $\psi_{\text{шн}}$  – угол подъема лопасти шнека, град;  $\delta_{\text{шн}}$  – толщина лопасти шнека, м;  $N_3$  – число заходов лопастей шнека, шт.;  $m_{\text{шн}}$  – количество шнеков, шт.;  $n_{\text{шн}}$  – частота вращения шнека, об/мин;  $\gamma$  – насыпная плотность перемещаемой руды, т/м<sup>3</sup>;  $K_3$  – коэффициент заполнения шнека;  $K_{\text{ц}}$  – коэффициент циркуляции [44].

Угол подъема лопасти шнека определяется выражением (2.40)

$$\psi_{\text{шн}} = \arctg \frac{2t_{\text{шн}}}{\pi(D_{\text{шн}} + d_{\text{шн}})}. \quad (2.40)$$

Увеличение производительности комбайна при разрушении калийного массива обуславливает всё большее заполнение шнека рудой, перемещаемой к погрузочному окну скребкового конвейера-перегрузателя, что определяет

увеличение значения коэффициента заполнения шнека  $K_3$  [78]. При этом количество циркулирующей руды, перебрасываемой через ступицу шнека кулаками-резцедержателями, до определённого момента увеличивается линейно, а значение коэффициента циркуляции  $K_{ц}$  остается постоянным (рисунок 2.15).

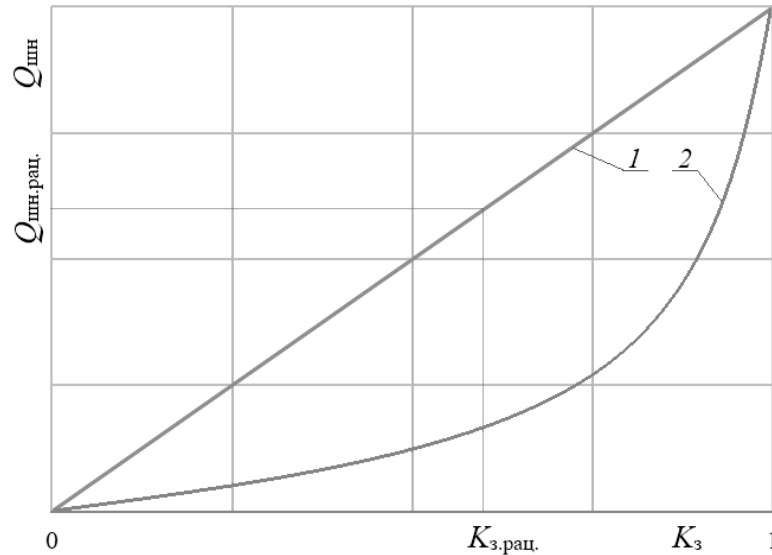


Рисунок 2.15 – Изменение производительности шнека по погрузке (1) и по циркуляции (2) в зависимости от коэффициента заполнения  $K_3$  [78]

Увеличение коэффициента заполнения шнека выше рационального значения  $K_3 > K_{3,рац}$  определяет вовлечение частиц руды в тангенциальное движение за счет трения о поверхность ступицы шнека, что обуславливает интенсивное возрастание циркуляции перемещаемой массы калийной руды. Увеличение коэффициента заполнения до  $K_3 \approx 1$  определяет заштыбовку шнеков.

Расчетная схема для определения рациональной величины коэффициента заполнения шнека  $K_{3,рац}$  приведена на рисунке 2.16 [22].

Граница заполнения поперечного сечения шнека, выше которой руда вовлекается поверхностью ступицы в тангенциальное движение (перебрасывается через ступицу), определяется углом  $\beta$ , который связан с геометрическими и кинематическими параметрами шнека выражением (2.41) [22]



$$\frac{g \sin \lambda_{\text{шн}} + 0,5fD_{\text{шн}} \left( \frac{n_{\text{шн}}}{60} \right)^2}{g \cos \lambda_{\text{шн}}} = \quad (2.41)$$

$$= \frac{\pi D_{\text{шн}}}{t_{\text{шн}}} \left( 1 - f \sqrt{\text{ctg}^2 \gamma_{\text{шн}} + \left( \frac{t_{\text{шн}}}{\pi D_{\text{шн}}} \right)^2} + 1 + f \text{ctg} \gamma_{\text{шн}} \right) \sin \beta - f \cos \beta,$$

где  $\beta$  – предельный угол вовлечения частиц калийной руды в тангенциальное движение ступицей шнека, град;  $\lambda_{\text{шн}}$  – угол наклона оси вращения шнека к горизонтальной плоскости, град;  $f$  – коэффициент трения калийной руды по металлу;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

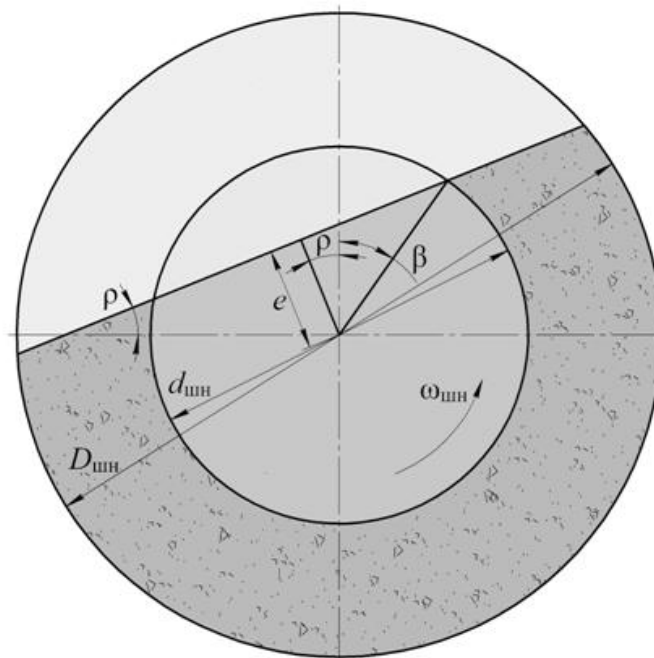


Рисунок 2.16 – Расчетная схема для определения рациональной величины коэффициента заполнения шнека  $K_{з,рац.}$

При подстановке в уравнение (2.41), например, параметров погрузочных шнеков комбайнов «Урал-20Р-11/12» значение предельного угла вовлечения  $\beta = 35^\circ$ .

Рациональное значение коэффициента заполнения шнека  $K_{з,рац.}$  определяется как отношение площади заполненной части поперечного

сечения шнека  $S_{3.ч}$  к полному сечению межлопастного пространства шнека  $S_{полн.}$ , то есть в соответствии с выражением (2.42)

$$K_{3.рац.} = S_{3.ч} / S_{полн.} \quad (2.42)$$

Полная площадь сечения межлопастного пространства шнека рассчитывается по формуле (2.43)

$$S_{полн.} = 0,25\pi(D_{шн}^2 - d_{шн}^2). \quad (2.43)$$

В соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 2.16, площадь заполненной части поперечного сечения шнека определяется выражением (2.44)

$$S_{3.ч.} = 0,25\pi(D_{шн}^2 - d_{шн}^2) - 0,13 \left[ D_{шн}^2 \left( \frac{\pi\alpha_R}{180} - \sin\alpha_R \right) - d_{шн}^2 \left( \frac{\pi\alpha_r}{180} - \sin\alpha_r \right) \right], \quad (2.44)$$

где  $\alpha_R$  и  $\alpha_r$  – центральные углы окружностей с диаметрами  $D_{шн}$  и  $d_{шн}$  соответственно, определяющие положение хорды на расчетной схеме, град, в соответствии с выражениями (2.45) и (2.46) соответственно

$$\alpha_R = 2 \arccos \left( \frac{d_{шн} \cos(\rho + \beta)}{D_{шн}} \right), \quad (2.45)$$

где  $\rho$  – угол естественного откоса руды в движении, град,

$$\alpha_r = 2(\rho + \beta). \quad (2.46)$$

Например, определенная по формулам (2.42)–(2.46) рациональная величина коэффициента заполнения шнеков комбайнов «Урал-20Р-11/12» составляет  $K_{3.рац.} = 0,63$ .

Дальнейшее определение рациональных параметров шнековых грузчиков комбайнов «Урал-20Р-11/12» выполним для условия минимальной циркуляции руды в межлопастном пространстве, то есть значение коэффициента циркуляции  $K_{ц} = 1$ . Данная величина коэффициента циркуляции соответствует значениям коэффициента заполнения шнека  $K_3 \leq K_{3.рац.}$ , так как в противном случае циркуляция руды в шнеке резко увеличится,  $K_{ц} \gg 1$  [22, 44, 74, 78, 85].

Изменение коэффициента заполнения шнеков  $K_3$  в зависимости от производительности комбайна «Урал-20Р-11/12» определяется выражением (2.47)

$$K_3 = K_{ц} Q \left( \frac{\pi}{4} (D_{\text{шн}}^2 - d_{\text{шн}}^2) \gamma m_{\text{шн}} n_{\text{шн}} \left( t_{\text{шн}} - \frac{\delta N_3}{\cos \psi_{\text{шн}}} \right) \right)^{-1}. \quad (2.47)$$

Анализ графиков, приведенных на рисунке 2.17, показывает, что увеличение коэффициента заполнения шнеков выше рациональных значений  $K_3 > K_{3,\text{рац}}$  происходит при производительности комбайнов «Урал-20Р-11/12»  $Q > 7,4$  т/мин, что на 8 % ниже номинальной производительности. Увеличение заполнения межлопастного пространства шнеков обуславливает повышение удельных затрат энергии на перемещение и излишнее дробление руды при погрузке.

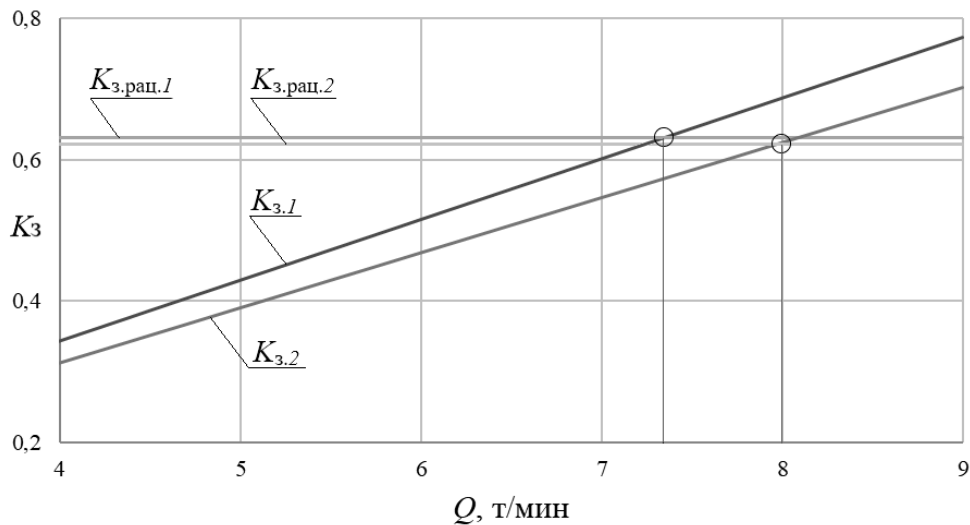


Рисунок 2.17 – Изменение коэффициентов заполнения шнека  $K_3$  и  $K_{3,\text{рац}}$  комбайна «Урал-20Р-11/12» в зависимости от производительности при различных диаметрах ступицы шнеков: 1 –  $d_{\text{шн}} = 0,4$  м; 2 –  $d_{\text{шн}} = 0,36$  м

Согласно зависимости (2.39), производительность шнека по погрузке  $Q_{\text{шн}}$  в наибольшей мере зависит от диаметров его лопасти  $D_{\text{шн}}$  и ступицы  $d_{\text{шн}}$ . В соответствии с (2.47) определена зависимость изменения рационального коэффициента заполнения шнека  $K_{3,\text{рац}}(d_{\text{шн}})$  от диаметра ступицы в диапазоне значений  $d_{\text{шн}} \in [0,1 \text{ м}; 0,6 \text{ м}]$  при  $D_{\text{шн}} = \text{const}$  (рисунок 2.18).

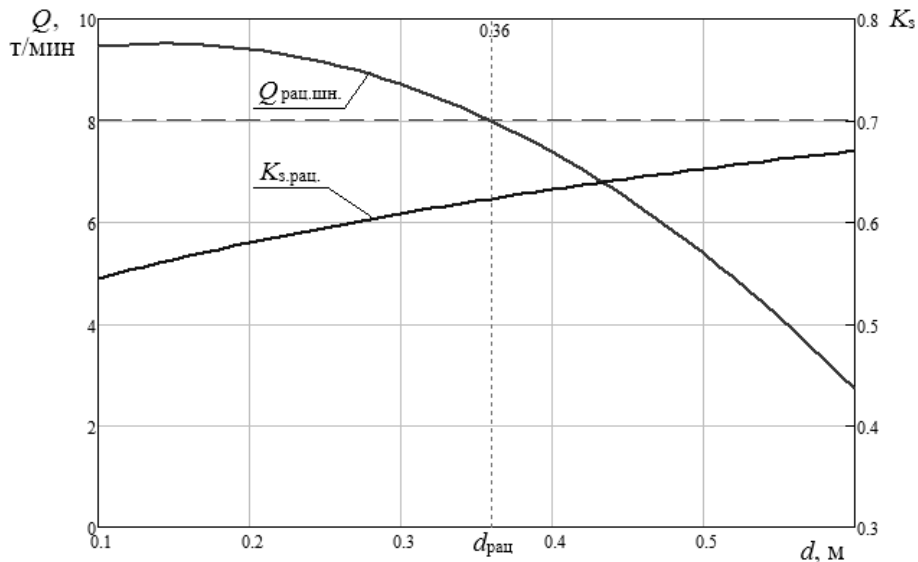


Рисунок 2.18 – Изменение рационального коэффициента заполнения шнека  $K_{\text{з.рац}}$  и рациональной производительности шнека по погрузке  $Q_{\text{шн.рац}}$  в зависимости от диаметра ступицы  $d_{\text{шн}}$  шнека комбайна «Урал-20Р-11»

Зависимость изменения рациональной производительности шнека по погрузке от диаметра ступицы шнека  $Q_{\text{шн.рац.}}(d_{\text{шн}})$  рассчитана в соответствии с выражением (2.39) при заданных для серийно выпускаемых комбайнов «Урал-20Р-11/12» конструктивных и режимных параметрах работы шнековых грузчиков. Анализ графиков показывает, что  $Q_{\text{шн.рац.}} = 8$  т/мин обеспечивается при диаметре ступицы  $d_{\text{шн}} = 0,36$  м [78, 174].

Таким образом, снижение нагруженности приводов шнеков, уменьшение циркуляции и измельчения руды при погрузке шнеками комбайнов «Урал-20Р-11/12» могут быть обеспечены уменьшением диаметра ступицы шнека  $d_{\text{шн}}$  на 10 % по сравнению с существующими, серийно выпускаемыми шнековыми грузчиками.

### 2.4.3 Методология определения рациональных параметров скребковых конвейеров-перегрузателей проходческо-очистных комбайнов

Проходческо-очистные комбайны калийных рудников применяются в выработках с углами наклона  $\theta = \pm 12^\circ$  (отрицательные значения угла  $\theta$  соответствуют движению комбайна вниз). При этом скребковые конвейеры-

перегрузатели, которыми оснащаются данные добычные машины, установлены под углом к плоскости ходового оборудования, что необходимо для загрузки отделенной от массива руды с почвы выработки в кузова бункеров-перегрузателей или шахтных самоходных вагонов.

Например, скребковые конвейеры-перегрузатели комбайнов «Урал-20Р-11/12» установлены под углом  $18^\circ$  к плоскостям гусеничных тележек, то есть при работе конвейера-перегрузателя угол его наклона относительно горизонтальной плоскости может составлять до  $30^\circ$  [174].

В состоянии покоя угол естественного откоса массы калийной руды, отделенной от массива, составляет  $\rho_{\text{п}} = 35 \dots 40^\circ$ . Так как работа скребкового конвейера-перегрузателя сопровождается вибрацией, обусловленной неравномерностью движения тягового органа, угол естественного откоса руды, перемещаемой по конвейеру, составляет  $\rho = 20 \dots 25^\circ$ .

Производительность скребкового конвейера-перегрузателя проходческо-очистного комбайна в зависимости от угла наклона рамы относительно горизонтальной плоскости определяется следующими выражениями (2.48) и (2.49)

$$\begin{cases} \alpha < \rho; \\ Q_{\text{к}} = 60\gamma V_{\text{ц}} l_{\text{ск}} \left( h_{\text{ск}} + \frac{\sin(\rho + \alpha) \sin(\rho - \alpha)}{2 \sin 2\rho} t_{\text{ск}} \right); \end{cases} \quad (2.48)$$

$$\begin{cases} \alpha \geq \rho; \\ Q_{\text{к}} = 60\gamma V_{\text{ц}} l_{\text{ск}} \left( h_{\text{ск}} - \frac{\text{tg}(\alpha - \rho)}{2} t_{\text{ск}} \right), \end{cases} \quad (2.49)$$

где  $Q_{\text{к}}$  – производительность конвейера-перегрузателя, т/мин;  $\alpha$  – угол наклона рамы скребкового конвейера-перегрузателя относительно горизонтальной плоскости, град.;  $t_{\text{ск}}$  – шаг расстановки скребков, м;  $l_{\text{ск}}$  и  $h_{\text{ск}}$  – длина и высота скребка соответственно, м;  $V_{\text{ц}}$  – скорость движения тягового органа, м/с.

При величине угла естественного откоса перемещаемой тяговым органом конвейера руды  $\rho = 22^\circ$  условие  $\alpha < \rho$  выполняется при работе

комбайна в выработке с углом наклона  $\theta = -4...+12^\circ$  (рисунок 2.19, а). Уменьшение угла наклона горной выработки ( $\theta = -12...-4^\circ$ ) обуславливает существенное снижение производительности конвейера-перегрузателя вследствие уменьшения объема руды, перемещаемой между скребками (рисунок 2.19, б). Ухудшение условий погрузки обуславливает повышение циркуляции руды в призабойном пространстве, её дробление и снижение энергоэффективности работы погрузочного оборудования комбайна [78].

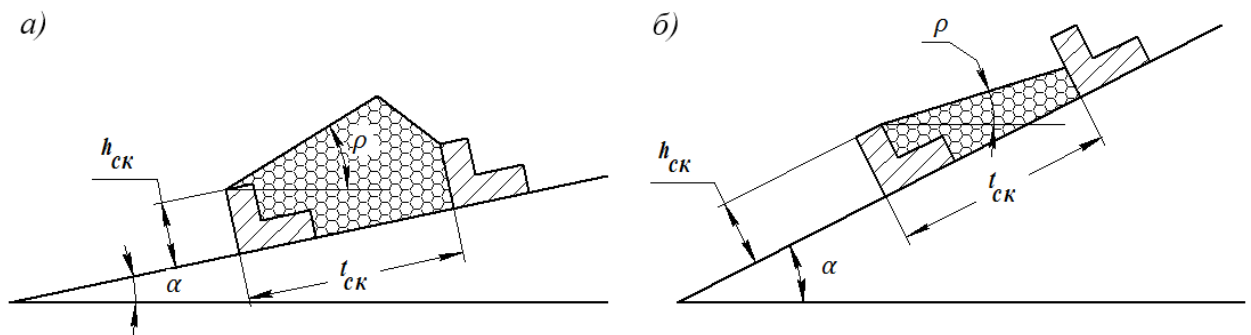


Рисунок 2.19 – Расчетная схема скребкового конвейера-перегрузателя проходческо-очистного комбайна: а)  $\alpha < \rho$ ; б)  $\alpha \geq \rho$

График изменения производительности скребкового конвейера-перегрузателя комбайна «Урал-20Р-11» в зависимости от угла наклона проводимой выработки  $\theta$  приведен на рисунке 2.20, поз. 1. Работа добычной машины в выработке с углом наклона  $\theta = -12^\circ$  определяет снижение производительности скребкового конвейера-перегрузателя до  $Q_k = 4,6$  т/мин, что более чем на 40 % ниже номинальной производительности комбайна «Урал-20Р-11».

Согласно зависимостям (2.48) и (2.49), при постоянной скорости движения тягового органа  $V_{ц}$  производительность скребкового конвейера-перегрузателя в наибольшей мере зависит от параметров скребков ( $l_{ск}$  и  $h_{ск}$ ) и шага их расстановки  $t_{ск}$ . Например, увеличение высоты скребков  $h_{ск}$  конвейера-перегрузателя комбайна «Урал-20Р-11» в 1,3 раза и уменьшение шага расстановки сткробков  $t_{ск}$  в 1,5 раза обусловит повышение производительности конвейера по погрузке до значений, превышающих

производительность породоразрушающих исполнительных комбайна ( $Q_k > Q$ ) практически во всем диапазоне изменения углов выработок  $\theta$  (см. рисунок 2.20, поз. 2).

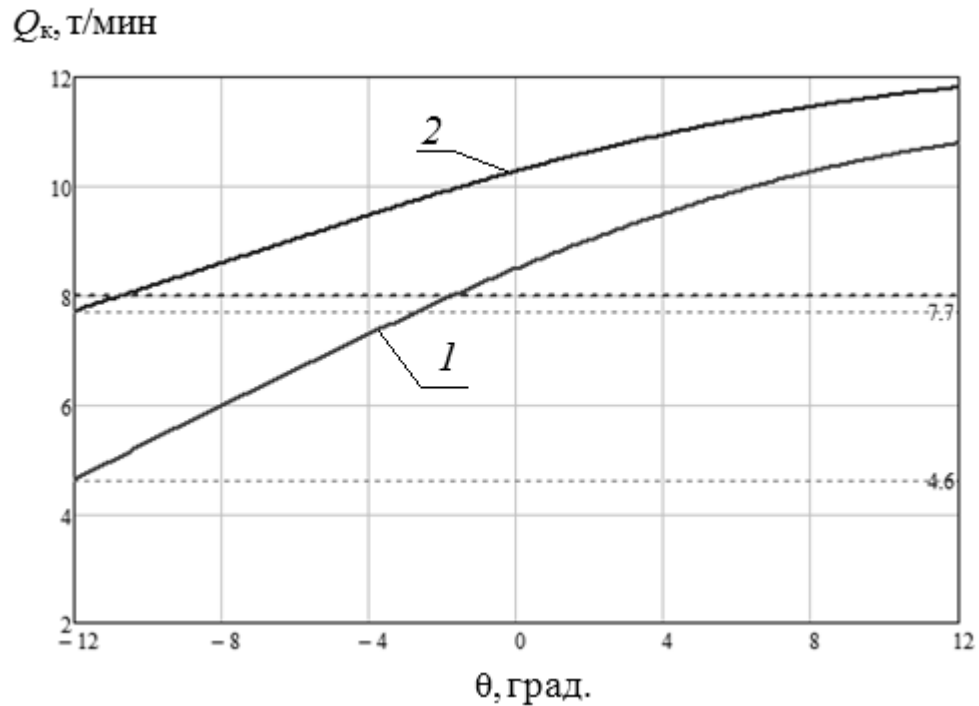


Рисунок 2.20 – Изменение производительности скребкового конвейера-перегрузателя в зависимости от угла наклона горной выработки:

1 – конвейер комбайна «Урал-20Р-11»; 2 – модернизированный конвейер

Изменение геометрических параметров и шага расстановки скребков обусловит необходимость увеличения калибра тяговой цепи и повышения установленной мощности привода конвейера. В то же время увеличение производительности конвейера позволит повысить энергоэффективность работы проходческо-очистных комбайнов посредством снижения циркуляции и повторного дробления руды в призабойном пространстве.

## **2.5 Методология оценки эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов в условиях калийных рудников**

### **2.5.1 Оценка энергоэффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов в условиях калийных рудников**

Оценка эффективности использования проходческо-очистных комбайнов выполняется для определения области рационального применения, выявления неявных факторов, снижающих производительность, надежность и энергоэффективность их функционирования в условиях калийных рудников [199].

Решение задачи оценки эффективности применения добычных машин в условиях калийных рудников возможно посредством непрерывного мониторинга нагруженности приводных электродвигателей рабочего оборудования комбайнов с использованием программных бортовых комплексов регистрации параметров. В основе работы таких комплексов должны лежать научно-обоснованные методики анализа зарегистрированных данных и алгоритмы, направленные на поддержание функционирования комбайна в рациональных режимах и предупреждение аварийных ситуаций.

Наиболее простой метод контроля параметров работы проходческо-очистных комбайнов – это измерение, регистрация и анализ сигналов активных мощностей электродвигателей добычных машин, характеризующих величину и характер изменения нагруженности приводов комбайнов. Для определения производительности и удельных затрат энергии процесса добычи калийной руды необходимо осуществлять контроль перемещения комбайна и соотносить полученные данные с абсолютным временем [160, 162].

Достоверная оценка энергоэффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов в условиях калийных рудников реализуется соотношением базовых и фактических значений удельных затрат энергии процесса добычи калийной руды [34, 55].



Фактические значения удельных энергозатрат процесса добычи калийной руды за контролируемый временной период  $T$  определяются по данным бортового регистратора параметров работы комбайна и рассчитываются по формуле (2.50)

$$H_{\text{вф}} = \frac{T \sum N_{\text{ф.и.о.}}}{G}, \quad (2.50)$$

где  $H_{\text{вф}}$  – величина фактических удельных энергозатрат на добычу калийной руды комбайном за контролируемый период, кВт·ч/т;  $T$  – длительность контролируемого периода работы комбайна, ч;  $\sum N_{\text{ф.и.о.}}$  – сумма средних за контролируемый период времени  $T$  значений активных мощностей приводных электродвигателей комбайна, кВт;  $G$  – масса добытой калийной руды, т.

Базовое значение удельных энергозатрат процессов разрушения калийного массива и погрузки руды при работе проходческо-очистного комбайна рассчитывается по формуле (2.51)

$$H_{\text{вб}} = \frac{\sum N_{\text{р.и.о.}}}{60Q}, \quad (2.51)$$

где  $H_{\text{вб}}$  – базовое значение удельных энергозатрат на разрушение и погрузку калийной руды при работе проходческо-очистного комбайна, кВт·ч/т;  $\sum \sum N_{\text{р.и.о.}}$  – расчетная мощность приводных двигателей породоразрушающих и погрузочных органов, кВт;  $Q$  – техническая производительность проходческо-очистного комбайна, т/мин.

По результатам расчетов, проведенных для комбайнов «Урал-20Р-11», при сопротивляемости резанию калийной руды  $A_p = 450$  кН/м и производительности  $Q = 8$  т/мин базовое значение удельных энергозатрат на отделение от массива и погрузку руды составляет  $H_{\text{вб}} = 1,16$  кВт·ч/т.

Путем отношения базовой величины удельных энергозатрат к фактической определяется комплексный показатель, характеризующий технический уровень работ в очистной камере калийного рудника –

коэффициент энергоэффективности функционирования проходческо-очистного комбайна  $k_{э.эф.}$ , то есть в соответствии с выражением (2.52)

$$k_{э.эф.} = \frac{H_{вб.}}{H_{вф.}}. \quad (2.52)$$

Удельные энергозатраты на разрушение калийного массива и погрузку руды определяются с учетом специфики использования проходческо-очистных комбайнов в реальных условиях функционирования. Например, при работе комбайна неполным сечением исполнительного органа фактические значения удельных энергозатрат увеличиваются вследствие неравномерной и неполной загрузки приводных электродвигателей. При рациональных параметрах породоразрушающих и погрузочных исполнительных органов минимальные удельные энергозатраты достигаются в случае работы проходческо-очистного комбайна полным забоем с номинальной производительностью [161, 162, 198, 200].

### 2.5.2 Оценка технологического уровня организации добычных работ в очистной камере

Значения коэффициента энергоэффективности характеризует производительную работу проходческо-очистного комбайна в очистной камере. Однако практика горного производства показывает, что большая часть времени эксплуатации добычных машин складывается из периодов простоев, технологических перерывов и времени выполнения вспомогательных операций. Общее время эксплуатации комбайна на руднике определяется выражением (2.53)

$$T_{и} = \Sigma T_{п.р.} + \Sigma T_{в.о.} + \Sigma T_{п.т.} + \Sigma T_{р.п.} + \Sigma T_{р.а.}, \quad (2.53)$$

где  $T_{и}$  – общее время эксплуатации комбайна на руднике, ч;  $\Sigma T_{п.р.}$  – суммарное время производительной работы комбайна, ч;  $\Sigma T_{в.о.}$  – суммарное время выполнения вспомогательных операций, ч;  $\Sigma T_{п.т.}$  – длительность технологические перерывов, ч;  $\Sigma T_{р.п.}$  – длительность плановых ремонтов, ч;

$\Sigma T_{p.a.}$  – длительность внеплановых ремонтных работ, вызванных внезапными отказами комбайна, ч [199].

Технологический уровень добычных работ в очистной камере достоверно оценивается комплексным показателем сохранения эффективности – коэффициентом производительной работы  $k_{п.р.}$ , который определяется выражением (2.54) как отношение времени производительной работы комбайна к времени пребывания его в работоспособном состоянии

$$k_{п.р.} = \frac{\Sigma T_{п.р.}}{\Sigma T_{п.р.} + \Sigma T_{в.о.} + \Sigma T_{п.т.}} = \frac{\Sigma T_{п.р.}}{T_{и} - \Sigma T_{р.п.} - \Sigma T_{р.а.}}. \quad (2.54)$$

На практике периоды производительной работы комбайна определяются как суммарное время работы скребкового конвейера-перегрузателя, осуществляющего отгрузку разрушенной калийной руды из призабойного пространства [161]. Область значений коэффициента производительной работы  $k_{п.р.} \in [0;1)$ .

### 2.5.3 Анализ показателей эффективности работы комбайнов

Совокупная оценка эффективности функционирования добычных машин калийных рудников осуществляется посредством соотнесения значений рассмотренных комплексных показателей графическим способом [3, 4]. Зададим координатную плоскость, где ось ординат определяет значения коэффициента энергоэффективности  $k_{э.эф.}$  использования комбайна, а ось абсцисс – коэффициента производительной работы  $k_{п.р.}$  (рисунок 2.21). Выбор условных значений  $k_{э.эф.у.}$  и  $k_{п.р.у.}$  комплексных показателей позволяет разбить плоскость на четыре области.

Функционирование добычной машины, характеризующейся значениями показателей эффективности, находящимися в области 1, сопровождается высокими удельными энергозатратами и низким уровнем организации работ в очистной камере (длительность технологических

перерывов значительно превышает суммарное время производительной работы).

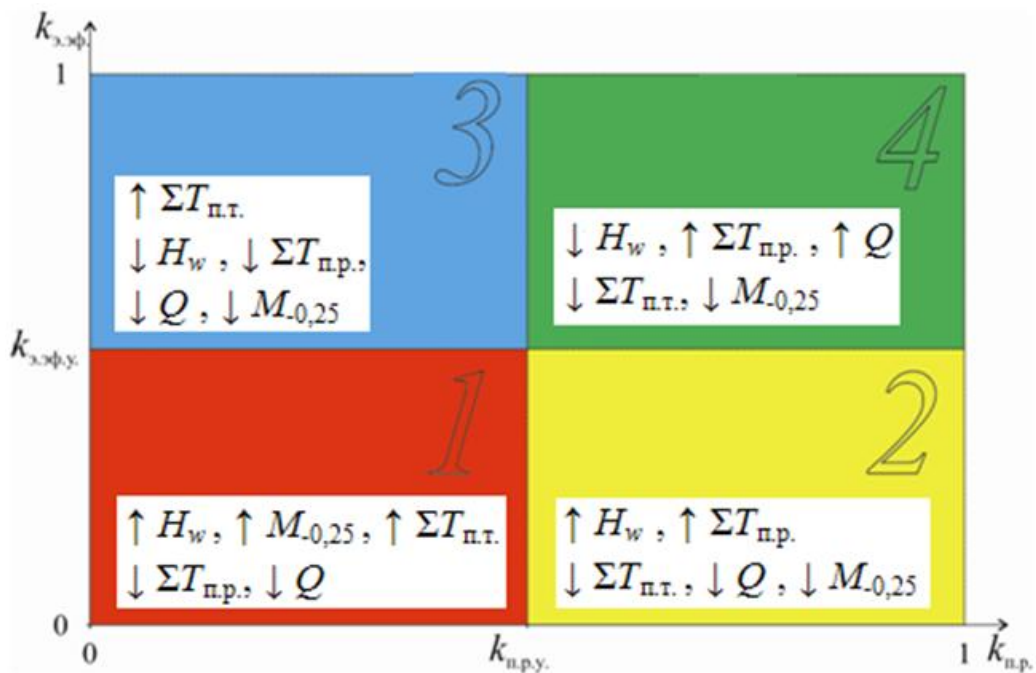


Рисунок 2.21 – Области возможных значений коэффициентов  $k_{п.р.}$  и  $k_{э.эф.}$ .

Значения комплексных показателей эффективности, находящиеся в области 2, типичны для работы комбайна неполным сечением исполнительного органа (при выполнении подрубки пласта) либо для ситуации, когда машинист систематически ограничивает скорость подачи  $V_{п}$  добычной машины на забой вследствие малой производительности самоходного вагона.

Значения комплексных показателей эффективности, находящиеся в области 3, характерны для отработки забоев с большим транспортным плечом до рудоспускной скважины. В этом случае комбайн длительное время работает на холостом ходу, что является следствием снижения производительности самоходных транспортирующих машин [199].

При энергоэффективной работе комбайна и высокопроизводительной работе транспортирующих машин значения комплексных показателей эффективности  $k_{э.эф.}$  и  $k_{п.р.}$  находятся в области 4.

Предложенные методологические подходы позволяют достоверно оценить технический и технологический уровень организации процесса

использования добычного комплекса при добыче калийной руды [34, 161, 198]. Проверка предложенных подходов и решений возможна в ходе выполнения экспериментальных исследований в условиях калийных рудников.

## 2.6 Выводы по главе 2

1. Процесс формирования последовательных элементарных сколов отражает физическую сущность разрушения калийного массива резанием. Активное влияние на процесс формирования геометрических параметров каждого элементарного скола позволяет повысить энергоэффективность добычи калийной руды.

2. Нестабильность параметров последовательных элементарных сколов при разрушении калийной руды с использованием традиционных схем резания обуславливает излишнее измельчение руды и повышение удельных затрат энергии процесса разрушения калийной руды резцами проходческо-очистных комбайнов.

3. Реализация перекрестной схемы резания позволяет сформировать на поверхности разрушаемого забоя области наведенных трещиноватостей и ослаблений, расположенные по контурам выступов, отделяемых от массива единичными крупными сколами. Использование наведенных трещин и ослаблений в процессе отработки каждого слоя массива позволяет снизить силовые и энергетические показатели процесса разрушения калийной руды.

4. Установлено, что разрушение калийного массива резцами планетарно-дисковых исполнительных органов современных проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11/12» при номинальной производительности  $Q = 8$  т/мин осуществляется чрезмерно сближенными резцами при отношении шага резания к толщине стружки  $t/h$ , лежащими вне диапазона рациональных значений. Указанное обуславливает снижение энергоэффективности функционирования комбайнов «Урал-20Р-11/12».

5. Регулирование частоты переносного вращения резцовых дисков пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов добычных

машин калийных рудников обеспечивает поддержание параметров резания в диапазонах рациональных значений  $t/h = 2...4$ , что на практике позволяет реализовать повышение энергоэффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов.

6. Установлено, что производительность комбайнов «Урал-20Р-11/12» ограничивается погрузочной способностью шнеков и производительностью скребковых конвейеров-перегрузателей. Обоснованы предложения по модернизации погрузочного оборудования комбайнов «Урал-20Р-11/12».

7. Всестороннее исследование многофакторного процесса разрушения калийных руд резцами исполнительных органов горных комбайнов возможно при выполнении экспериментов на лабораторном стенде и в реальных условиях функционирования добычных машин.

8. Достоверная оценка эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников осуществляется посредством определения двух комплексных показателей: коэффициента энергоэффективности и коэффициента производительной работы. При этом первый определяется отношением базовых затрат энергии на тонну добытой калийной руды к соответствующей фактической величине, а второй – отношением времени производительной работы к общему времени работоспособного состояния комбайна за анализируемый временной период.

9. Определение комплексных показателей эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников возможно посредством непрерывной регистрации и анализа сигналов изменения мощностей приводных электродвигателей рабочего оборудования добычных машин.

10. Проверка предложенных автором методологических подходов по оценке эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов обеспечивается посредством выполнения экспериментальных исследований в условиях калийных рудников.

## ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ БЛОКОВ КАЛИЙНОЙ РУДЫ ОДИНОЧНЫМ РЕЗЦОМ

### 3.1 Теоретическое описание процесса разрушения калийных руд резанием

Основные закономерности формирования хрупких трещин в калийсодержащих породах заключаются в следующем.

Изменение напряженно-деформированного состояния в калийном массиве, обусловленное внедрением резца, определяет появление сжимающих и растягивающих напряжений, действующих на минеральные зерна соляной породы. Растягивающие напряжения действуют перпендикулярно направлению внешней нагрузки и имеют величину, на порядок меньшую, чем абсолютная величина внешней нагрузки [11, 14, 38]. Данные напряжения, достигая предела прочности калийной руды на растяжение, формируют трещины.

Процесс трещинообразования в калийном массиве является кинетическим и сопровождается пластическим деформированием поликристаллического тела на всех этапах развития. Процесс формирования трещин в калийном массиве традиционно делят на следующие этапы:

- подготовительный – создание локальных перенапряжений в массиве;
- основной – формирование микротрещин;
- завершающий – проращение одной из микротрещин в магистральную макротрещину [27, 187].

На начальном этапе процесса разрушения калийной руды в зоне действия резца формируются локальные неоднородные поля напряжений, осуществляется пластическое деформирование зерен и межзеренного пространства соляной породы. В кристаллах с гранцентрированной кубической решеткой первичным механизмом неупругости является движение дислокаций, приводящее первоначально к упрочнению минерального зерна и далее к образованию микротрещин [115, 168].

Неоднородность полей напряжений обусловлена различием свойств породообразующих минералов. Например, при объемном сжатии величина сжимающих напряжений в сильвините меньше, чем в галите. Зародышами разрушений являются газонаполненные поры, локализованные в межзеренном пространстве и внутри минеральных зерен (рисунок 3.1) [54].

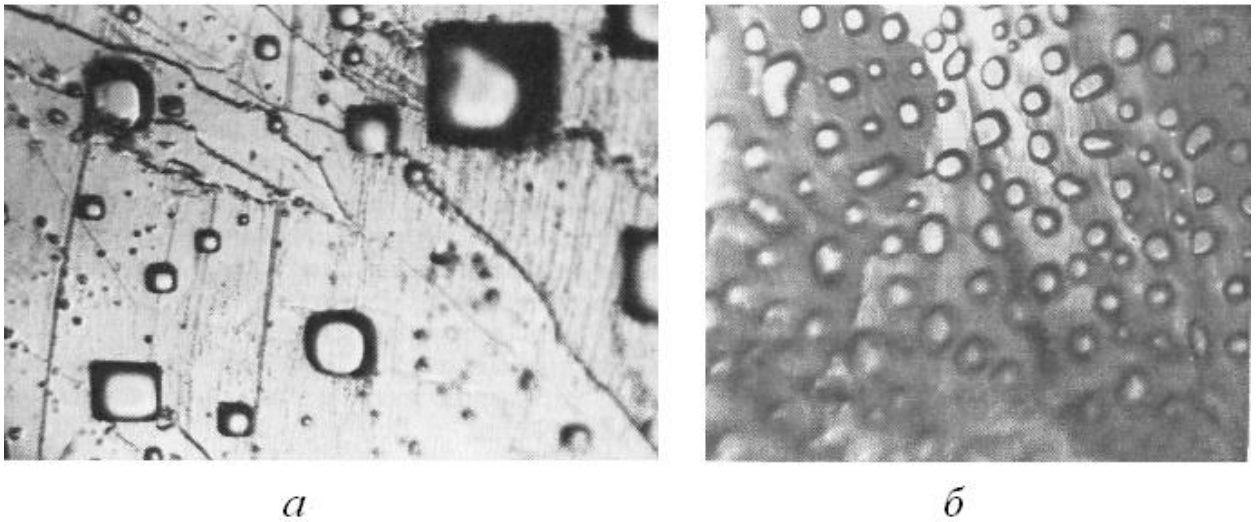


Рисунок 3.1 – Зародыши разрушений – газонаполненные поры:

*a* – в объёме зерна галита (увеличение 50 крат); *б* – в межзёрном пространстве (увеличение 100 крат)

Зарождение и рост микротрещин в массиве калийной руды обусловлены пересечением полос скольжения в зёрнах соляных пород между собой, с границами зёрен и полосами сброса.

Процесс зарождения и развития магистральной трещины является структурно чувствительным и носит пороговый характер. На развитие трещины и формирование поверхности разрушения существенное влияние оказывает специфика минерального строения калийной руды как многокомпонентного тела (рисунок 3.2).





Рисунок 3.2 – Поверхность борозды развала при разрушении блока калийной руды резом с выровненной поверхности

Следует особо подчеркнуть, что микротрещины, формирующиеся при разрушении калийной руды резанием, являются концентраторами напряжений и ослаблений. Использование данных «стартовых» трещин при отработке каждого последующего слоя калийного массива позволит снизить удельные затраты энергии на формирование микротрещин и их излишнее ветвление. Указанное обеспечит повышение энергоэффективности процесса разрушения калийного массива резцами горных машин.

Принято считать, что характер развития трещины определяется, в первую очередь, процессами, реализуемыми впереди и вблизи её вершины [11, 20, 39]. Однако создание областей концентрации напряжений вблизи зоны образования трещины также оказывает существенное влияние на процесс развития трещины, определяет траекторию её движения и позволяет осуществлять направленное разрушение калийного массива. Следовательно, создание разрушаемой поверхности с чередующимися областями ослаблений и сформированными выступами обеспечит разрушение калийного массива

сколами с заданной крупностью и формой, что реализуется на практике посредством использования перекрестной схемы резания [27, 26, 150].

Теоретически исследуем процесс формирования крупных сколов, отделяющихся от калийного массива при реализации перекрестной схемы резания (рисунок 3.3). Породоразрушающий инструмент – резец с прямоугольной режущей кромкой шириной  $b_p$  и плоской передней гранью, с углом резания  $\alpha_p$ .

Резец перемещается в плоскости  $Z$  поперёк резов отработанного слоя калийной руды со скоростью  $V_p$ . Заглубление резца относительно резов предыдущего слоя составляет  $h_3$ .

Ранее реализованные резы создают на поверхности разрушаемого забоя пересекающиеся области концентраторов напряжений и локализации наведенных трещин. Расположение данных областей определяется шагом поперечных и сонаправленных резов.

При внедрении резца в массиве калийной руды создается область напряженного состояния, формирование которой сопровождается пластическим деформированием и дроблением соляной породы. Отделение крупного скола осуществляется при образовании и развитии магистральной трещины вблизи площадки контакта резца с калийным массивом [192].

Особенностью схемы перекрестного резания является то, что отделение каждого крупного скола осуществляется посредством развития уже имеющихся в массиве стартовых трещин, локализованных по контуру каждого сформированного выступа и образованных резами предыдущего слоя. Таким образом, при разрушении забоя перекрестными резами с рациональным шагом резания  $t_{p.л.}$  поверхности элементарных сколов образуются по существующим трещинам, что обуславливает более раннее выполнение условия (2.15).

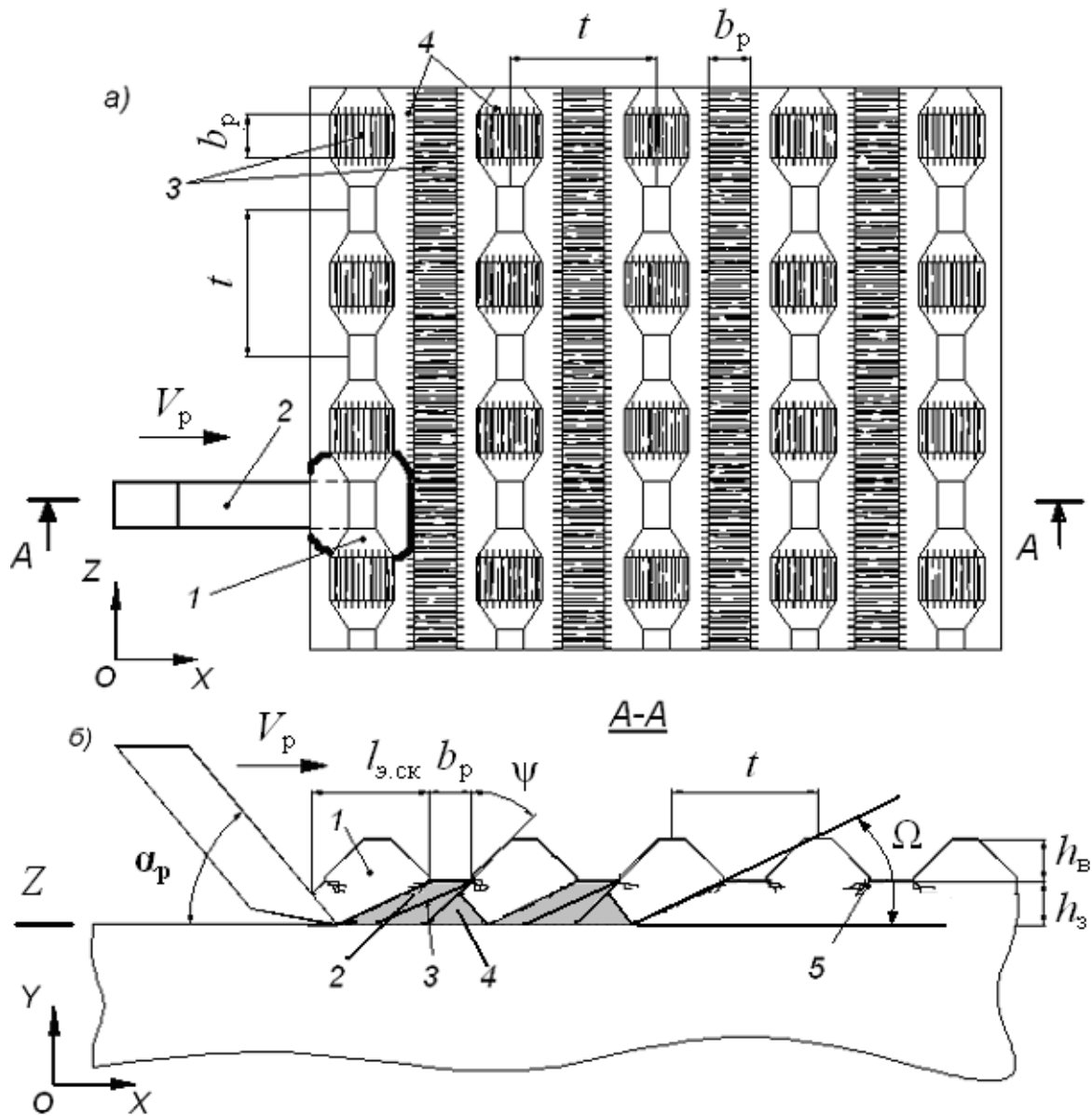


Рисунок 3.3 – Образование крупных сколов в срезе при разрушении массива калийной руды перекрестными резами:

*a* – поверхность забоя, разрушаемая перекрестными резами: 1 – сформированный элементарный скол; 2 – резец; 3 – пересекающиеся резы; 4 – зоны локализации наведенных трещин; *б* – схема образования сколов при движении резца поперек резов отработанного слоя калийного массива: 1 – сформированный элементарный скол с устойчивыми значениями геометрических параметров; 2, 3, 4 – промежуточные сколы; 5 – зоны локализации наведенных трещин

Отделение крупного скола от массива осуществляется при меньших усилиях, а сам процесс разрушения калийного массива характеризуется меньшим количеством раздробленной руды в продуктах разрушения, большим количеством крупных сформированных сколов в добытой руде и

большой энергоэффективностью по сравнению с использованием традиционных схем резания [26, 27, 187].

Формула для определения рационального шага перекрестных резов  $t_{р.п.}$  может быть представлена выражением (3.1)

$$t_{р.п.} = l_{э.ск} + b_p = h_3 \cdot (tg\Omega + tg\alpha_p) + b_p \approx (5...7)h_3, \quad (3.1)$$

где  $l_{э.ск}$  – наибольшая длина крупного скола при заданных параметрах резания, мм;  $h_3$  – величина заглубления резца в калийный массив относительно резов отработанного слоя массива, мм;  $\Omega$  – угол скола элемента длиной  $l_{э.ск}$ , град [209].

Крупные сколы с устойчивыми значениями геометрических параметров формируются между реализованными резами (см. рисунок 3.3, а, б, поз. 1) при шаге резания  $t \leq t_{р.п.}$ . Перемещение резца на расстояние, равное шагу резания  $t$ , обусловит отделение от массива одного крупного сформированного скола. Следовательно, при постоянной скорости движения резца  $V_p$  частота реализации крупных сколов может быть с достаточной точностью определена выражением (3.2)

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{(t/V_p)} = \frac{V_p}{t}, \quad (3.2)$$

где  $T_1$  – время перемещения резца на расстояние равное шагу резания  $t$ , с.

Участки массива, расположенные между сформированными выступами, разрушаются промежуточными сколами (см. поз. 2, 3, 4 рисунок 3.3, б). При рациональных параметрах резания промежуточных сколов может быть три или четыре, частота их реализации  $f_2$  с достаточной точностью рассчитывается по формуле (3.3)

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{V_p}{3b_p} \cdot \frac{b_p}{h_3} = \frac{V_p}{3h_3} = \frac{V_p}{3b_p} k_{в.з.}, \quad (3.3)$$

где  $T_2$  – время реализации промежуточных сколов, с;  $k_{в.з.}$  – коэффициент взаимного обнажения забоя [116, 121, 187].

Указанное позволяет сформулировать гипотезу: разрушение калийного

массива перекрестными резами с реализацией наведенных трещин обуславливает снижение силовых параметров процесса резания за счет снижения удельных энергозатрат на образование и ветвление микротрещин и уменьшение дробления и пластического деформирования руды в предрезцовом пространстве.

Предполагается, что снижение средних и пиковых значений сил, действующих на резцы, достигается встречным развитием трещин сдвига, локализованных по контурам сформированных регулярных [209].

Проверка сформулированной гипотезы возможна сравнением результатов экспериментальных исследований процесса разрушения блоков калийной руды одиночным резцом на лабораторном стенде с использованием шахматной и перекрестной схем резания, при одинаковых параметрах резания  $t$  и  $h$ .

### **3.2 Компьютерное моделирование процесса разрушения калийной руды одиночным резцом**

Теоретические исследования процесса разрушения калийной руды одиночным резцом дополнены посредством разработки компьютерной модели и проведения вычислительного эксперимента в программной среде «Компас-3D» (блок прочностных расчетов *APM FEM*) с использованием метода конечных элементов [165, 197].

Фрагмент калийного массива задавался прямоугольным параллелепипедом размером  $100 \times 100 \times 50$  мм, который разбивался сеткой конечных элементов в виде правильных тетраэдров. Физико-механические свойства моделируемого массива принимались в соответствии с данными таблицы 1.1. Массив рассматривался как изотропное, неподвижное тело.

В одной из боковых поверхностей массива моделировалась площадка контакта с резцом, к которой прикладывалась распределённая нагрузка. Моделируемый резец имел прямоугольную режущую кромку шириной  $b_p = 10$  мм, плоскую переднюю грань и угол резания  $\alpha_p = 50^\circ$ . Анализ

положения изолиний напряжений в массиве позволил качественно оценить характер формирования последовательных крупных сколов в срезе [20].

При разрушении массива резом с выровненной поверхности изолинии напряжений имеют криволинейную форму. Процесс отделения скола от массива является структурно чувствительным, характер распространения трещин определяется формой и крупностью элементов, составляющих массив (рисунок 3.4). Образующая нижней поверхности разрушения криволинейна. Отделение крупного скола от массива осуществляется полукруглой трещиной, что согласуется с данными работы [21].

Моделирование процесса формирования крупных сколов при разрушении калийной руды шахматными резами выполнялось с использованием фрагмента массива со свободной поверхностью, форма которой характерна для шахматной схемы разрушения (рисунок 3.5). Области пересечения нижних и боковых поверхностей реализованных резов являются концентраторами напряжений, влияющими на процесс формирования и развития магистральной трещины, осуществляющей отделение от массива крупного элементарного скола [58].

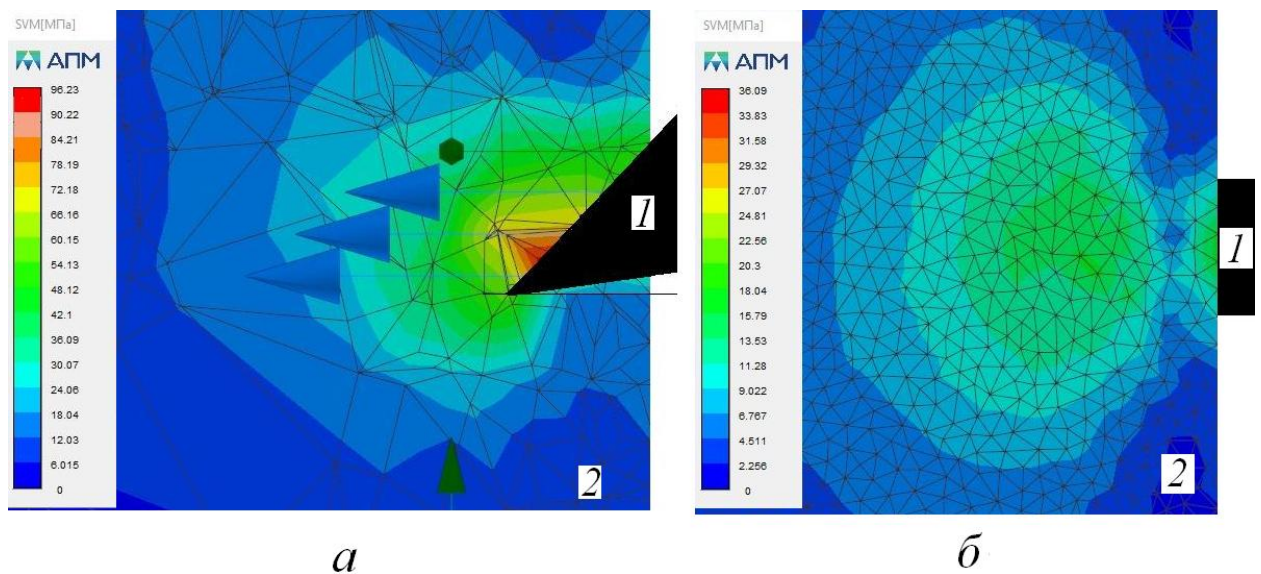


Рисунок 3.4 – Результаты компьютерного моделирования процесса разрушения калийного массива одиночным резом резами с выровненной поверхности:

*а* – вид сбоку; *б* – вид сверху; *1* – резец; *2* – массив



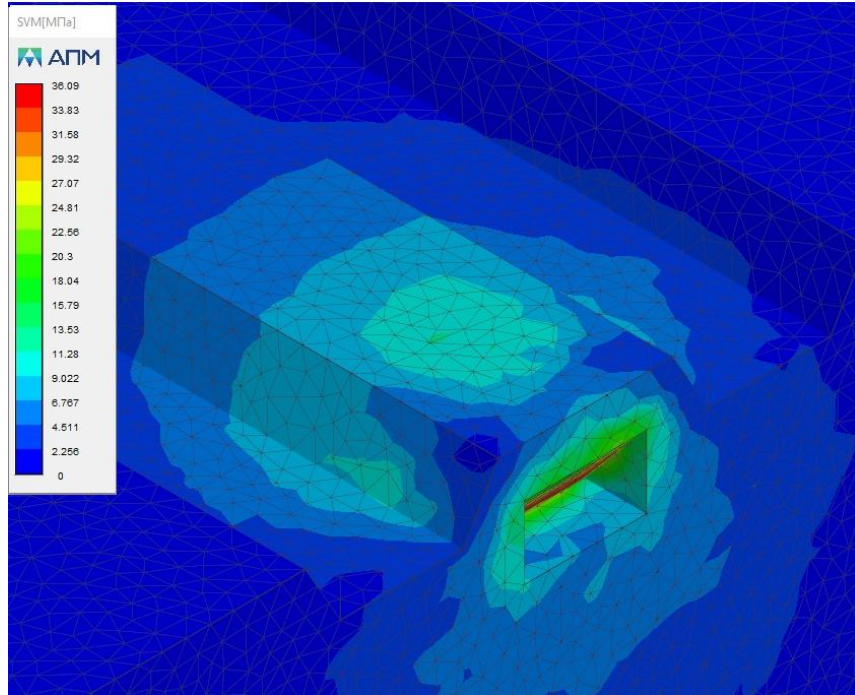


Рисунок 3.5 – Результаты компьютерного моделирования процесса разрушения калийного массива одиночным резцом шахматными резами

Образование поверхностей разрушения крупных элементарных сколов при реализации перекрестной схемы резания калийного массива при шаге резания  $t \leq t_{р.п.}$  осуществляется по областям концентрации напряжений, формирующим контур каждого крупного скола (рисунки 3.6 и 3.7).

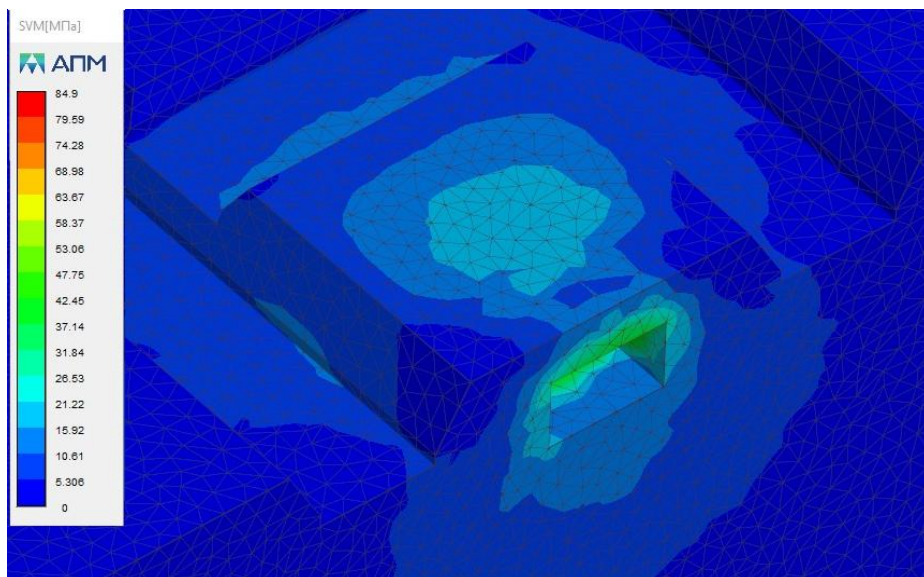


Рисунок 3.6 – Аксонометрическая проекция расположения изолиний напряжений на поверхности моделируемого калийного массива при разрушении перекрестными резами

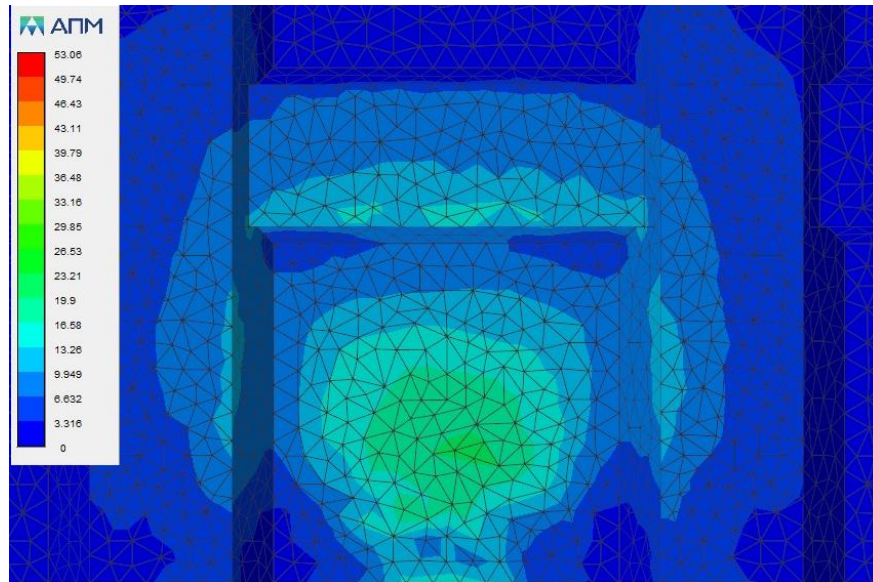


Рисунок 3.7 – Расположение изолиний напряжений на поверхности моделируемого калийного массива при разрушении перекрестными резами (вид сверху)

Согласно полученным результатам компьютерного моделирования, при использовании перекрестной схемы резания отделение крупного скола от калийного массива осуществляется не только за счет формирования и развития трещин в предрезцовом пространстве, но и посредством развития имеющихся в массиве наведенных трещин, сформированных при отработке предыдущих слоёв массива (рисунок 3.8).

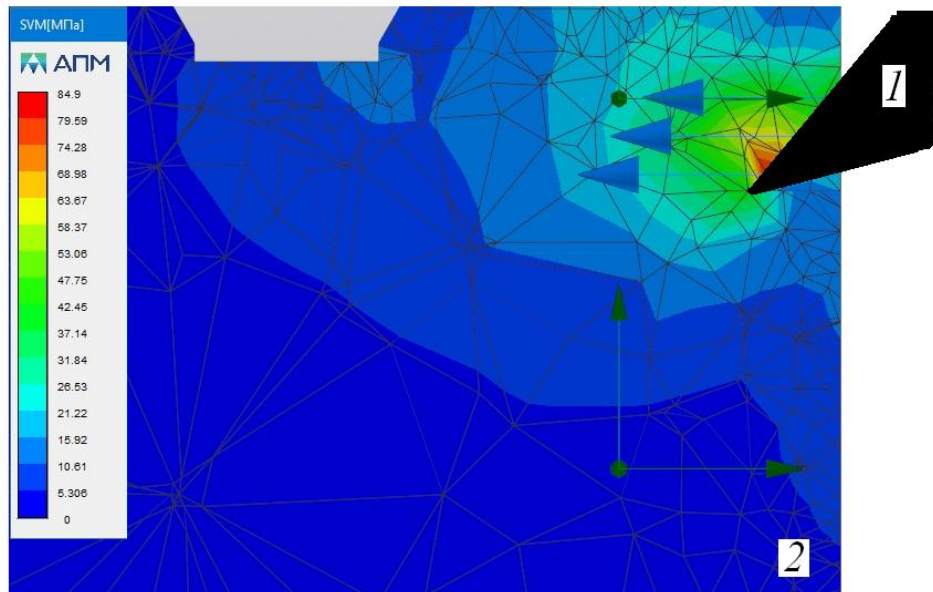


Рисунок 3.8 – Результаты компьютерного моделирования процесса разрушения калийного массива одиночным резцом перекрестными резами: 1 – резец; 2 – массив



Это обуславливает снижение силовых нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент горных комбайнов при использовании перекрестной схемы резания, а также определяет повышение энергоэффективности процесса добычи калийных руд механизированным способом.

### **3.3 Проверка результатов теоретических исследований процесса отделения крупных элементарных сколов от калийного массива при разрушении резанием**

Изучение процесса разрушения калийной руды резцами добычных машин является сложной задачей, решение которой требует выполнения комплексных исследований. Развитие данного процесса во времени зависит от ряда случайных факторов, часть из которых невозможно учесть аналитически. Следовательно, целесообразным является использование экспериментально-статистического метода исследований как наиболее эффективного, апробированного и проверенного при разработке типовых методик расчёта параметров породоразрушающих исполнительных органов горных машин [2, 40, 41, 117, 202].

Целью экспериментальных исследований является выявление закономерностей отделения крупных элементарных сколов от блоков калийной руды при разрушении резами с выровненной поверхности, а также шахматными и перекрестными резами.

В соответствии с указанной целью сформулированы задачи экспериментальных исследований.

1. Проектирование и изготовление лабораторного стенда для изучения процесса отделения крупных сколов от блоков калийной руды при разрушении одиночным резцом.

2. Разработка методики экспериментальных исследований.

3. Исследование процесса отделения крупных сколов при разрушении блоков калийной руды резами с выровненной поверхности, шахматными и перекрестными резами.

4. Определение силовых и энергетических параметров процесса резания. Спектральный анализ графиков изменения сил резания, полученных при проведении экспериментальных исследований.

5. Оценка гранулометрического состава продуктов разрушения. Определение количества труднообогатимых классов крупностью «-0,25 мм» в отделенной от блока калийной руде.

Физическое моделирование процесса разрушения блоков калийной руды одиночным резцом возможно на лабораторном стенде. К конструкции стенда сформулированы следующие требования.

1. Наличие сменных резцов.

2. Наличие привода, обеспечивающего перемещение резца.

3. Использование измерительной аппаратуры, состоящей из откалиброванных датчиков и регистрирующих приборов, обеспечивающих запись и обработку информации об основных параметрах процесса резания: силы резания, величине перемещения и скорости движения резца.

4. Исключение масштабного фактора при проведении исследований обеспечивается при использовании достаточно большого блока калийной руды без прослоек глины и локальных включений [25, 192, 203].

### **3.4 Общие положения методики исследований**

Физическое моделирование процесса отделения крупных сколов осуществлялось на лабораторном стенде при резании блока калийной руды, отобранного из пласта «Красный-II» Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Исследование на физической модели позволило использовать точную контрольно-измерительную и регистрирующую аппаратуру и задать различные параметры процесса резания, что не всегда возможно в условиях

рудника. Исключение масштабного фактора и воспроизведение особенностей процесса разрушения массива одиночным резцом определяют высокую достоверность результатов исследований [58].

Процесс разрушения блоков калийной руды резанием относится к случайным и приводится к стационарному заданием постоянных величин: скорости резания  $V_p$  и заглубления резца в массив  $h_3$ . Свойства калийной руды изменяются в весьма узком диапазоне, следовательно, среднее значение силы резания будет величиной постоянной [27, 54, 57]. Эргодичность исследуемого процесса проверялась при сравнении корреляционных функций, полученных со смещением начала точки отчета.

Необходимая доверительная вероятность результатов экспериментальных исследований принята 0,9 при относительной погрешности 0,1 [2, 117].

### **3.5 Лабораторная стендовая установка для исследования процесса отделения последовательных крупных сколов при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом**

В соответствии с требованиями, приведенными в подразделе 3.3, спроектирована и изготовлена лабораторная стендовая установка (рисунок 3.9), являющаяся физической моделью процесса отделения последовательных крупных сколов от калийного массива при разрушении резцами горных комбайнов. Стендовая установка позволяет определить силовые и энергетические показатели процесса разрушения калийного массива и количественно оценить гранулометрический состав продуктов разрушения (форма и размеры крупных сколов, количество труднообогатимых классов) при заданных параметрах и схеме резания [25].

Стендовая установка состоит из сварной рамы 4, соединённой с основанием 8 сварными швами и укосинами. На раме 4 жёстко закреплён силовой двусторонний гидроцилиндр 5, на соединительной проушине которого смонтирован измерительный гидроцилиндр 3 с закрепленным

полноразмерным резцом *11*. Подача рабочей жидкости (масло И-20А) в полости гидроцилиндра *5* осуществляется насосной станцией *1*. К измерительному гидроцилиндру *3* подсоединен датчик давления для измерения силы резания  $P_z$  на резце *11*.

Для обеспечения прямолинейного движения резца *11* в конструкции станда предусмотрены три вертикальных направляющих *6*, по которым перемещаются ролики *7* измерительного гидроцилиндра *3*. Блок калийной руды *10* устанавливается на основании *8* и фиксируется в неподвижном положении зажимами *2* и *9*. Шаг резания  $t$  и толщина стружки  $h$  устанавливаются посредством перемещения блока *10* [192].

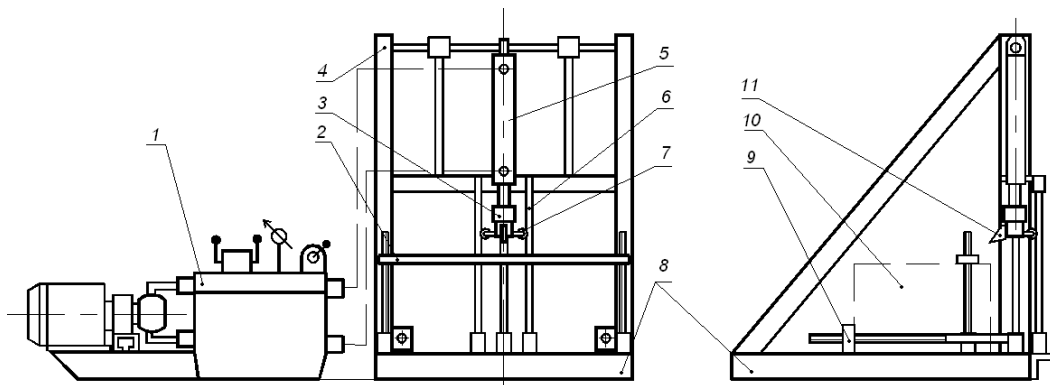


Рисунок 3.9 – Лабораторная стандовая установка для исследования процесса отделения крупных сколов при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом

Гидросистема станда (рисунок 3.10) состоит из двух шестеренных насосов *3* и *16*, приводимых от трехфазного асинхронного двигателя *1* через редуктор *2*. Рабочая жидкость подается из маслобака *12* в полости силового гидроцилиндра *13*, шток которого соединен с измерительным гидроцилиндром *14* и резцом *15*. Направление движения резца определяется переключением золотника *11*, а регулирование скорости поступательного движения реализуется посредством регулятора расхода *9*. Расширение диапазона скорости подачи резца *15* при внедрении в разрушаемый блок возможно посредством работы одного или двух шестеренных насосов. Управление шестеренным насосом *16* реализуется золотником *7*. Для защиты

системы от перегрузок предусмотрен предохранительный клапан 4, давление контролируется манометром 5, подключенным к напорному трубопроводу через золотник 6.

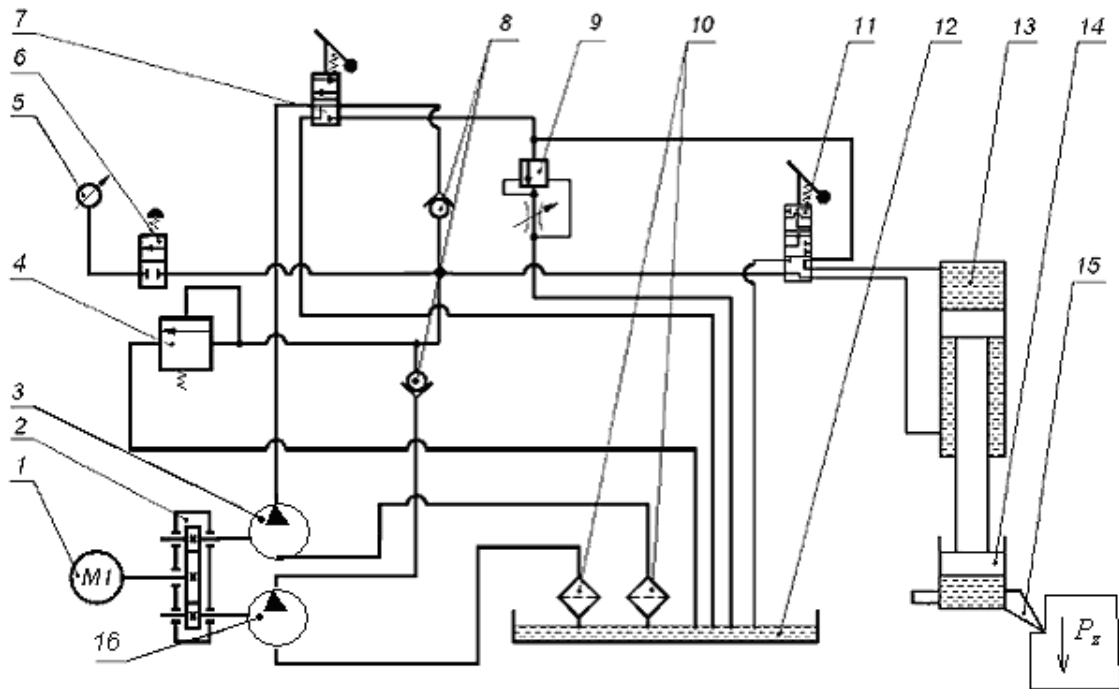


Рисунок 3.10 – Схема гидравлическая стендовой установки для исследования процесса отделения крупных сколов при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом



Рисунок 3.11 – Общий вид лабораторной стендовой установки (отдельно показан измерительный гидроцилиндр с резцом, датчиками давления и перемещения)

Также в гидросистеме предусмотрены обратные клапаны 8 и фильтры 10 для очистки рабочей жидкости. Общий вид лабораторного стенда представлен на рисунке 3.11 [25].

Измерительная система лабораторной стендовой установки (рисунок 3.12) включает в себя датчик давления ДД, датчик перемещения, многоканальный аналого-цифровой преобразователь АЦП/ЦАП, персональный компьютер.

Потенциометрический малогабаритный датчик давления МД-250 обеспечивает измерение давлений неагрессивных гидравлических жидкостей в диапазоне 0...25 МПа. Аналоговый выходной сигнал датчика изменяется по напряжению от 0 до 6,5 В. Давление в измерительном гидроцилиндре  $P_{изм}$  пропорционально силе резания  $P_z$ , которая рассчитывается по формуле (3.4)

$$P_z = P_{изм} S_{пор}, \quad (3.4)$$

где  $P_{изм}$  – давление в измерительном гидроцилиндре, МПа;  $S_{пор}$  – площадь поршня в измерительном гидроцилиндре, мм<sup>2</sup>.

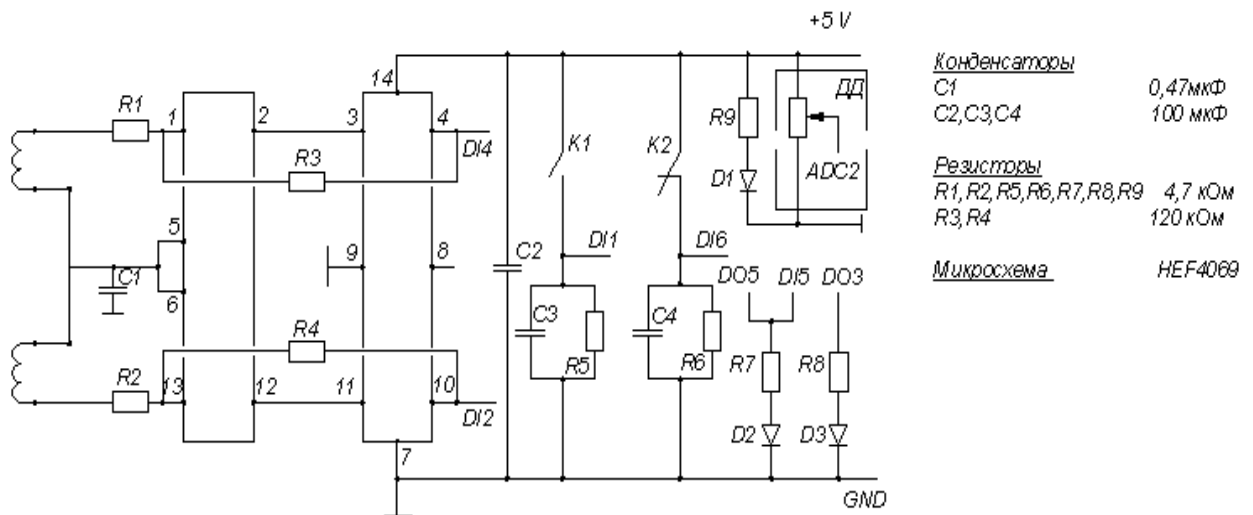


Рисунок 3.12 – Схема подключения контрольно-измерительной аппаратуры

Изготовленный на основе шагового двигателя датчик перемещения представляет собой простейший энкодер, преобразующий линейное перемещение в двоичный код Грея. Формирование сигнала осуществляется

посредством микросхемы *HEF4069*. Ввод схемы в линейную область реализован на одном инверторе.

Обмотки шагового двигателя соединены накоротко для устранения паразитных колебаний в каналах энкодера, что обеспечивает удовлетворительное демпфирование и снижение скорости нарастания сигнала при больших частотах вращения ротора шагового двигателя. Сигнал энкодера программно дифференцируется для определения скорости движения резца.

Сигналы датчиков давления и перемещения преобразуются посредством модуля АЦП/ЦАП *E-154* (производитель – компания *L-CARD*), вводятся и регистрируются в персональный компьютер. Монтаж контрольно-измерительной аппаратуры выполнен кабелем «витая пара» с целью защиты от помех.

Модуль *E-154* (рисунок 3.13) подсоединяется к персональному компьютеру стандартной шиной *USB*, работает совместно со специальным программным обеспечением, являющимся, по сути, многоканальным регистратором [192].



Рисунок 3.13 – Модуль АЦП/ЦАП *E-154* (*L-CARD*)

Калибровка датчиков давления и перемещения осуществлялась в составе собранной измерительной схемы. Датчик давления МД-250 калибровался с использованием грузопоршневого манометра МП-60 (рисунок 3.14) и образцового манометра 1-го класса точности, прошедшего

госповерку. Датчик перемещения калибровался с помощью эталонного метра. Данные калибровки приведены на рисунке 3.15 [192].

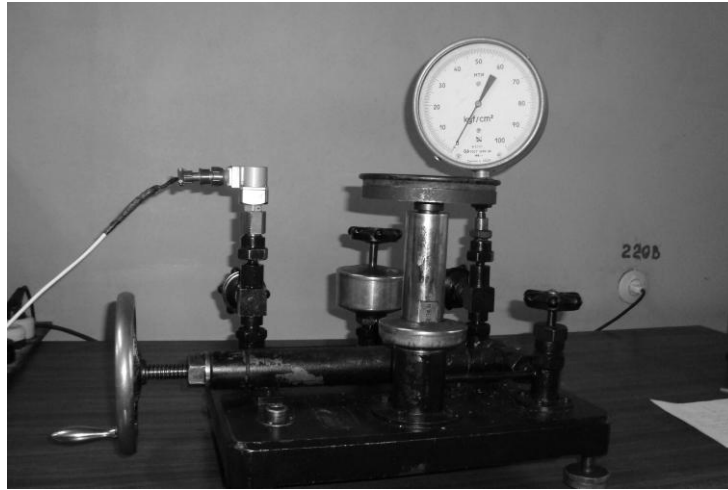


Рисунок 3.14 – Калибровка датчика давления МД-250 с использованием грузопоршневого манометра

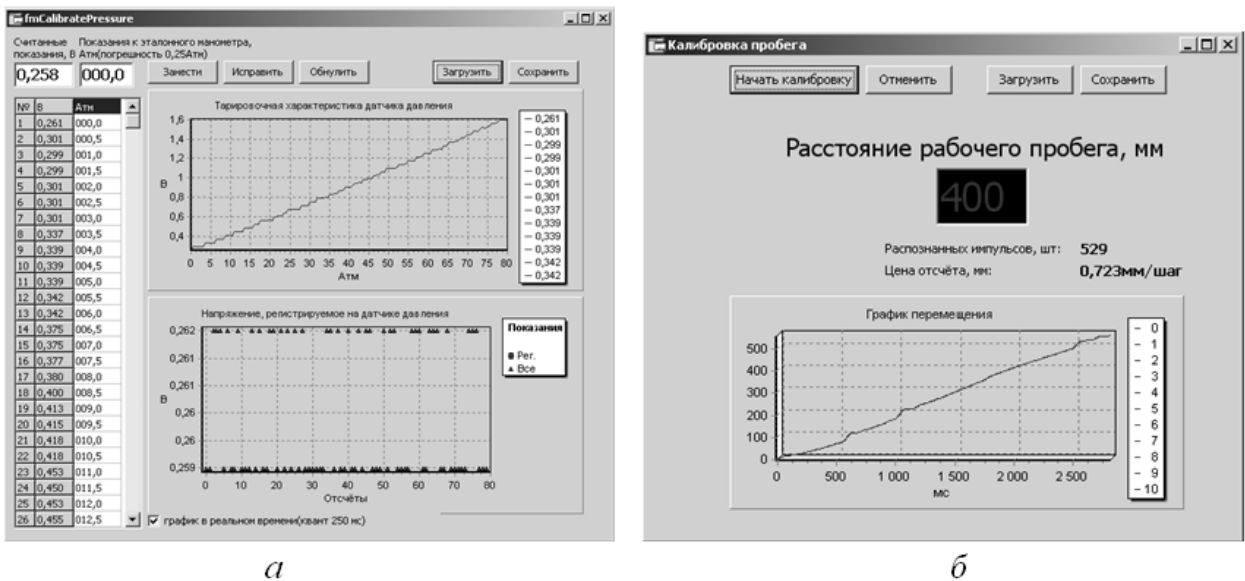


Рисунок 3.15 – Результаты калибровки датчика давления МД-250 (а) и датчика перемещения (б)

Оценка гранулометрического состава продуктов разрушения осуществлялась с использованием комплекта лабораторных сит [45, 144, 148, 158, 159].



### 3.6 Методика экспериментальных исследований процесса отделения последовательных крупных сколов при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом

#### 3.6.1 Исходные данные и измеряемые параметры

Лабораторные исследования выполнялись на блоках калийной руды размерами  $600 \times 300 \times 300$  мм, отобранных на руднике БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» из пласта «Красный-II» Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Сопrotивляемость резанию испытываемой калийной руды  $A_p = 400 \dots 430$  Н/мм. В качестве породоразрушающего инструмента на лабораторном стенде использован полноразмерный резец с прямоугольной режущей кромкой шириной  $b_p = 10$  мм, плоской передней гранью, углом резания  $\alpha_p = 50^\circ$  и задним углом  $\beta_p = 5^\circ$ . Силовой гидравлический привод стенда обеспечивает движение резца со скоростью  $V_p = 0,1$  м/с. Испытываемый блок калийной руды разрушался резами с выровненной поверхности, шахматными и перекрестными резами [27, 25].

Измерительная система лабораторной стендовой установки осуществляет измерение, регистрацию, сохранение и обработку сигналов датчиков давления и перемещения.

Аналоговый сигнал датчика давления изменяется пропорционально мгновенным значениям силы резания  $P_z$ . Погрешность измерений датчика не превышает 1,5 %.

Датчик перемещения – энкодер, реализует контроль линейных перемещений полноразмерного резца стендовой установки, что позволяет оценить общую динамику процесса резания.

Запись контролируемых параметров осуществлялась автоматически специализированным программным обеспечением стенда с шагом регистрации данных 10 мс.

### 3.6.2 Порядок проведения лабораторных экспериментов

В ходе подготовки лабораторной стендовой установки к проведению экспериментальных исследований выполнялись калибровка датчиков, их установка на стенд и проверка правильности сборки измерительной цепи.

Калийный блок осматривался, устанавливался на раму лабораторного стенда и фиксировался зажимами. Перед началом каждого эксперимента формировалась характерная для исследуемой схемы резания поверхность разрушаемого блока.

Запуск программного обеспечения стендовой установки активизировал каналы сбора данных. Отчетные резы выполнялись с записью измеряемых параметров на жесткий диск персонального компьютера. Данные по каждому замеру фиксировались в журнале экспериментов по форме таблицы 3.1.

Исследования проводились при шаге резания  $t = 35$  мм и величине заглубления резца в массив  $h_3 = 5$  мм, то есть полная толщина стружки составляла  $h = 10$  мм. Данные параметры резания выбраны из условия нахождения в рациональном диапазоне значений отношения  $t/h$ .

Таблица 3.1 – Форма записи данных в журнале экспериментов

№ опыта	№ кадра осциллограммы	Условия проведения эксперимента				Масса продуктов разрушения $G$ , кг	Средняя сила резания $P_z$ , Н	Примечания
		$h$ , мм	$t$ , мм	длина реза $L$ , мм	вид реза			

После выполнения каждого отчетного реза продукты разрушения собирались и взвешивались. Удельные затраты энергии процесса резания рассчитывались по формуле (3.5)

$$H_w = 0,27 \frac{P_z L \gamma_k}{G \cdot 10^6}, \quad (3.5)$$

где  $H_w$  – удельные затраты энергии при разрушении блока калийной руды, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $L$  – длина реза, м;  $G$  – масса продуктов разрушения, кг;  $\gamma_k$  – плотность калийной руды в разрушаемом блоке, кг/м<sup>3</sup>.

Крупные сколы отсортировывались, осуществлялся анализ их формы, обследовались поверхности разрушения. Гранулометрический состав руды, отделенной от испытываемого блока, оценивался по стандартной методике с использованием комплекта лабораторных сит (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Форма записи данных при оценке гранулометрического состава калийной руды, отделенной от испытываемого блока

Граничные размеры частиц, мм	Массовое содержание фракций	
	грамм	%
≥ 5		
3...5		
1...3		
0,5...1		
0,25...0,5		
≤0,25		
Сумма		

Из анализа исключались резы, отличавшиеся по направлению, виду или другим параметрам и условиям от описанных выше.

### 3.6.3 Методика обработки результатов экспериментов

Обработка результатов экспериментов осуществлялась с использованием методов математической статистики и спектрального анализа. При анализе графиков изменения силы резания определялись среднее значение, среднеквадратичное отклонение, дисперсия, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации силы резания, проводился корреляционный и спектральный анализ [52, 88, 117, 130, 144].

Определение вышеперечисленных характеристик осуществлялось по известным формулам (3.6)–(3.9)

$$m_p = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} P_i, \quad (3.6)$$

где  $m_p$  – среднее значение силы резания  $P_z$ , Н;  $n_p$  – количество интервалов дискретизации;  $P_i$  – мгновенное значение силы резания в заданный момент времени  $i$ , Н.

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_p} (P_i - m_p)^2}{n_p - 1}}, \quad (3.7)$$

где  $\sigma_p$  – среднеквадратичное отклонение силы резания  $P_z$ , Н.

$$D_p = \frac{1}{n_p - 1} \sum_{i=1}^{n_p} [P_i - m_p]^2, \quad (3.8)$$

где  $D_p$  – дисперсия выборки силы резания  $P_z$ , Н<sup>2</sup>.

$$v_p = \frac{\sigma_p}{m_p}, \quad (3.9)$$

где  $v_p$  – коэффициент вариации силы резания  $P_z$ .

Расчёт автокорреляционной функции  $p(r)$  силы резания осуществляется по формуле (3.10)

$$p(r) = \frac{1}{(n_p - r)} \sum_{i=1}^{n_p - r} (P_i - m_p)(P_{i+r} - m_p), \quad (3.10)$$

где  $r=0...m_r$  – номер интервала дискретизации;  $m_r \leq n_p/3$ .

Спектр силы резания определяется выражением (3.11)

$$Q(t) = 2\Delta t + 4\Delta t \sum_{r=1}^{m_r} D_r p_r \cos\left(\frac{3,14rf}{f_c}\right), \quad (3.11)$$

где  $\Delta t$  – значение интервала дискретизации;  $f=1...f_c$  – частота реализации сколов,  $f_c=1...80$ . Параметр  $D_r$  определяется выражением (3.12)

$$D_r = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{3,14r}{0,5}\right), & r = 0...m_r, \\ 0, & r > m_r. \end{cases} \quad (3.12)$$

Определение частотного состава сигнала силы резания позволило выявить частоту реализации крупных сколов, составляющих срез, при разрушении блоков калийной руды одиночным резцом [52, 130].

### 3.7 Результаты экспериментальных исследований

#### 3.7.1 Результаты экспериментальных исследований процесса отделения крупных сколов от калийного массива при разрушении резами с выровненной поверхности

Разрушение испытываемых блоков полноразмерным резцом стендовой установки является многофакторным циклически повторяющимся процессом чередования фаз контактного дробления и формирования крупных сколов калийной руды. Отделение каждого крупного скола сопровождается образованием ядра уплотнения и неупругим деформированием калийной руды. Продукты разрушения содержат как крупные элементы, так и пылевидные частицы [209].

Крупный скол отделяется от поверхности блока руды полукруглой трещиной. Образующие боковых поверхностей крупных сколов вогнуты относительно открытой поверхности, что объясняется неустойчивым движением магистральной трещины на завершающем участке распространения (рисунок 3.16, *а, б*) – участке долома.

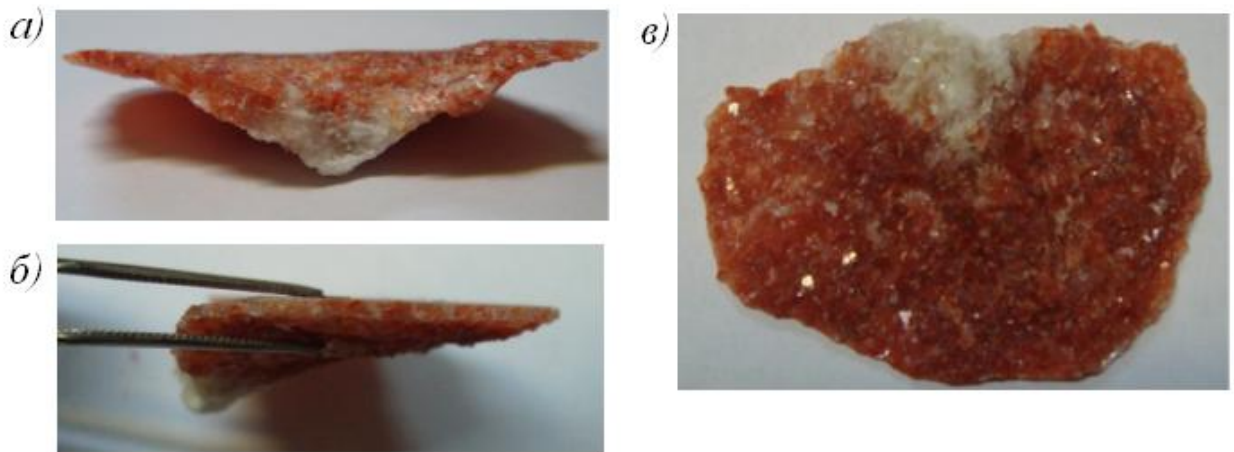


Рисунок 3.16 – Крупный скол, отделенный от блока калийной руды при разрушении резами с выровненной поверхности:

*а* – поперечное сечение крупного скола; *б* – вид сбоку; *в* – нижняя поверхность разрушения

Крупные сколы имеют вытянутую, лещадную форму, поперечное сечение трапецевидное, при этом в зоне контакта резца с массивом наблюдается выраженная область пластического деформирования руды (рисунок 3.16, *в*).

Боковой развал формируется не на всю глубину реза (рисунок 3.17, *а*). Боковые поверхности разрушения выпуклые в сторону открытой поверхности. Дно реза характеризуется наличием нарушенного трещиноватого поверхностного слоя, имеет лунки выкола, формирующиеся при отделении крупных сколов от разрушаемого блока (рисунок 3.17, *б*). Структура поверхностей разрушения крупных сколов и боковых поверхностей резов характерна для хрупкого разрушения.

Определяющее влияние на процесс отделения крупных сколов от испытываемого блока при разрушении резами с выровненной поверхности оказывает структура калийной руды, так как ширина режущей кромки резца и минеральные зерна руды имеют размеры одного порядка [21, 27].

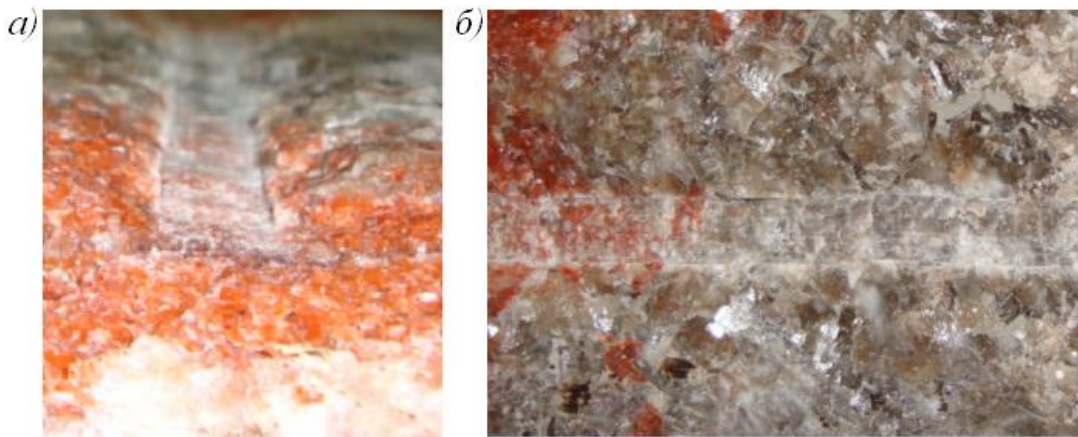


Рисунок 3.17 – Поверхности разрушения, образованные при разрушении блока калийной руды резами с выровненной поверхности:

*а* – боковые поверхности; *б* – дно реза

Силовые параметры процесса разрушения блоков руды резами с выровненной поверхности анализировались по трем осциллограммам (рисунок 3.18), полученным при одинаковых условиях ( $h=10$  мм,  $t/h > 7,2$ ).

Полученное значение средней силы резания является постоянной величиной  $m_p = 2400$  Н [209].

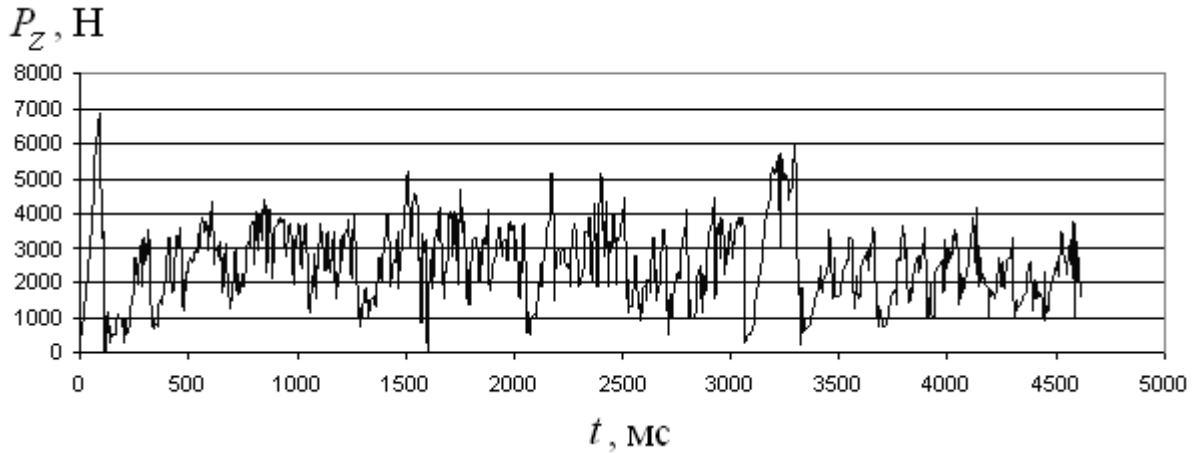


Рисунок 3.18 – Изменение силы резания при разрушении блоков калийной руды резами с выровненной поверхности

Полученное значение средней силы резания позволило определить сопротивляемость резания  $A_p$  испытываемого блока калийной руды. В соответствии с зависимостями (2.23) и (2.24)

$$A_p = \frac{P_z}{hk_b} = \frac{P_z}{h(0,16 + 0,042b_p)} = \frac{2400}{10(0,16 + 0,042 \cdot 10)} = 414 \text{ Н/мм.} \quad (3.13)$$

Сравнение значения сопротивляемости резания, полученного экспериментальным путем и рассчитанного по формуле (3.13), со значением, приведенным в [69], свидетельствует о высокой достоверности результатов эксперимента.

Графики автокорреляционных функций силы резания, построенные при смещении точек отчета, практически не затухают. Период колебаний близок к постоянному (рисунок 3.19), а процесс – к стационарному [2].

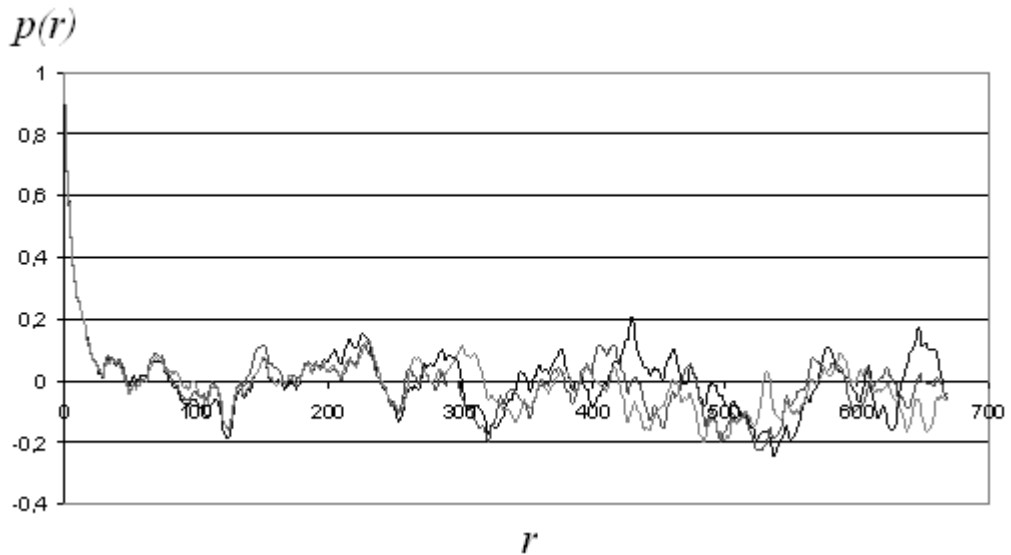


Рисунок 3.19 – Автокорреляционная функция силы резания при разрушении блоков калийной руды резами с выровненной поверхности (графики построены со смещением точек отсчёта)

Частотный анализ силы резания показывает, что в анализируемом процессе спектр выделяется на частоте 2 Гц, что характеризует частоту формирования крупных сколов (рисунок 3.20).

Методика исследований предусматривала определение гранулометрического состава продуктов разрушения калийной руды резами с выровненной поверхности и расчёт удельных энергозатрат процесса резания. Результаты отсева отделенной от блока руды представлены в таблице 3.3.

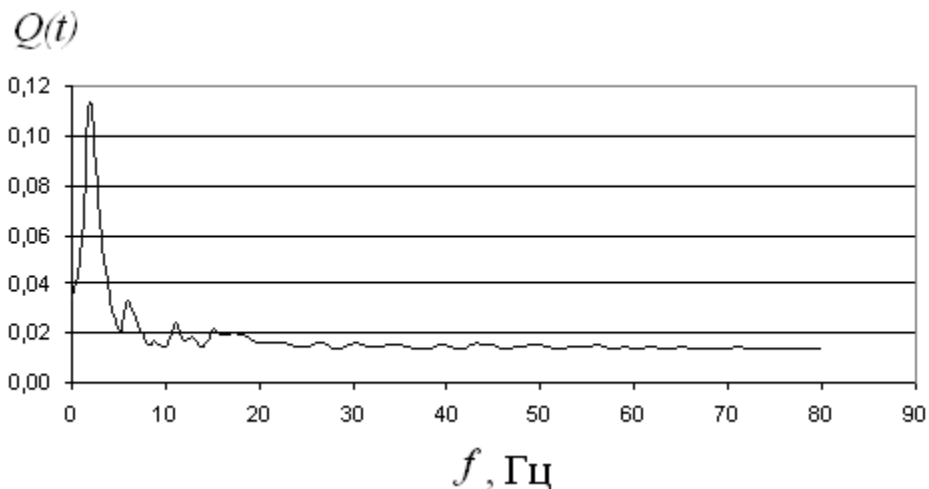


Рисунок 3.20 – Приведенная спектральная плотность силы резания при разрушении калийного массива резами с выровненной поверхности



Таблица 3.3. – Гранулометрический состав калийной руды, отделенной от образца резами с выровненной поверхности при  $h=10$  мм

Граничные размеры частиц, мм	Массовое содержание фракций	
	грамм	%
$\geq 5$	56,46	71,91
3...5	3,20	4,07
1...3	9,60	12,22
0,5...1	3,60	4,58
0,25...0,5	2,77	3,53
$\leq 0,25$	2,90	3,69
Сумма	78,53	100,00

Значение среднего квадратичного отклонения силы резания при разрушении образца калийной руды резами с выровненной поверхности при  $h = 10$  мм составило  $\sigma_{Pв} = 1045,8$  Н. Удельные затраты энергии процесса разрушения калийной руды резами с выровненной поверхности  $H_w=3,6$  кВт·ч/м<sup>3</sup>, что в целом соответствует результатам, полученным ранее авторами работ [150, 168] (см. рисунок 2.7, а).

### **3.7.2 Результаты экспериментальных исследований процесса отделения крупных сколов при разрушении калийного массива шахматными резами**

Разрушение испытываемых блоков полноразмерным резцом стендовой установки с использованием шахматной схемы резания осуществлялось с предварительно сформированной поверхности. Параметры схемы резания: шаг резания  $t = 35$  мм; величина заглабления резца в массив относительно резов отработанного слоя  $h_3 = 5$  мм; полная толщина стружки  $h = 10$  мм.

При разрушении блоков калийной руды шахматными резами боковые поверхности крупных сколов формируются по поверхностям разрушения резов отработанного слоя массива. Крупные сколы, как правило, разделяются

на 2...3 фрагмента с поперечными размерами 20...30 мм и длиной 15...40 мм (рисунок 3.21) [209].

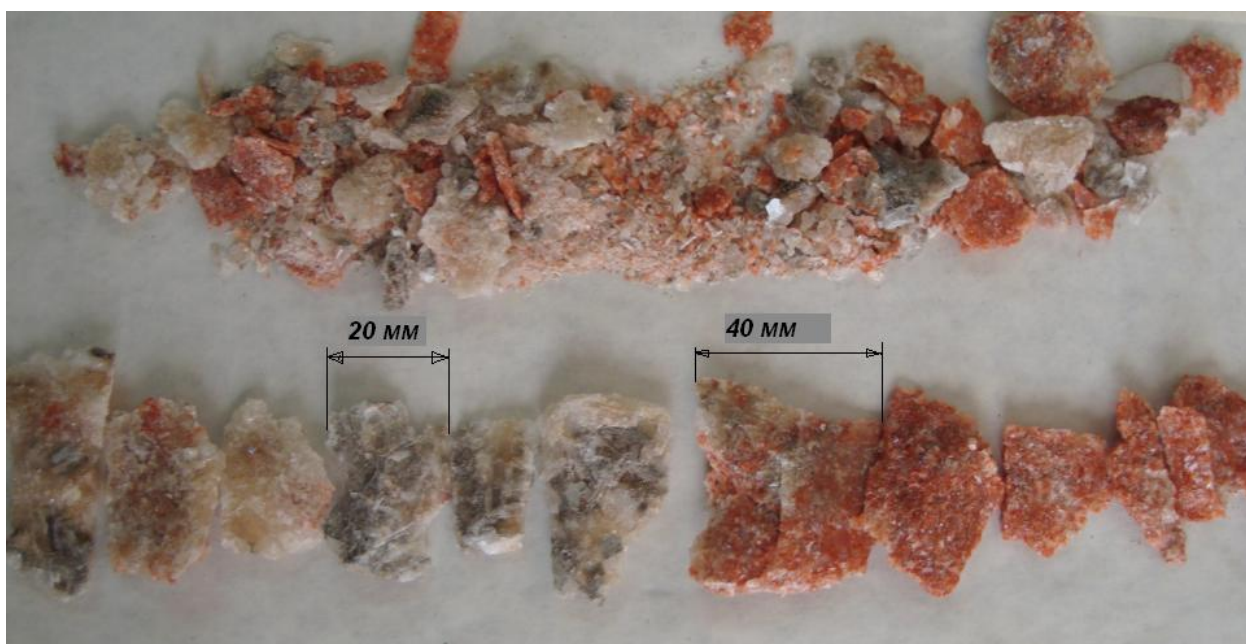


Рисунок 3.21 – Калийная руда, отделенная от испытываемого блока шахматными резами

Силовые параметры процесса разрушения блоков руды шахматными резами анализировались по трем осциллограммам (рисунок 3.22), полученным при одинаковых условиях.

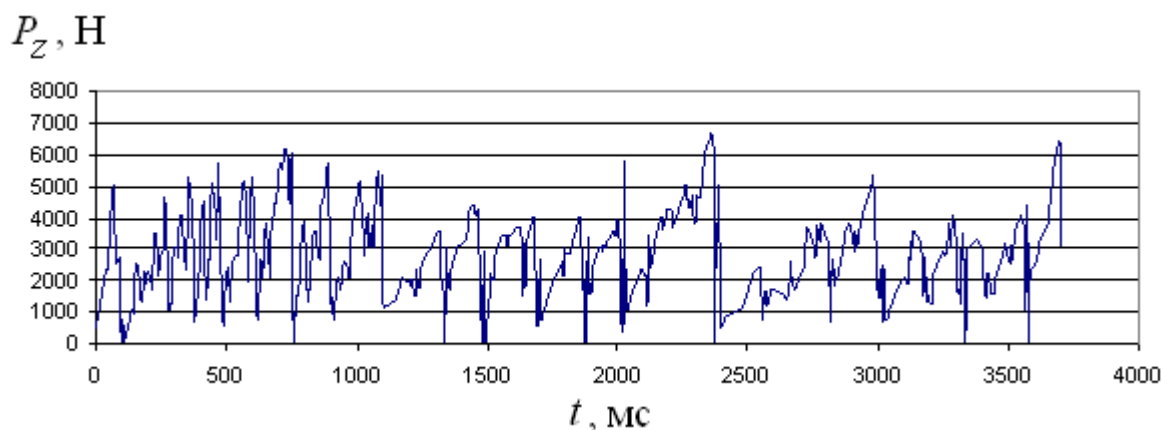


Рисунок 3.22 – Изменение силы резания при разрушении блоков калийной руды шахматными резами

Значение средней силы резания является постоянной величиной и составляет  $m_p = 2564,8$  Н. Удельные затраты энергии процесса разрушения

калийной руды шахматными резами составляют  $H_w=1,72$  кВт·ч/м<sup>3</sup>, что в целом соответствует результатам, полученным ранее авторами работ [150, 168] (см. рисунок 2.7, в). Значение среднего квадратичного отклонения силы резания при разрушении калийного массива шахматными резами с полной толщиной стружки  $h = 10$  мм составило  $\sigma_{P_{ш}} = 1300,3$  Н [209].

Построенные при смещении точек отчета графики автокорреляционных функций силы резания не затухают (рисунок 3.23), что подтверждает стационарный характер процесса резания [2].

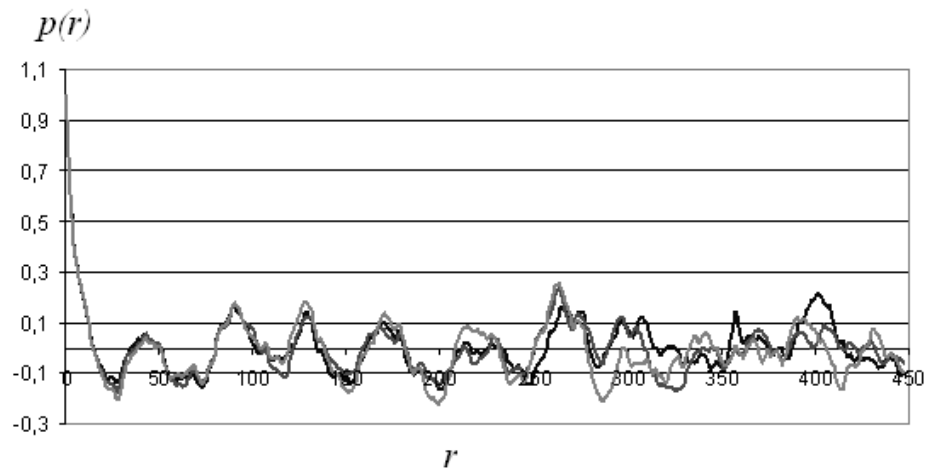


Рисунок 3.23 – Автокорреляционная функция силы резания при разрушении блоков калийной руды шахматными резами (графики построены со смещением точек отсчёта)

Спектр силы резания выделяется на частоте 3 Гц, что характеризует частоту формирования крупных сколов при разрушении испытываемого блока калийной руды шахматными резами (рисунок 3.24).

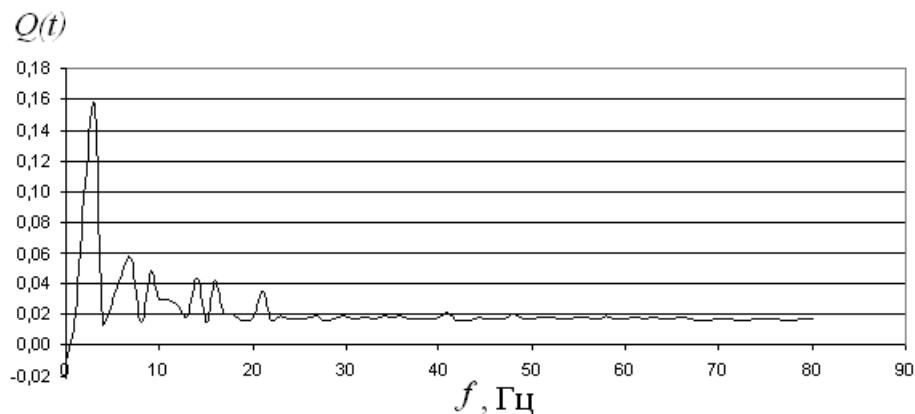


Рисунок 3.24 – Приведенная спектральная плотность силы резания при разрушении калийного массива шахматными резами

Результаты анализа гранулометрического состава калийной руды, отделенной от испытываемого блока шахматными резами, представлены в таблице 3.4 [27].

Таблица 3.4 – Гранулометрический состав калийной руды, отделенной от образца шахматными резами при  $h = 10$  мм;  $t = 35$  мм

Граничные размеры частиц, мм	Массовое содержание фракций	
	грамм	%
$\geq 5$	124,0	75,99
3...5	5,60	3,43
1...3	14,55	8,92
0,5...1	8,40	5,15
0,25...0,5	5,82	3,57
$\leq 0,25$	4,80	2,94
сумма	163,17	100,00

Анализ данных таблицы 3.4 показывает, что использование шахматной схемы резания позволяет несколько снизить количество мелких труднообогатимых классов крупностью «-0,25 мм» в продуктах отбойки по сравнению с резами с выровненной поверхности с 3,69 до 2,94 %.

### **3.7.3 Результаты экспериментальных исследований процесса отделения крупных сколов при разрушении калийного массива перекрестными резами**

Разрушение блоков калийной руды одиночным резцом лабораторной стендовой установки с использованием перекрестной схемы резания осуществлялось с предварительно сформированной поверхности. Параметры схемы резания: шаг резания  $t = 35$  мм; толщина стружки  $h = 10$  мм; величина заглабления резца в массив относительно резов отработанного слоя  $h_3 = 5$  мм.

Крупные сколы (рисунок 3.25) имеют продольные и поперечные размеры 25...30 мм, формы, близкие к прямоугольным. На поверхностях крупных сколов отсутствуют области пластического деформирования руды,

образующиеся при использовании традиционных схем резания вследствие контакта с породоразрушающим инструментом.



Рисунок 3.25 – Калийная руда, отделенная от испытываемого блока перекрёстными резами

Поверхности резов характерны для хрупкого разрушения. Практически отсутствуют лунки выкола на нижних поверхностях резов, которые формируются при отделении крупных сколов от массива калийной руды при использовании шахматной схемы резания [209].

Образующие поверхностей разрушения крупных сколов прямолинейны, так как отделяются от испытываемого блока калийной руды магистральными трещинами поперечного сдвига, а не отрыва, характерными для традиционных схем резания.

Анализ силовых параметров процесса разрушения испытываемых блоков калийной руды перекрестными резами проводился по методике, аналогичной предыдущим сериям экспериментов (разрушение блоков резами с выровненной поверхности и шахматными резами).

Значение средней силы резания, определенное по осциллограммам отчетных резов (рисунок 3.26), составило  $m_{Pн}=1910$  Н, среднее квадратичное отклонение силы резания  $\sigma_{Pн} = 1093,2$  Н, удельные затраты энергии процесса

разрушения калийного массива перекрестными резами  $H_{\text{вп}} = 1,46 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ , что почти вдвое превышает значения, полученные авторами работ [150, 168] при аналогичных условиях эксперимента.

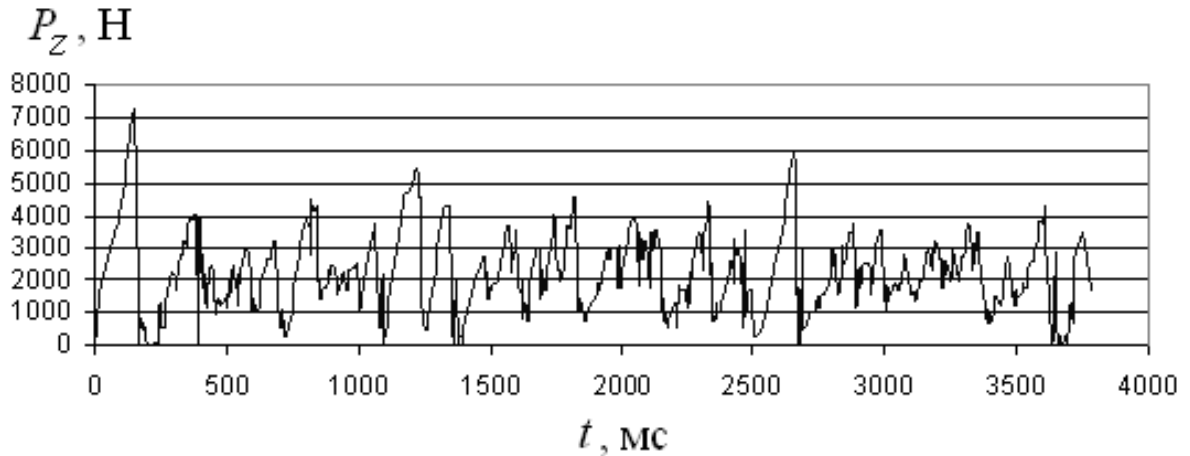


Рисунок 3.26 – Изменение силы резания при разрушении блоков калийной руды перекрестными резами

Автокорреляционные функции силы резания, построенные при смещении точек отчета, характерны для стационарного процесса (рисунок 3.27) [2, 88, 144].

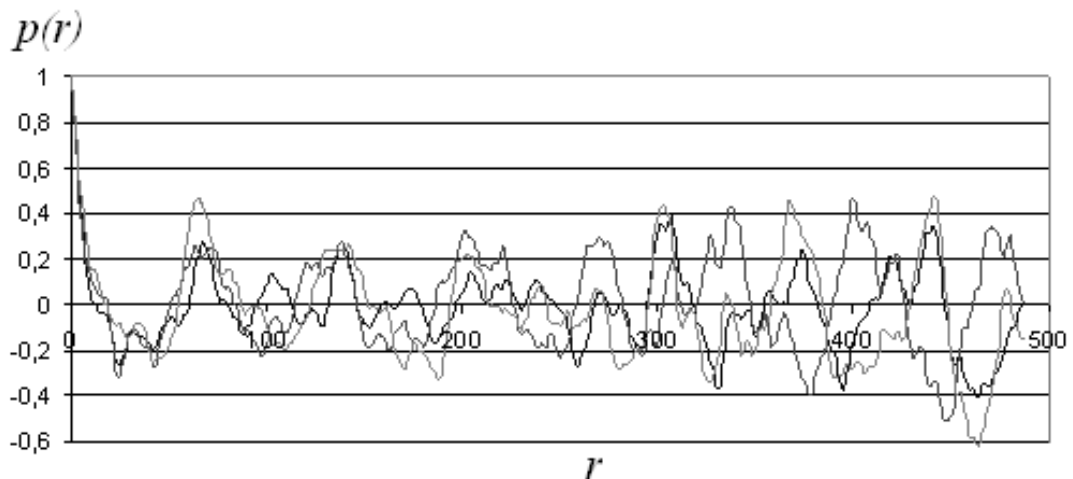


Рисунок 3.27 – Автокорреляционная функция силы резания при разрушении калийного массива перекрестными резами (графики построены со смещением точек отсчёта)

Спектр силы резания (рисунок 3.28) при разрушении блока руды перекрестными резами выделяется на частотах 3 и 7 Гц. Первый пик

соответствует частоте образования крупных сколов устойчивой формы, второй – частоте формирования мелких промежуточных сколов [209].

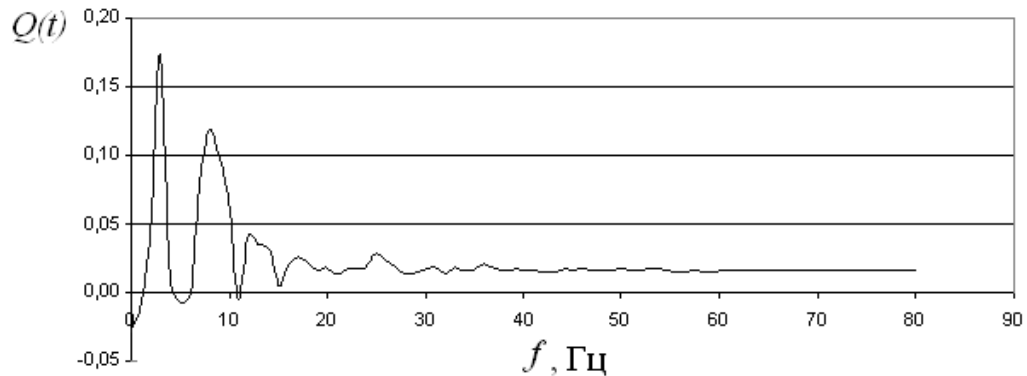


Рисунок 3.28 – Приведенная спектральная плотность силы резания при разрушении калийного массива перекрестными резами

Гранулометрический состав продуктов разрушения блока руды перекрестными резами приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Гранулометрический состав калийной руды, отделенной от образца перекрестными резами при  $h = 10$  мм;  $t = 35$  мм

Граничные размеры частиц, мм	Массовое содержание фракций	
	грамм	%
$\geq 5$	99,40	72,92
3...5	6,30	4,81
1...3	12,80	9,78
0,5...1	6,07	4,64
0,25...0,5	4,13	3,15
$\leq 0,25$	2,23	1,70
сумма	130,93	100,00

Таким образом, при использовании перекрестной схемы резания при параметрах резания  $t = 35$  мм,  $h = 10$  мм,  $b_p = 10$  мм уменьшение удельных затрат энергии процесса резания по сравнению с шахматной схемой составило:

$$\left(1 - \frac{H_{\text{вп}}}{H_{\text{вш}}}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1,46}{1,72}\right) \cdot 100 \% = 15 \%, \quad (3.14)$$

где  $H_{\text{вп}}$  – удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива перекрёстными резами, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $H_{\text{вш}}$  – удельные затраты энергии процесса разрушения массива шахматными резами, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Уменьшение массовой доли труднообогатимых классов крупностью «-0,25 мм» при реализации перекрёстной схемы по сравнению с шахматной составило:

$$\left(1 - \frac{M_{-0,25\text{п}}}{M_{-0,25\text{ш}}}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1,70}{2,94}\right) \cdot 100 \% = 42 \%, \quad (3.15)$$

где  $M_{-0,25\text{п}}$  – массовая доля труднообогатимых классов при перекрёстной схеме резания калийного массива,  $M_{-0,25\text{п}} = 1,7 \%$ ;  $M_{-0,25\text{ш}}$  – массовая доля труднообогатимых классов при шахматной схеме резания калийного массива,  $M_{-0,25\text{ш}} = 2,94 \%$ .

Анализ результатов, полученных при расчете по выражениям (3.14) и (3.15) показывает, что использование перекрёстной схемы резания обеспечивает снижение удельных затрат энергии процесса разрушения калийного массива на 15 % и уменьшение количества труднообогатимых классов в добываемой руде на 42 % по сравнению с шахматной схемой резания. Положительный эффект использования перекрёстной схемы разрушения калийного массива обеспечивается формированием заданных геометрических параметров крупных сколов, отделяемых от массива, посредством придания поверхности разрушаемого забоя формы с наличием чередующихся выступов и зон ослаблений. Рациональное отношение шага резания к величине заглупления резца в калийный массив при использовании перекрёстной схемы резания находится в диапазоне  $t/h_3 = 5 \dots 7$ .

Уменьшение средних нагрузок на резец при использовании перекрёстной схемы резания по сравнению с шахматной схемой, в соответствии с выражением (3.16), составило



$$\left(1 - \frac{m_{P\Pi}}{m_{P\Pi\Pi}}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1910,0}{2564,8}\right) \cdot 100 \% = 34 \%, \quad (3.16)$$

где  $m_{P\Pi}$  – средняя сила резания при использовании перекрёстной схемы резания калийного массива,  $m_{P\Pi} = 1910$  Н;  $m_{P\Pi\Pi}$  – средняя сила резания при разрушении калийного массива шахматными резами,  $m_{P\Pi\Pi} = 2564,8$  Н.

Уменьшение среднего квадратичного отклонения силы резания при реализации перекрёстной схемы резания по сравнению с шахматной схемой, в соответствии с выражением (3.17), составило:

$$\left(1 - \frac{\sigma_{P\Pi}}{\sigma_{P\Pi\Pi}}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1093,2}{1300,3}\right) \cdot 100 \% = 16 \%, \quad (3.17)$$

где  $\sigma_{P\Pi}$  – среднее квадратичное отклонение силы резания на резце при реализации перекрёстной схемы резания калийного массива, Н;  $\sigma_{P\Pi\Pi}$  – среднее квадратичное отклонение силы резания на резце при разрушении массива шахматными резами, Н.

В соответствии с зависимостями (3.2) и (3.3) расчетные частоты формирования крупных устойчивых и мелких промежуточных сколов составляют

$$f_1 = V_p / t = 0,1 / 0,035 = 2,86 \text{ Гц}; \quad (3.18)$$

$$f_2 = V_p / 3h_3 = 0,1 / 0,015 = 6,67 \text{ Гц}. \quad (3.19)$$

Значения частот, рассчитанные по формулам (3.18) и (3.19), близки к величинам, определённым экспериментально (см. рисунок 3.23), которые составили 3 и 7 Гц, соответственно [209].

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Создание на поверхности разрушаемого забоя пересекающихся резов с зонами ослаблений и детерминированно расположенных выступов обуславливает отделение от массива крупных сколов устойчивой формы. Указанное определяет увеличение количества обогатимых классов в добываемой руде и повышение энергоэффективности процесса добычи руды

при использовании перспективной перекрестной схемы по сравнению с традиционными схемами резания.

2. При разрушении калийной руды перекрестными резами крупные сколы отделяются от массива вследствие развития трещин поперечного сдвига, что обуславливает уменьшение средних значений и динамики нагрузок на резцах горных комбайнов.

3. Экспериментально доказано, что при заданных параметрах резания ( $t = 35$  мм,  $h = 10$  мм,  $h_z = 5$  мм,  $b_p = 10$  мм) использование перспективной перекрестной схемы резания по сравнению с шахматной схемой обеспечивает снижение удельных затрат энергии процесса разрушения калийного массива на 15 %, средние нагрузки на резце и среднее квадратичное отклонение силы резания уменьшаются на 34 и 16 % соответственно количество труднообогатимых классов в добываемой руде уменьшается на 42 %.

### **3.8 Сопоставление полученных результатов с результатами известных, ранее выполненных исследований**

Сопоставление полученных результатов экспериментальных исследований по разрушению блоков калийной руды одиночным резцом с результатами известных, ранее выполненных исследований показало следующее.

1. Экспериментально определена величина сопротивляемости резанию блоков калийной руды пласта «Красный-II» рудника БКПРУ-4, которая составила  $A_p = 414$  Н/мм, что соответствует данным, полученным сотрудниками ВНИИ Галургии [69]. Указанное подтверждает достоверность результатов проведенных исследований.

2. Экспериментально определены удельные затраты энергии при разрушении калийной руды резами с выровненной поверхности и шахматными резами при полной толщине стружки  $h=10$  мм, которые составили соответственно 3,6 и 1,72 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Полученные величины близки к

результатам, приведенным в [150, 168] и представленным на рисунке 2.7, а, в.

3. Отмеченные и описанные закономерности формирования последовательных элементарных сколов соответствуют основным представлениям о процессе разрушения калийных руд резанием, изложенным в работах [9, 13, 21, 24, 26, 30, 39, 48, 76, 129, 143, 165, 168].

4. Экспериментально доказано, что использование перекрестной схемы разрушения калийного массива обуславливает снижение удельных энергозатрат и силовых характеристик процесса резания по сравнению с шахматной схемой резания. Указанное соответствует результатам работ [150, 168]. Однако абсолютная величина снижения удельных затрат энергии при разрушении блоков калийной руды перекрестными резами получилась много меньше (см. рисунок 2.7, в, д): 15 % по сравнению с 50...80 % у авторов работ [150, 168].

5. Экспериментально определены значения массовой доли труднообогатимых фракций крупностью «-0,25 мм» в калийной руде, отделенной от образца, при использовании резов с выровненной поверхности и шахматных резов при полной толщине стружки  $h=10$  мм. Полученные величины близки к результатам, приведенным в [150, 168] и представленным на рисунке 2.7, б, г.

6. Экспериментально доказано, что использование перекрестной схемы разрушения калийного массива обуславливает уменьшение массовой доли труднообогатимых классов крупностью «-0,25 мм» в продуктах отбойки по сравнению с шахматной схемой резания, что соответствует результатам работ [150, 168]. Однако абсолютная величина снижения массовой доли необогатимых классов при разрушении блоков калийной руды перекрестными резами получилась много меньше: 42 % по сравнению с 500...1000 % у авторов работы (см. рисунок 2.7, г, е) [150, 168].

### 3.9 Выводы по главе 3

1. Исследован процесс отделения последовательных элементарных

сколов от блоков калийной руды при разрушении полноразмерным резцом. Доказано, что процесс развития магистральных трещин является структурно чувствительным и сопровождается формированием зон локализации микротрещин, которые являются готовыми концентраторами напряжений.

2. При разрушении блоков калийной руды резами с выровненной поверхности крупные сколы отделяются от массива полукруглыми магистральными трещинами отрыва. Сколы имеют вытянутую, лещадную форму, что определяет высокую вероятность их разрушения, например, при перемещении или погрузке руды.

3. При разрушении блоков калийной руды перекрестными резами крупные сколы отделяются от массива за счет развития трещин поперечного сдвига. Зародышами магистральных трещин являются микротрещины техногенного происхождения, образованные при отработке предыдущих слоёв разрушаемого массива.

4. Использование перспективной перекрестной схемы резания при заданных параметрах резания  $t = 35$  мм,  $h = 10$  мм,  $h_3 = 5$  мм,  $b_p = 10$  мм обеспечивает по сравнению с шахматной схемой снижение удельных затрат энергии процесса разрушения калийного массива на 15 %, средние нагрузки на резце и среднее квадратичное отклонение силы резания уменьшаются на 34 и 16 % соответственно.

5. Использование перекрестной схемы резания обеспечивает создание на поверхности разрушаемого массива сетки пересекающихся резов, а в отделяемой стружке – формирование крупных сколов с устойчивыми значениями геометрических параметров. Частота реализации крупных сколов определяется с достаточной точностью по аналитическим формулам.

6. Реализация перекрёстной схемы резания калийного массива при заданных параметрах резания  $t = 35$  мм,  $h = 10$  мм,  $h_3 = 5$  мм,  $b_p = 10$  мм позволяет уменьшить массовую долю труднообогатимых классов руды крупностью «-0,25 мм» в продуктах отбойки на 42 % по сравнению с шахматной схемой резания.

## **ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК ПРИВОДОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБАЙНОВ В УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

### **4.1 Общие положения методики исследований**

Рациональный режим работы проходческо-очистного комбайна определяется с учётом нагрузок, действующих на приводы добычной машины при работе в очистной камере. На нагруженность приводов комбайнов калийных рудников влияют параметры процессов разрушения и погрузки руды, физико-механические свойства разрушаемого массива, геометрические параметры забоя и ещё ряд факторов, учесть которые аналитически не всегда возможно [15, 57, 161].

Исследования особенностей процесса формирования нагрузок на приводы породоразрушающих и погрузочных органов добычных машин, оценка эффективности их функционирования могут быть выполнены на основе анализа результатов замеров, проведенных непосредственно в очистных камерах рудника. Показатели эффективности работы, методика количественного определения которых приведена в подразделе 2.5, обобщенно характеризуют совокупность влияния режимных параметров, внешних и внутренних факторов на процесс функционирования добычной машины.

Как указывалось в подразделе 1.4.2. достоверная оценка нагруженности приводов горных комбайнов, определение показателей энергоэффективности их использования наиболее просто реализуются посредством регистрации активных мощностей приводных электродвигателей и скорости подачи добычных машин при их работе в очистных камерах.

Важным показателем, определяющим эффективность использования комбайнов в условиях калийных рудников, является качество гранулометрического состава добываемой руды. Определение

гранулометрического состава и количества труднообогатимых пылевидных классов крупностью «-0,25 мм» в добываемой руде позволяет оценить потери добывающего предприятия при производстве готового продукта [93, 94].

Исследования, результаты которых приводятся в данной главе, выполнены с использованием экспериментально-статистического метода, целесообразность применения которого обусловлена тем, что он многократно апробирован и широко используется при разработке инженерных методик расчета параметров горных комбайнов [88, 111, 119, 144]. Экспериментальные исследования выполнялись на комбайнах «Урал-20Р-11/12» как наиболее современных и производительных добычных машинах, изготавливаемых отечественной промышленностью для калийной отрасли.

Цель экспериментальных исследований состояла в определении закономерностей процесса формирования нагрузок на приводы комбайнов калийных рудников и оценке эффективности их использования в реальных условиях эксплуатации. В соответствии с указанной целью были сформулированы задачи экспериментальных исследований.

1. Разработка оборудования для регистрации параметров работы приводных двигателей комбайнов и методики проведения экспериментальных исследований.

2. Выполнение замеров с целью определения параметров работы приводных электродвигателей комбайнов «Урал-20Р-11/12» при работе в очистных камерах калийных рудников. Определение величин мощностей двигателей и расчет удельных затрат энергии процесса добычи калийной руды с использованием комбайнов «Урал-20Р-11/12».

3. Определение гранулометрического состава руды, добываемой с использованием проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11/12» с заданными скоростями подачи на забой (заданными производительностями).

4. Математический анализ полученных данных.

5. Оценка эффективности использования комбайнов в условиях калийных рудников.

Основные положения методики экспериментальных исследований включают следующее.

1. Выбор объектов исследования. Выбранные комбайны и условия их функционирования должны быть типовыми для калийных рудников.

2. Исследование проводится в установившихся и переходных режимах работы комбайнов: работа с различными скоростями подачи, полным и неполным сечением исполнительных органов.

3. Объем измерений обеспечивает воспроизводимость результатов и их заданную достоверность при работе комбайнов в каждом исследуемом режиме.

4. Точность и частота дискретизации сигналов обеспечивают заданную доверительную вероятность результатов экспериментов. Регистрируемые данные должны быть информативны для исследования [2, 40, 144].

## **4.2 Инструментарий экспериментальных исследований – программно-регистрационный комплекс «ВАТУР»**

### **4.2.1 Структура программно-регистрационного комплекса «ВАТУР»**

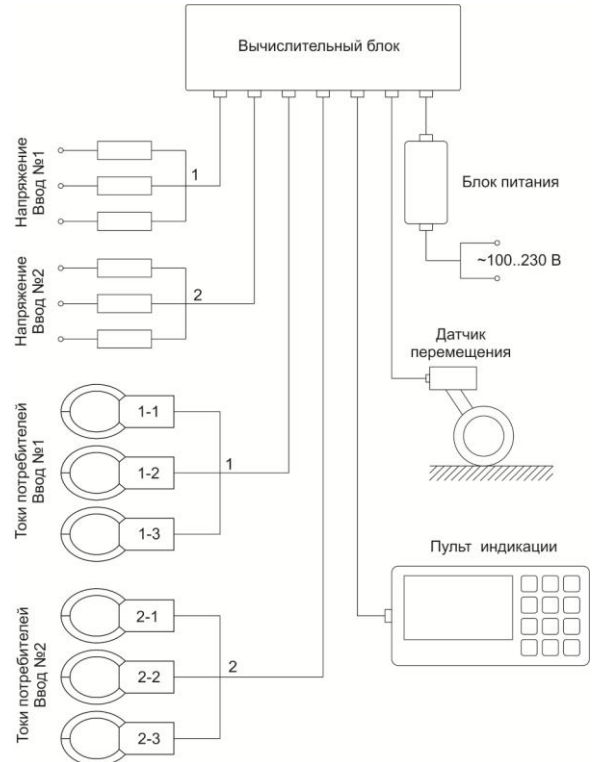
Проведение экспериментальных исследований осуществлялось сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» ПНИПУ с участием автора. Исследования выполнялись с использованием программно-регистрационного комплекса «ВАТУР» производства ООО «РКЦ» (г. Пермь) [114, 124].

Комплекс «ВАТУР» (рисунки 4.1 и 4.2) представляет собой переносной прибор в блочном исполнении, который устанавливается на период измерений во взрывозащищенную магнитную станцию комбайна. Комплекс осуществляет измерение, запись и хранение мгновенных значений токов, напряжений, активной мощности приводных двигателей добычной машины, а также регистрацию информации об угле наклона выработки, проходимой комбайном, и скорости подачи комбайна на забой [170].

Структура прибора включает блок питания, вычислительный блок, делители напряжения, датчики тока (токовые клещи-адаптеры), датчик перемещения. Калибровка и отладка комплекса осуществляются посредством подключаемого пульта индикации.



Рисунок 4.1 – Программно-регистрирующий комплекс «ВАТУР» (общий вид)



4.2 – Структурная схема комплекса «ВАТУР»

Размещенные внутри вычислительного блока комплекса «ВАТУР» датчики напряжения подключаются к контролируемой цепи через делители напряжения. Резисторы делителей для исключения пробоя изоляции и удобства замены вынесены за пределы корпуса прибора. Внутри вычислительного блока монтируется трёхосевой акселерометр, посредством которого контролируется угол наклона комбайна в выработке [160, 162, 184].

Датчик перемещения устанавливается снаружи комбайна на магнитных застёжках, представляет собой преобразователь угловых перемещений (энкодер) с установленным на валу мерным колесом.



### 4.2.2 Порядок работы комплекса «ВАТУР»

Комплекс «ВАТУР» регистрирует параметры работы приводных электродвигателей добычной машины по двум вводам напряжения, на каждом из которых регистрируются нагрузки трех потребителей энергии. Схема подключения датчиков тока и напряжений на испытываемом комбайне приведена на рисунке 4.3 [161].

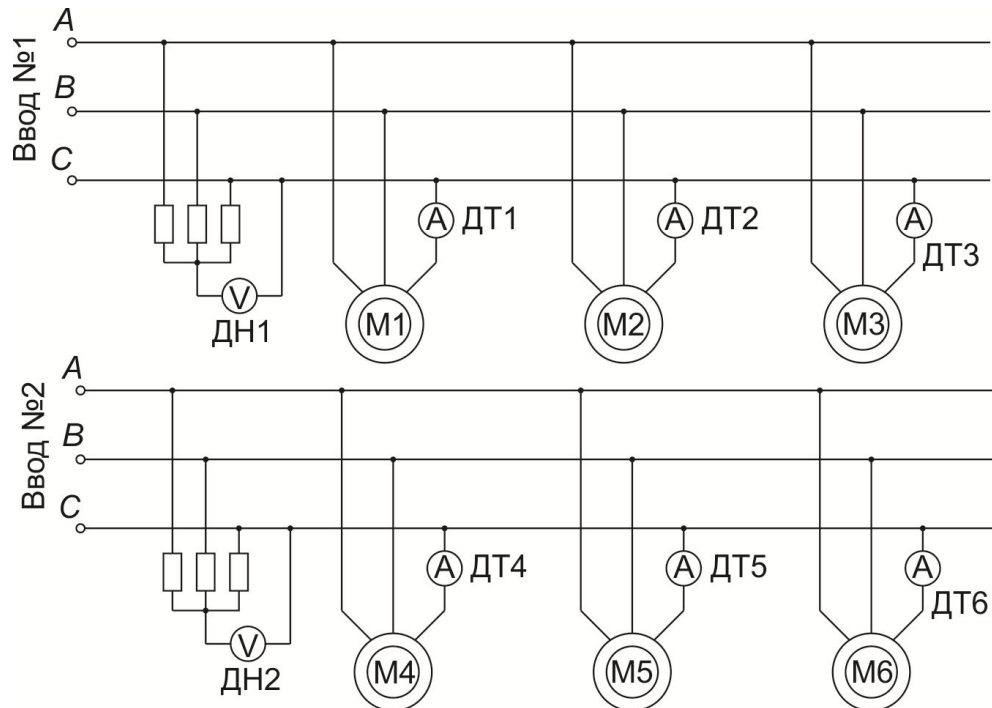


Рисунок 4.3 – Схема подключения комплекса «ВАТУР»:

ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Комплекс «ВАТУР» осуществляет измерения с частотой 0,5 кГц на канал. Первичная обработка собранных данных осуществляется программным обеспечением прибора в процессе выполнения измерений. В соответствии с зависимостями (4.1) и (4.3) определялись следующие параметры:

– эффективное значение тока  $I_{эф}$ , А, по каждому датчику

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n i_m^2}, \quad (4.1)$$

где  $i_m$  – мгновенное значение тока в  $m$ -й момент времени, А;  $n$  – число точек измерения за фиксированный интервал времени  $\Delta T$ ;

– эффективное значение напряжения  $U_{\text{эф}}$ , В, по каждому кабельному вводу

$$U_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n u_m^2}, \quad (4.2)$$

где  $u_m$  – мгновенное значение фазного напряжения, измеренное прибором в  $m$ -й момент времени, В;

– скорость подачи комбайна  $V_{\text{п}}$ , м/мин

$$V_{\text{п}} = \frac{\sum_{m=1}^n (x_m - x_{m-1})}{\Delta T}, \quad (4.3)$$

где  $x_m$  и  $x_{m-1}$  – положение комбайна в текущий  $m$  и предшествующий ему  $m-1$  момент времени, м.

Полученные значения сохраняются в энергонезависимой памяти комплекса для дальнейшей обработки на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения «РС-ВАТУР». По мгновенным и эффективным значениям токов и напряжений рассчитываются активные  $N_a$  (кВт) и полные  $S_w$  (кВА) мощности контролируемых приводных электродвигателей в соответствии с (4.4) и (4.5)

$$N_a = \frac{3}{n} \sum_{m=1}^n u_m i_m; \quad (4.4)$$

$$S_w = 3 I_{\text{эф}} U_{\text{эф}}. \quad (4.5)$$

Коэффициент мощности определяется выражением (4.6)

$$\cos \varphi = \frac{N_a}{S_w} \quad (4.6)$$

Массив данных замера визуализируется в программе «РС-ВАТУР» в виде набора графиков (рисунок 4.4). Исследователь может выбрать границы анализируемых участков графиков посредством установки временных меток.

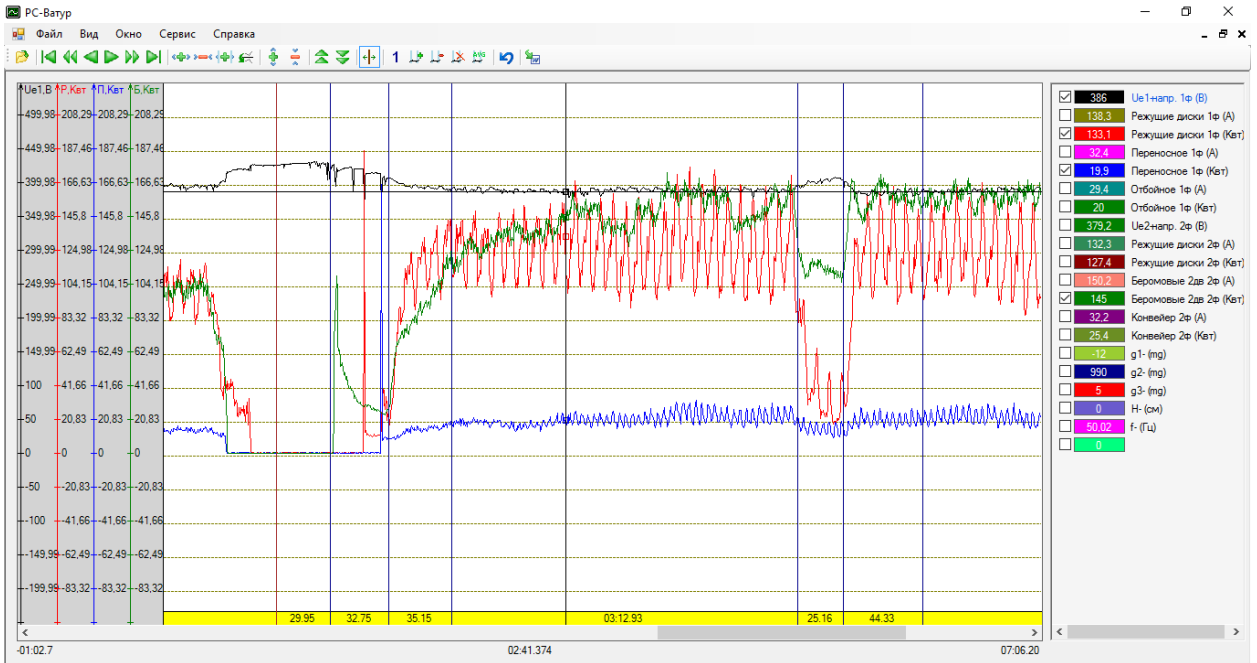


Рисунок 4.4 – Рабочее окно программы «PC-ВАТУР»

Определение параметров работы комбайна в установившемся режиме осуществляется на участках графиков без переходных режимов. Удельные затраты энергии на добычу калийной руды при работе комбайна определялись по формуле (4.7)

$$H_w = \frac{N_a}{60SV_{\Pi}}, \quad (4.7)$$

где  $H_w$  – удельные затраты энергии процессов разрушения и погрузки калийной руды рабочими органами комбайна, кВт·ч/м<sup>3</sup> [160, 161].

Величина и вариативность нагрузок на элементы приводов испытываемого комбайна определялись по известным формулам математической статистики. Технические характеристики комплекса «ВАТУР» приведены в приложении А (таблицы А.1–А.3).

Доверительная вероятность результатов испытаний принята 0,9 при относительной погрешности не более 0,1 [2, 40, 144].

### 4.3 Порядок выполнения экспериментальных исследований

Перед спуском в рудник группы исследователей к месту работы испытываемого комбайна выполнялись следующие работы:

- проводилась проверка комплектности и исправности программно-регистрирующей аппаратуры (комплекса «ВАТУР»);
- подготавливалось оборудование для выполнения ситового анализа проб добытой руды (набор сит для отсева, весы, рулетка, емкости для отбора проб и сбора порций отсева, инструмент для сокращения проб, упаковочный материал);
- в журнале экспериментов (таблицы Б.1 и Б.2, приложение Б) фиксировались дата проведения замеров и информация о месте проведения испытаний: рудник, участок, пласт, номер камеры;
- определялись геометрические размеры забоя по данным маркшейдерской службы рудника;
- определялись и заносились в журнал экспериментов данные по испытываемому комбайну: марка комбайна, заводской номер, тип резцов на исполнительных органах;
- фиксировалась схема подключения датчиков к контролируемым приводам комбайна, частота опроса датчиков.

Монтаж и подключение программно-регистрирующего комплекса внутри магнитной станции испытываемого комбайна проводились с привлечением специалистов энергетической службы рудника. Порядок установки оборудования включал следующие этапы.

1. Отключение питающего напряжения, демонтаж дверцы магнитной станции комбайна.
2. Размещение внутри магнитной станции комбайна программно-регистрирующего комплекса.
3. Подключение датчиков напряжения к кабельным вводам.
4. Подключение токовых клещей и установка их на питающие провода контролируемых приводов.

5. Установка датчика пути.

6. Подключение блока питания, монтаж дверцы магнитной станции комбайна [114].

Демонтаж программно-регистрирующего комплекса проводился в обратной последовательности.

Подача напряжения в магнитную станцию комбайна обеспечивала автоматическое включение прибора и начало записи контролируемых параметров работы добычной машины. Длительность каждого замера соответствовала временному периоду, необходимому для добычи комбайном руды для загрузки 5...10 самоходных вагонов [2, 30, 40, 77]. Определялась нагруженность приводных двигателей комбайна при работе полным сечением исполнительного органа и при выполнении подрубки пласта.

Результаты замеров сохранялись в энергонезависимой памяти прибора. В процессе испытаний регистрировались следующие параметры:

- величины токов и напряжений;
- перемещение комбайна в выработке;
- угол наклона комбайна относительно горизонтальной плоскости.

Технические параметры и энергетические показатели работы комбайнов, определенные в ходе выполнения замера, фиксировались в журнале по форме таблиц Б.3–Б.5 (см. приложение Б).

В конце каждого замера посредством измерительной рулетки проводился контроль показаний датчика перемещения.

Оценка гранулометрического состава калийной руды, добытой при работе проходческо-очистного комбайна, выполнялась методом ситового анализа в следующей последовательности.

1. Расчет массы представительной пробы.

Масса представительной пробы для анализа  $m_{пр}$  (кг) определялась, исходя из размеров наибольшей фракции рассеиваемого материала, и рассчитывалась по формуле (4.8)

$$m_{пр} = 0,02 d_c^2 + 0,5d_c, \quad (4.8)$$

где  $d_c$  – размер ячейки сита, мм.

Масса представительной пробы, содержащей частицы руды размером «+40 мм» в соответствии с (4.8) составляет  $m_{пр} = 52$  кг.

2. Отбор проб руды в отдельные ёмкости объемом 15...20 л. Каждая ёмкость заполнялась вручную методом пересечения потока руды на выходе с конвейера шахтного самоходного вагона, а затем взвешивалась. Совокупная масса пробы  $m$  превышала рассчитанное значение  $m_{пр}$ , то есть  $m > m_{пр}$ . Результаты взвешивания заносились в журнал экспериментальных исследований (приложение В, таблица В.1).

3. Проведение отсева на месте отбора проб с помощью сит с диаметрами ячеек 40, 20 и 10 мм. Результаты взвешивания подситового и надситового продукта при отсеве крупных фракций фиксировались в журнале исследований (см. приложение В, таблица В.2).

4. Проверка результатов ситового анализа на месте отбора проб и подготовка сокращенной пробы для лабораторного анализа.

Сумма масс руды, разделенной по классам крупности в результате отсева, не должна отличаться более чем на 2 % от массы исходной пробы. В противном случае результат отсева исключался из анализа.

При  $d_c = 7,1$  мм масса представительной пробы для лабораторного анализа  $m_{пр} = 4,6$  кг. Масса пробы  $m$  сокращалась методом квартования до значения, не меньшего, чем масса представительной пробы  $m_{пр}$ , то есть  $m > m_{пр}$  [116, 120, 158].

5. Анализ сокращенной пробы выполнялся в лаборатории отдела технологических исследований ПАО «Уралкалий» по классам крупности: «-10,0...+7,1 мм», «-7,1...+5 мм», «-5,0...+2 мм», «-2,5...+1,6 мм», «-1,6...+1,0 мм», «-1,0...+0,63 мм», «-0,63...+0,4 мм», «-0,4...+0,25 мм», «-0,25 мм».

6. Массовая доля каждого класса руды рассчитывалась по формуле (4.9)

$$M_i = \frac{100m_i}{m}, \quad (4.9)$$

где  $M_i$  – массовая доля  $i$ -го класса частиц, %;  $m_i$  – масса  $i$ -го класса частиц, кг;  $m$  – масса всей пробы, кг [65, 106, 169].

#### **4.4 Результаты исследований процесса формирования нагрузок на приводы комбайнов «Урал-20Р-11» в реальных условиях функционирования**

##### **4.4.1 Нагруженность приводов комбайнов «Урал-20Р-11» при работе полным забоем**

Экспериментальные исследования процесса формирования нагрузок на приводы проходческо-очистных комбайнов проводились на руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (Пермский край, Россия) при отработке пласта «Красный-II». Испытываемый комбайн – «Урал-20Р-11» – осуществлял разрушение забоя полным сечением исполнительного органа. Угол проходимой выработки составлял  $+1^\circ$ .

Замеренные до запуска приводных двигателей комбайна значения напряжений на вводных фидерах превышали номинальное напряжение питания  $U_{\text{ном}} = 660$  В. На первом фидере величина фазного напряжения составила  $U_1 = 740$  В, на втором –  $U_2 = 745$  В. Сотрудники энергетической службы намеренно завышают величину питающего напряжения в рудничной электросети для компенсации просадки.

При проведении экспериментальных исследований машинист задавал скорости подачи:  $V_{\text{п1}} = 0,10$  м/мин;  $V_{\text{п2}} = 0,12$  м/мин;  $V_{\text{п3}} = 0,14$  м/мин. Графики изменения параметров работы электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при указанных скоростях подачи и разрушении забоя полным сечением исполнительного органа приведены на рисунках 4.5, 4.6 и 4.7, соответственно.

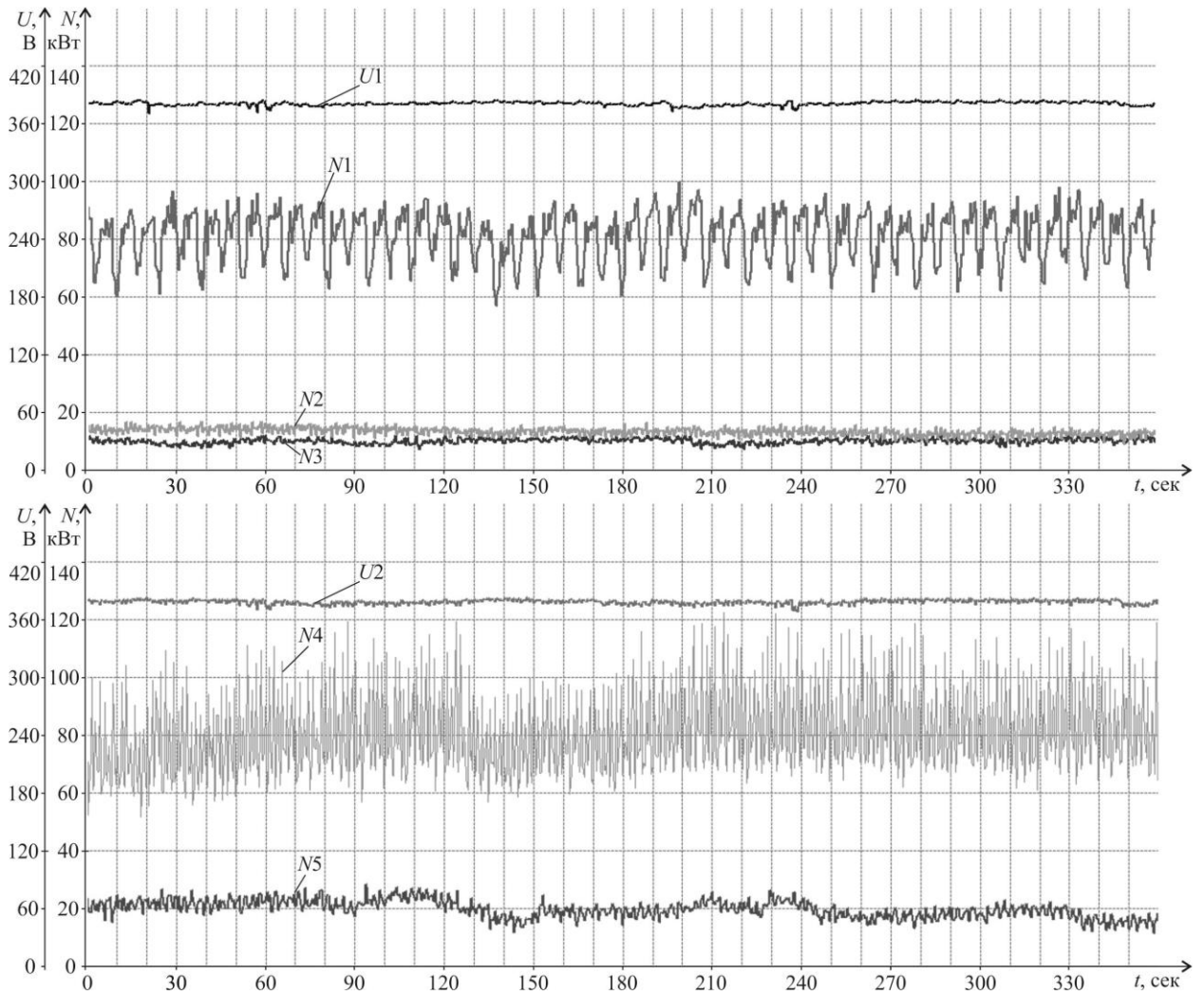


Рисунок 4.5 – Изменение параметров электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением при скорости подачи  $V_{п} = 0,10$  м/мин:

$U1$  и  $U2$  – фазные напряжение на вводах № 1 и № 2 соответственно, В;

$N1...N5$  – активные мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков, отбойного устройства, переносного вращения, двух двигателей бермовых фрез, двух двигателей конвейера соответственно, кВт

Нагрузка на приводы относительного вращения резцовых дисков комбайна «Урал-20Р-11» формируется силами сопротивления разрушению калийного массива резцами и вращению дисков со стороны отбитой руды, циркулирующей в призабойном пространстве. Величина нагрузок изменяется в зависимости от пространственного положения резцовых дисков. Минимальные нагрузки на приводы относительного вращения создаются при горизонтальном положении водила, что обусловлено перекрытием



траекторий движения резцовых дисков исполнительных органов комбайна «Урал-20Р-11».

Максимальная нагруженность приводов относительного вращения дисков наблюдается при вертикальном положении водила, когда один из резцовых дисков контактирует с рудой, отделенной от массива. При этом вращающийся диск перемещает руду в сторону шнековых грузчиков, что обуславливает измельчение и ухудшение гранулометрического состава добываемой калийной руды.

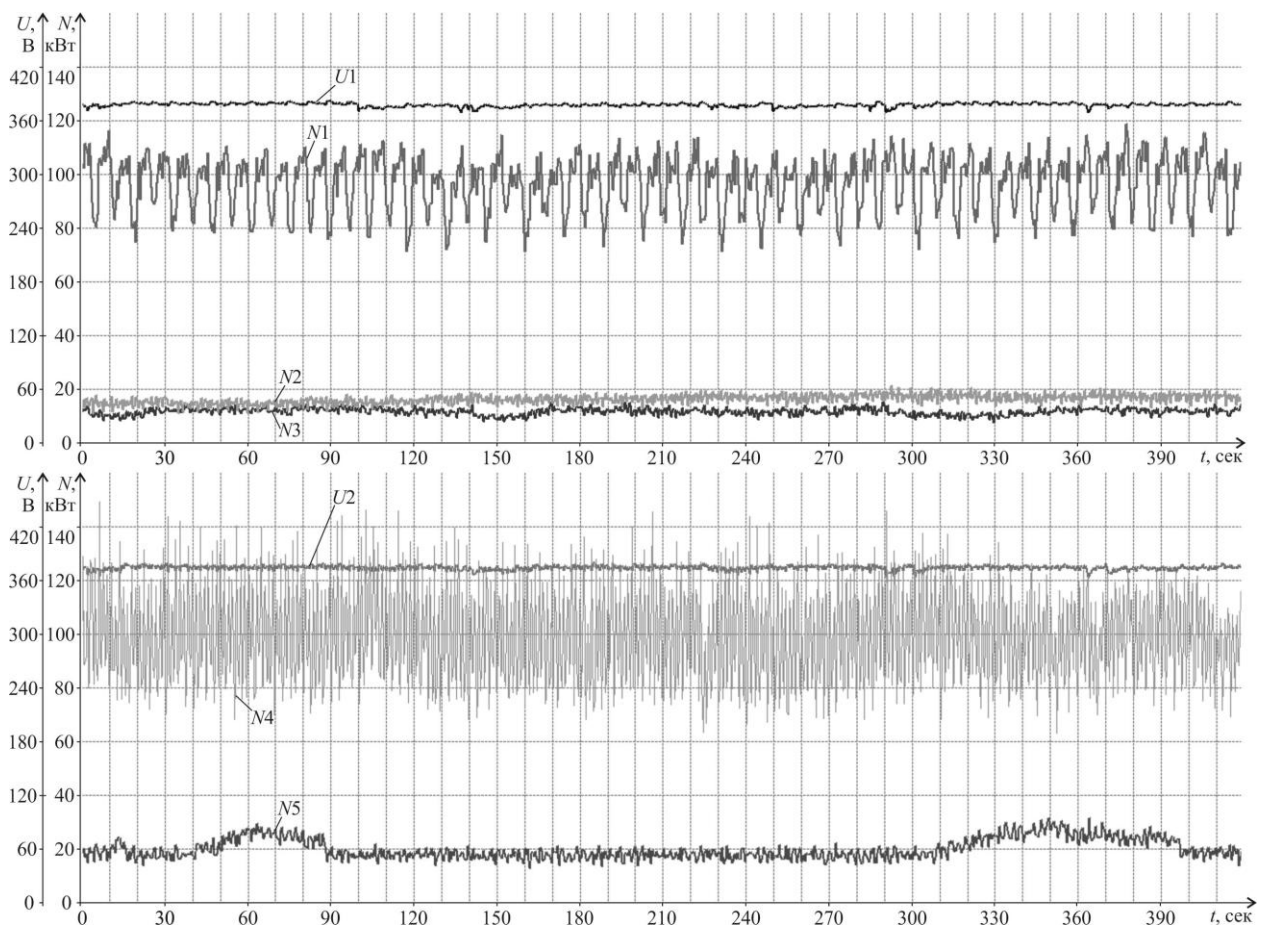


Рисунок 4.6 – Изменение параметров электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением при скорости подачи  $V_{II} = 0,12$  м/мин:

$U1$  и  $U2$  – фазные напряжение на вводах № 1 и № 2 соответственно, В;

$N1 \dots N5$  – активные мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков, отбойного устройства, переносного вращения, двух двигателей бермовых фрез, двух двигателей конвейера соответственно, кВт

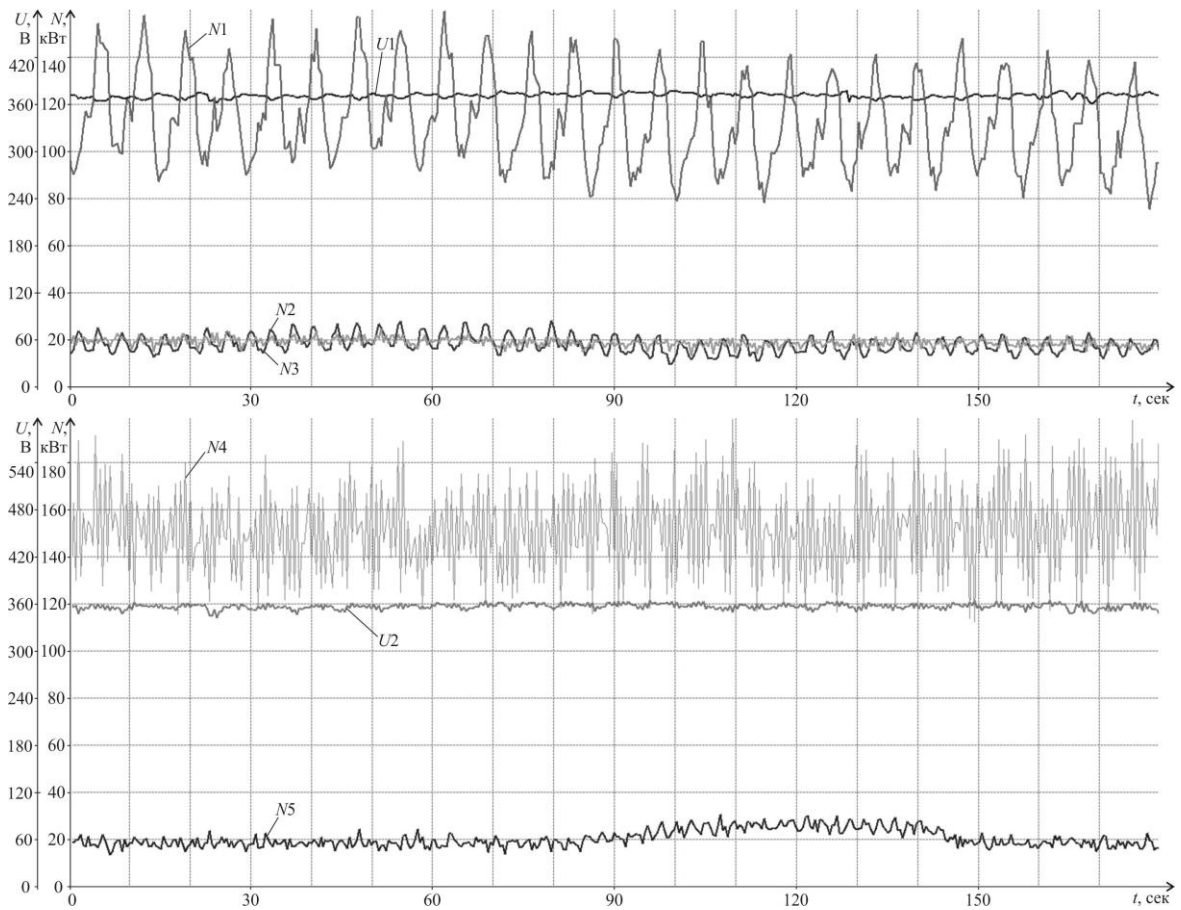


Рисунок 4.7 – Изменение параметров электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением при скорости подачи  $V_{\text{п}} = 0,14$  м/мин:

$U1$  и  $U2$  – фазные напряжение на вводах № 1 и № 2 соответственно, В;

$N1 \dots N5$  – активные мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков, отбойного устройства, переносного вращения, двух двигателей бермовых фрез, двух двигателей конвейера соответственно, кВт

Частота колебания сигнала активной мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков равна двойной оборотной частоте вращения водила. Графики изменения сигналов активной мощности двигателей относительного вращения комбайна «Урал-20Р-11» лежат в противофазе, что обусловлено кинематикой сдвоенного планетарно-дискового органа [179, 180, 189].

Увеличение скорости подачи комбайна «Урал-20Р-11» обуславливает рост динамических нагрузок на приводы, так как увеличивается глубина резов  $h$ , а также возрастает объем руды, перемещаемой в призабойном

пространстве резцовыми дисками. Приводы относительного вращения дисков планетарных исполнительных органов характеризуются наибольшим увеличением средних квадратичных отклонений сигналов активных мощностей.

Результаты статистического анализа данных экспериментальных исследований приведены в таблице 4.1 и на рисунке 4.8.

Таблица 4.1 – Средние значения активных мощностей двигателей исполнительных органов комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением

Обследуемые двигатели	Среднее значение активной мощности, кВт, при скорости подачи:			Среднее квадратичное отклонение $\sigma_N$ , кВт, при скорости подачи:			Активная мощность при номинальной нагрузке двигателя, кВт
	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин	
Относительное вращение 1	85,1	101,0	126,3	8,94	10,46	19,77	170,2
Относительное вращение 2	83,7	98,0	123,5	7,01	8,83	18,13	170,2
Бермовый орган	83,4	110,5	147,3	15,15	17,10	20,64	163,0
Отбойное устройство	15,2	18,3	21,9	1,41	1,84	1,94	49,5
Переносное вращение	11,8	13,5	20,9	1,00	1,36	3,90	81,5
Конвейер	21,9	22,0	25,3	2,39	3,83	5,11	49,6

Двигатель переносного вращения резцовых дисков комбайна «Урал-20Р-11» является наименее нагруженным: при скорости подачи комбайна  $V_{п3} = 0,14$  м/мин среднее значение активной мощности составляет 25,6 % от номинальной. Кинематика планетарно-дискового исполнительного органа определяет снижение нагрузок на данный привод вследствие возникновения явления самозатягивания дисков при движении резца от центра к периферии обрабатываемого забоя. В практике проведения замеров мощностей двигателей комбайнов «Урал-20Р» известны случаи, когда двигатели переносного вращения резцовых дисков работали в генераторном режиме.

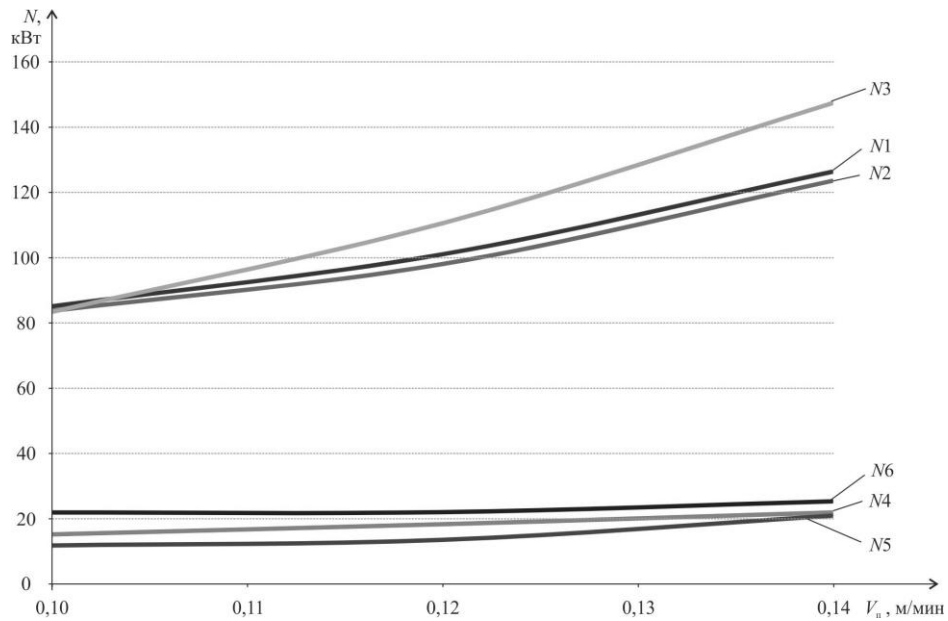


Рисунок 4.8 – Изменение средних значений активных мощностей двигателей проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р-11» от скорости подачи:

$N1, N2$  – двигатели относительного вращения дисков, кВт;  $N3$  – двигатели бермовых фрез, кВт;  $N4$  – двигатель отбойного устройства, кВт;  $N5$  – двигатель переносного вращения дисков, кВт;  $N6$  – двигатели конвейера, кВт

Оценка относительного изменения нагрузок приводов комбайна «Урал-20Р-11» выполнялась посредством определения величин коэффициентов вариации  $K_v$  сигналов активных мощностей (таблица 4.2, рисунок 4.9).

Таблица 4.2 – Коэффициенты вариации  $K_v$  активных мощностей двигателей исполнительных органов комбайна «Урал-20Р-11» при работе полным сечением забоя

Обследуемые двигатели	Значения коэффициентов вариации $K_v$ , при работе комбайна со скоростью подачи:		
	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин
Относительное вращение 1	0,11	0,10	0,16
Относительное вращение 2	0,08	0,09	0,15
Бермовый орган	0,18	0,15	0,14
Отбойное устройство	0,09	0,10	0,09
Переносное вращение	0,08	0,10	0,19
Конвейер	0,11	0,17	0,20

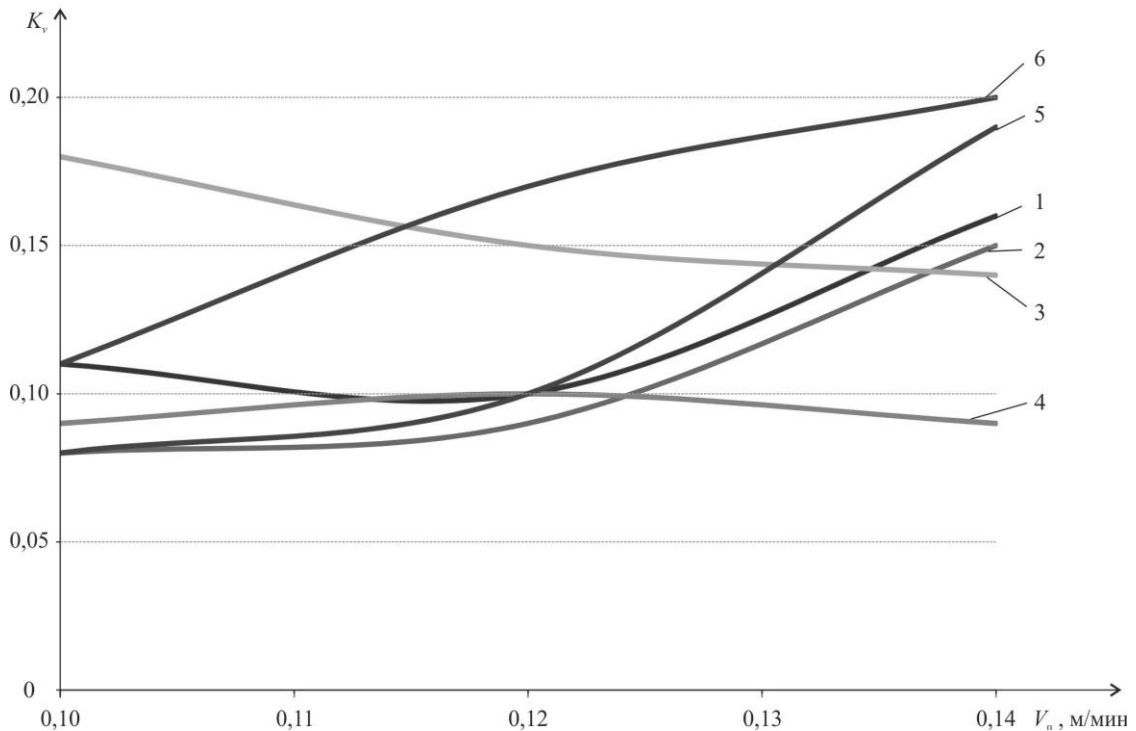


Рисунок 4.9 – Изменение коэффициентов вариации сигналов активных мощностей электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением: 1, 2 – двигатели относительного вращения резцовых дисков; 3 – двигатели бермовых исполнительных органов; 4 – двигатель отбойного устройства; 5 – двигатель переносного вращения резцовых дисков; 6 – двигатели конвейера

Анализ результатов замеров показывает, что наиболее нагруженными приводами комбайна «Урал-20Р-11» являются приводы бермовых фрез. Резцы берм и шнеков комбайна разрушают забой у почвы выработки резами с малой толщиной стружки. Большая часть мощности двигателей расходуется не на разрушение забоя, а на перемещение и погрузку руды шнеками на скребковый конвейер-перегрузатель. При этом в процессе погрузки руда измельчается, что обуславливает ухудшение её гранулометрического состава [179, 184, 185].

Однозаходные шнеки комбайнов «Урал-20Р-11» осуществляют погрузку руды порционно. Горная масса неравномерно распределяется по длине шнека, объем выдаваемой руды увеличивается по направлению к загрузочному окну конвейера. Указанное обуславливает высокую динамическую нагруженность приводов бермовых фрез. Коэффициент

вариации сигналов активной мощности электродвигателей бермовых исполнительных органов является самым высоким по сравнению с остальными приводами комбайна.

При скорости подачи  $V_{пз} = 0,14$  м/мин двигателя относительного вращения резцовых дисков загружены на 72 и 74 %. Разница средних значений активной мощности данных приводных двигателей при работе комбайна «Урал-20Р-11» полным сечением забоя может составлять до 10 %, что обусловлено техническим состоянием редукторов и приводных двигателей комбайнов [56, 149].

Двигатели отбойного устройства и конвейера при работе комбайна полным сечением исполнительного органа и скорости подачи  $V_{пз} = 0,14$  м/мин загружены на 44 и 51 % соответственно. Неиспользование мощности двигателей обуславливает увеличение реактивной составляющей мощности, что отрицательно отражается на рудничной электросети.

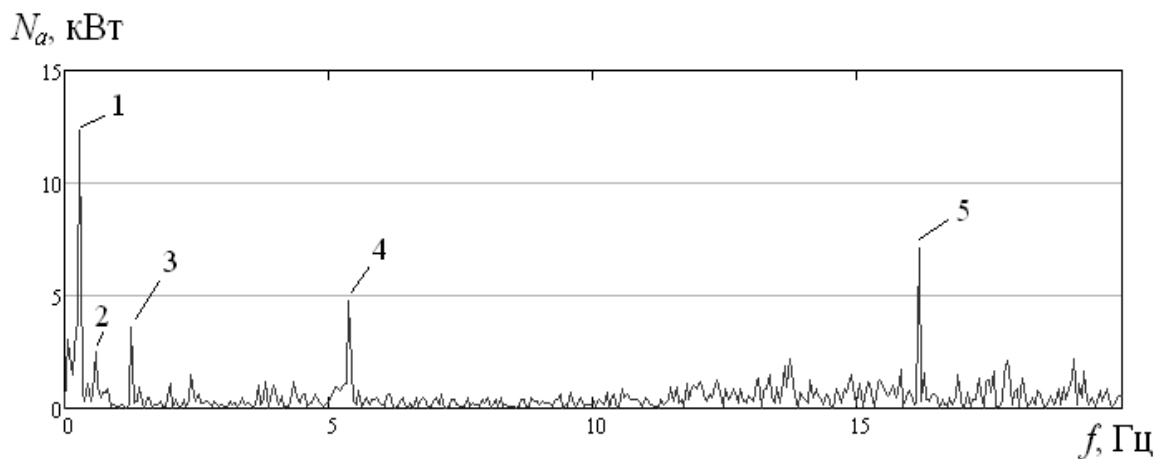


Рисунок 4.10 – Спектр сигнала активной мощности двигателя относительного вращения дисков комбайна «Урал-20Р-11»:

1 – частота изменения нагрузки вследствие наличия на забое зоны перекрытия траекторий дисков планетарного исполнительного органа ( $f=0,2$  Гц); 2 – частота относительного вращения резцовых дисков ( $f=0,6$  Гц); 3 – частота вращения конической шестерни раздаточного редуктора ( $f=1,4$  Гц); 4 – частота вращения зубчатого колеса редуктора исполнительного органа ( $f=5,4$  Гц); 5 – частота вращения вала приводного двигателя ( $f=16,6$  Гц)

Спектральный анализ сигналов активных мощностей позволяет выявить частотные составляющие в диапазоне  $f = 0...25$  Гц, характеризующие колебания кинематической цепи «исполнительный орган – редуктор – приводной двигатель» (рисунок 4.10) [204].

Появление дефектов в трансмиссиях приводов комбайна сопровождается возникновением переменных нагрузок, что обуславливает изменение спектра сигнала активной мощности привода. Периодический спектральный анализ сигналов активной мощности приводных двигателей позволит оценивать техническое состояние приводов проходческо-очистного комбайна и при необходимости осуществить ремонтные воздействия [56, 82, 130, 153].

#### **4.4.2 Нагруженность приводов комбайнов «Урал-20Р-11» при отработке забоя неполным сечением исполнительного органа**

Исследование процесса формирования нагрузок на приводы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11» при разрушении забоя неполным сечением исполнительного органа осуществлялось сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» ПНИПУ с участием автора. Комбайн осуществлял подрубку пласта «Красный-II» на руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (Пермский край, Россия). Угол проводимой выработки составлял  $+2^\circ$ , площадь забоя  $5,5 \text{ м}^2$ , высота разрушаемого слоя 1,0 м. Графики изменения активных мощностей двигателей испытываемого комбайна «Урал-20Р-11» приведены на рисунке 4.11.

При выполнении испытаний комбайн осуществлял подрубку пласта, двигаясь со скоростью подачи на забой 0,40 м/мин, что соответствует диапазонам значений скоростей, устанавливаемым на практике при выполнении данных операций [90]. Скорость подачи ограничивается

машинистом в соответствии с показаниями токовых индикаторов нагрузки приводных электродвигателей.

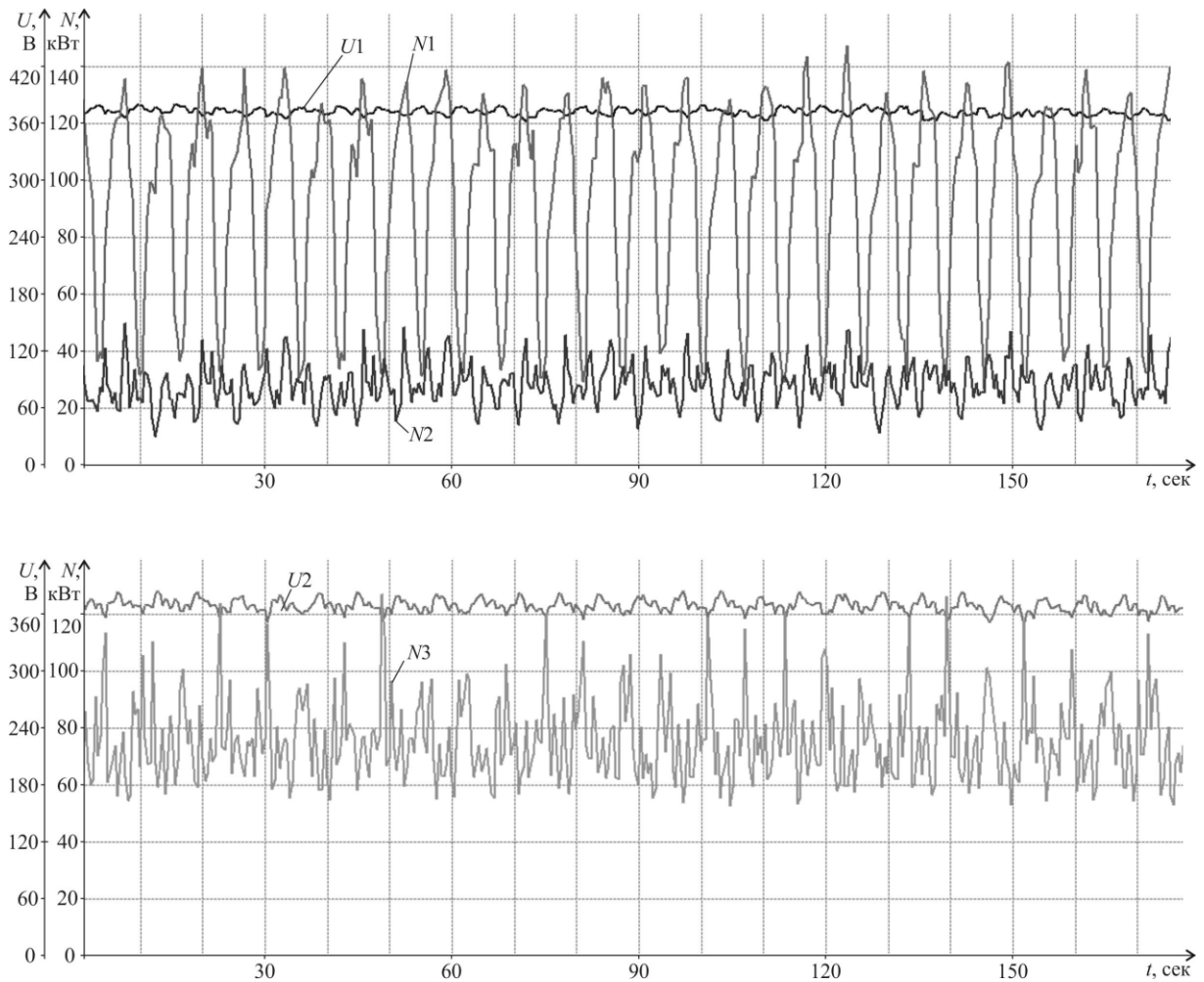


Рисунок 4.11 – Изменение параметров электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя неполным сечением исполнительного органа при скорости подачи  $V_{\text{п}} = 0,40$  м/мин:  $U_1$  и  $U_2$  – фазные напряжение на вводах № 1 и № 2 соответственно, В;  $N_1 \dots N_3$  – активные мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков, переносного вращения, двигателя бермовых фрез соответственно, кВт

Средние значения и средние квадратичные отклонения сигналов активных мощностей приводных электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11», полученные при отработке забоя неполным сечением исполнительного органа, представлены в таблице 4.3.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что среднее значение активной мощности приводных электродвигателей



бермовых фрез превышает номинальное значение. Уровень вариативности нагрузок на приводы относительного и переносного вращения резцовых дисков, характеризуемый значениями средних квадратичных отклонений мощностей, увеличился в 2,3...2,5 раза по сравнению с работой комбайна полным сечением исполнительного органа (см. таблицы 4.1 и 4.3) [179].

Таблица 4.3 – Средние значения активных мощностей приводных электродвигателей комбайна «Урал-20Р-11» при обработке забоя неполным сечением исполнительного органа со скоростью подачи  $V_{\text{п}}=0,40$  м/мин

Обследуемые двигатели	Среднее значение активной мощности $N_a$ , кВт	Среднее квадратичное отклонение $\sigma_N$ , кВт	Значение коэффициента вариации $K_v$	Активная мощность при номинальной нагрузке двигателя, кВт
Относительное вращение 1	97,17	38,16	0,39	170,2
Относительное вращение 2	104,70	45,56	0,44	170,2
Бермовый орган	169,73	17,56	0,20	163,0
Переносное вращение	36,20	7,57	0,21	81,5

Скорость подачи комбайна превышала допустимое значение по критерию максимальной толщины стружки  $h_{\text{max}}$ , отделяемой от массива резцами планетарно-дискового исполнительного органа. В результате кулаки-резцедержатели контактировали с разрушаемым массивом, что обуславливало появление высоковариативных нагрузок на приводах, вибрацию корпуса, проскальзывание гусениц комбайна.

Штатные системы индикации комбайна «Урал-20Р-11» не позволяют достоверно оценивать нагруженность разветвленных трансмиссий планетарно-дисковых органов при отработке забоя неполным сечением исполнительных органов. В то время, как один из резцовых дисков движется вне пространства забоя, второй диск разрушает массив с увеличенной толщиной стружки. Сигнал о превышении средних нагрузок в трансмиссии будет подан системой индикации комбайна только в случае минимум

двухкратной перегрузки со стороны резового диска, находящегося в контакте с массивом. Величины динамических составляющих нагрузок не контролируются бортовой системой комбайна, что обуславливает ускоренный расход ресурса поворотных и раздаточных редукторов планетарных органов, редукторов бермовых органов, приводных электродвигателей.

Полученные результаты согласуются с данными специалистов инженерно-технических служб добывающих предприятий калийной отрасли [89]. По данным сотрудников эксплуатирующих и сервисных служб, большинство аварийных отказов приводов исполнительных органов комбайнов «Урал» происходит при работе в режимах зарубки, подрубки продуктивных пластов и расширения очистных камер [186].

#### **4.5 Результаты экспериментальных исследований по оценке гранулометрического состава калийной руды добываемой проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р»**

Оценка гранулометрического состава выполнена для калийной руды, добытой с использованием комбайнов модификаций «Урал-20Р-11» (на дисках планетарного органа установлены неповоротные резцы РС-14У), «Урал-20Р-12» (на резовых дисках установлены поворотные резцы ПС) и комбайне «Урал-20Р-01» (ранняя модификация, диски оснащены поворотными резцами ПС) [61, 79, 158, 159].

Результаты исследований гранулометрического состава добытой руды приведены в протоколах ситового анализа (приложение В). На рисунках 4.12...4.14 представлены зависимости изменения содержания классов крупности частиц в добываемой калийной руде от скорости подачи комбайна  $M_i(Q)$  при отработке забоя полным сечением исполнительного органа [185].

Анализ полученных зависимостей показывает, что минимальное количество пылевидных труднообогатимых классов в руде, добываемой комбайнами «Урал-20Р-11», диски которых оснащены неповоротными

резцами с прямоугольной режущей кромкой, обеспечивается при работе добычной машины с производительностью  $Q = 6,0 \dots 6,5$  т/мин.

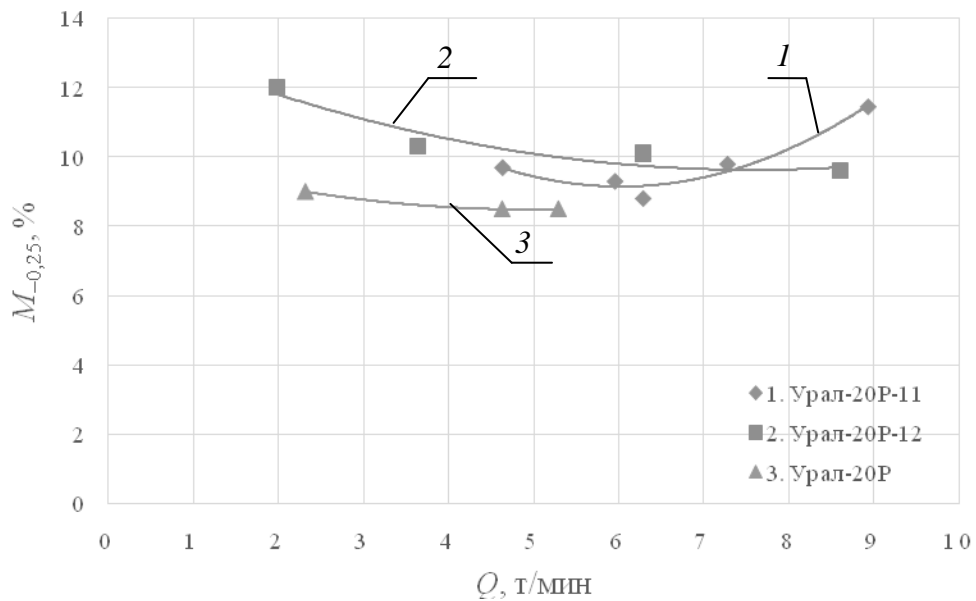


Рисунок 4.12 – Изменение массового содержания труднообогатимых классов «-0,25 мм» в добываемой руде в зависимости от производительности комбайнов:

1 – «Урал-20Р-11»; 2 – «Урал-20Р-12»; 3 – «Урал-20Р-01»

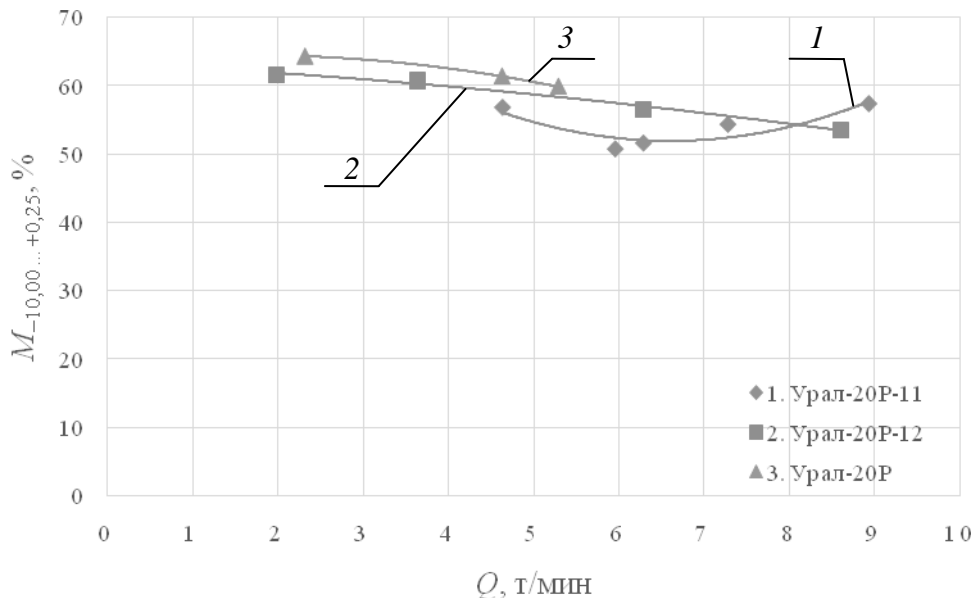


Рисунок 4.13 – Изменение массового содержания классов «-10...+0,25 мм» в добываемой руде в зависимости от производительности комбайнов:

1 – «Урал-20Р-11»; 2 – «Урал-20Р-12»; 3 – «Урал-20Р-01»

Дальнейшее повышение производительности комбайнов «Урал-20Р-11» обуславливает разрушение забоя резами с отношением среднего шага резания  $t_{cp}$  к средней толщине стружки  $h_{cp}$ , находящимся вне диапазона рациональных значений  $t_{cp}/h_{cp} = 2...4$ . При технической производительности комбайна  $Q > 6,0$  т/мин калийный массив разрушается сближенными резами малых сечений при  $t_{cp}/h_{cp} < 2$ , что определяет излишнее измельчение руды и увеличение выхода мелких труднообогатимых классов «-0,25 мм».

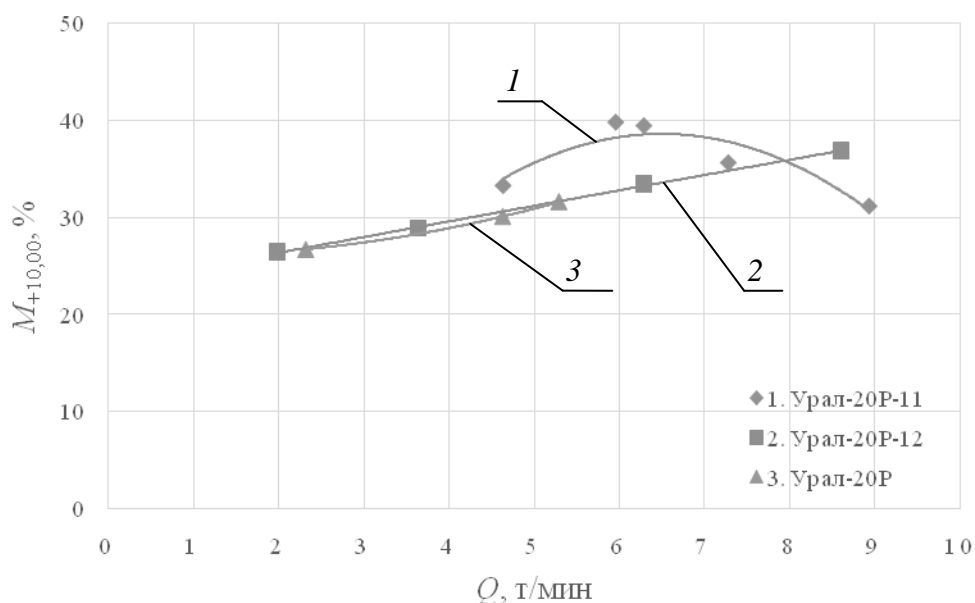


Рисунок 4.14 – Изменение массового содержания классов «+10 мм» в добываемой руде в зависимости от производительности комбайнов:

1 – «Урал-20Р-11»; 2 – «Урал-20Р-12»; 3 – «Урал-20Р-01»

Работа комбайнов «Урал-20Р-12», оснащенных дисками с поворотными резами ПС, характеризуется снижением количества труднообогатимых классов руды «-0,25 мм» при увеличении производительности в диапазоне  $Q = 2,0...6,0$  т/мин, что соответствует классическим представлениям экспериментально-статистической теории резания: при повышении производительности добычной машины увеличивается глубина резов, уменьшается выход мелких пылевидных классов в продуктах отбойки. Однако разрушение забоя резами с отношением среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{cp}/h_{cp} < 2$  при производительности  $Q > 6,0$  т/мин

определяет уменьшение сечения стружки, так как забой разрушается резами с практически выровненной поверхности. Указанное определяет увеличение количества промежуточных сколов в срезе и излишнее дробление руды. Использование резцов ПС с конической головной частью определяет снижение влияния отношения  $t_{cp}/h_{cp}$  на количество труднообогатимых классов в добываемой руде ввиду иной конфигурации областей концентрации напряжений в предрезцовом пространстве. В диапазоне технической производительности комбайнов «Урал-20Р-12»  $Q = 6,0 \dots 8,0$  т/мин процентное содержание труднообогатимых классов в добываемой руде стабилизируется [79].

Минимальное количество труднообогатимых классов «-0,25 мм» в добываемой руде зафиксировано при работе комбайнов ранней модификации «Урал-20Р-01» в диапазоне производительности  $Q = 2,3 \dots 5,3$  т/мин. Диски данных комбайнов оснащены поворотными резцами ПС, диаметр резцовых дисков меньше по сравнению с новыми модификациями «Урал-20Р-11/12» (1140 по сравнению с 1280 мм соответственно). Количество резцов на каждом диске планетарного органа комбайна «Урал-20Р-01» составляет  $Z_p = 15$  шт., то есть меньше, чем у комбайнов модификаций «Урал-20Р-11/12», где  $Z_p = 17$  шт. Таким образом, параметры резов комбайнов «Урал-20Р-01» находятся в диапазоне рациональных значений отношения среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{cp}/h_{cp}$ , что положительно отражается на качестве добываемой руды.

Удельные затраты энергии процесса добычи калийной руды определены по значениям активных мощностей приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р-11» и рассчитаны по формуле (4.10)

$$H_w = \frac{\Sigma N}{60 \gamma_k S_{и.о} V_{п}}, \quad (4.10)$$

где  $H_w$  – удельные затраты энергии на добычу калийной руды комбайном «Урал-20Р-11», кВт·ч/т;  $\Sigma N$  – суммарная активная мощность двигателей породоразрушающих и погрузочных органов комбайна, кВт;  $\gamma_k$  – плотность

руды в массиве,  $\text{т/м}^3$ ;  $S_{\text{и.о.}}$  – площадь сечения выработки,  $\text{м}^2$ ;  $V_{\text{п}}$  – скорость подачи комбайна,  $\text{м/мин}$  [185].

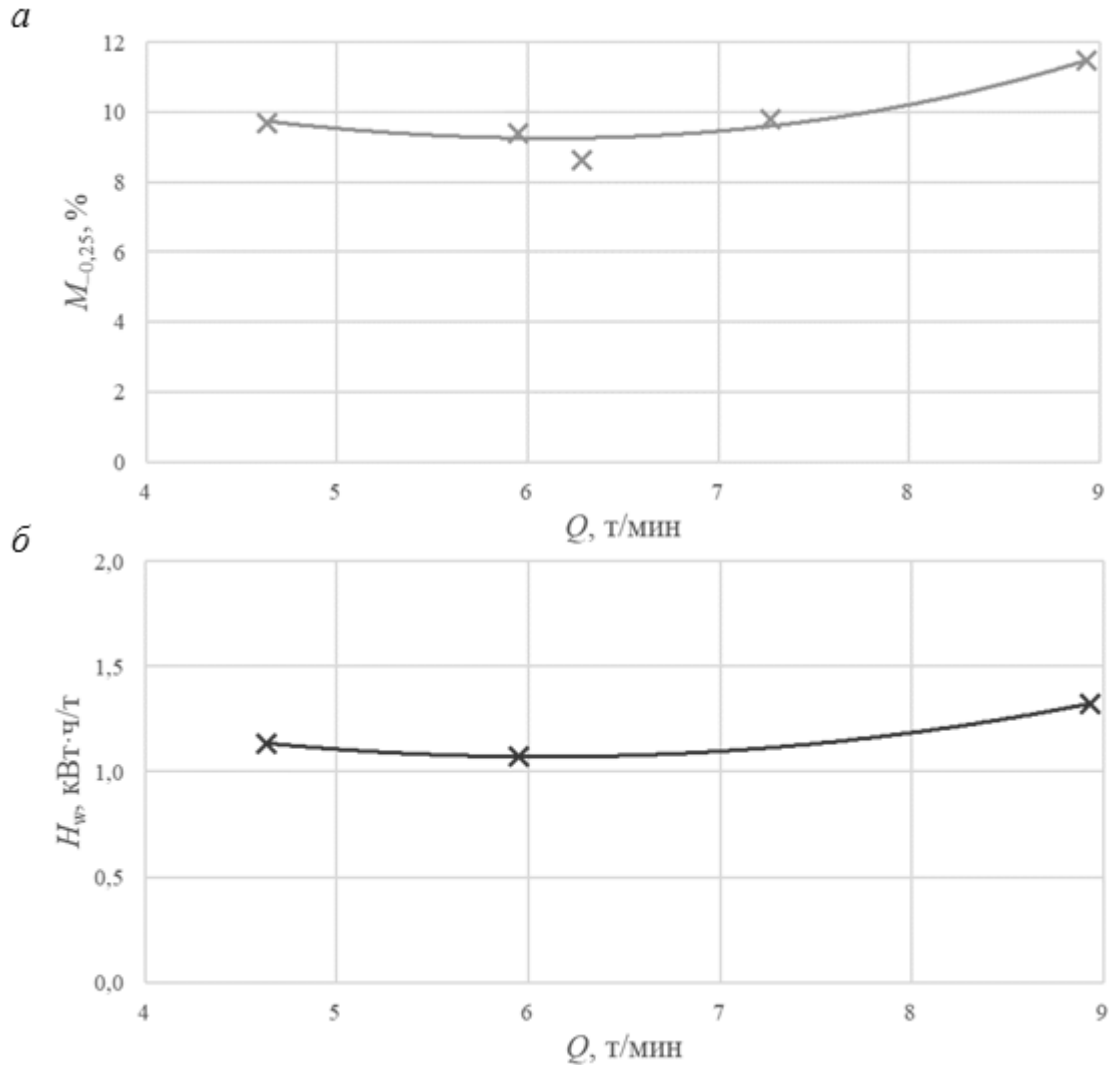


Рисунок 4.15 – Изменение массовой доли содержания труднообогатимых классов «-0,25 мм» в добываемой руде (а) и удельных затрат энергии процесса добычи руды (б) в зависимости от производительности комбайна «Урал-20Р-11»

Анализ результатов экспериментальных исследований (рисунок 4.15) показал существование корреляции между количеством труднообогатимых классов в добываемой руде и энергоэффективностью процесса добычи руды при работе комбайнов «Урал-20Р-11»: минимальному количеству труднообогатимых классов соответствует минимум удельных затрат энергии.

#### **4.6 Оценка эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» в условиях калийных рудников**

Оценка технологического уровня организации добычных работ и энергоэффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов в условиях калийного рудника выполнена автором в соответствии с методологическими подходами, изложенными в подразделе 2.5, применительно к комбайну «Урал-20Р-11».

Длительность контролируемого периода эксплуатации комбайна составила 26 суток. Анализ данных непрерывного мониторинга нагрузок приводных двигателей позволил определить время производительной работы комбайна и периоды выполнения вспомогательных технологических операций, интервалы работы комбайна неполным сечением исполнительного органа [212].

Путём соотнесения времени производительной работы комбайна (определяется по времени функционирования конвейера-перегрузателя) с календарным временем эксплуатации за вычетом периодов обслуживания и ремонтов, в соответствии с зависимостями (2.53) и (2.54), определены значения коэффициентов производительной работы за каждые 24 часа (рисунок 4.16).

За весь контролируемый период времени среднее значение коэффициента производительной работы комбайна  $k_{п.р.} = 0,29$ .

Увеличение значений коэффициента производительной работы комбайна при работе в очистной камере калийного рудника возможно при включении в состав механизированного комбайнового комплекса второго самоходного вагона. Один из способов такой организации работ добычных и транспортирующих машин запатентован автором [92].

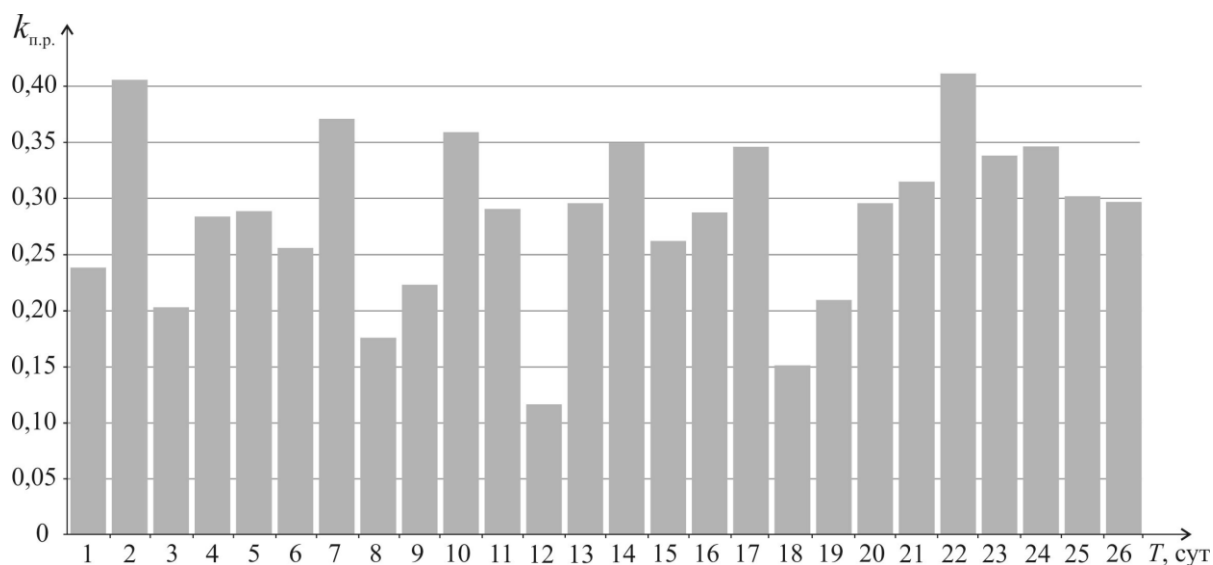


Рисунок 4.16 – Изменение значений коэффициента производительной работы  $k_{п.р.}$  комбайна «Урал-20Р-11» в течение контролируемого временного периода

В период выполнения экспериментальных исследований комбайн осуществлял добычу калийной руды по технологии двухслойной выемки, включающей последовательное выполнение следующих операций:

- зарубка – формирование заезда в камеру из штрека (комбайн работает неполным сечением исполнительного органа с низкой производительностью);
- работа полным сечением исполнительного органа;
- отгонка комбайна к началу очистной камеры;
- подрубка пласта [199].

Анализ данных о нагруженности приводных двигателей комбайна позволил определить доли времени, затрачиваемые на выполнение отдельных технологических операций, в течение рассматриваемого периода (таблица 4.4) [179].

Общее время выполнения отдельных технологических операций соотнесено с длительностью контролируемого временного периода (рисунок 4.17).



Таблица 4.4 – Суммарная длительность технологических операций при работе комбайна «Урал-20Р-11» за контролируемый период времени

Наименование технологической операции	Общее время выполнения операции, ч	Время производительной работы комбайна, ч
Зарубка	48,08	10,14
Работа полным забоем	403,08	118,10
Отгонка	48,67	0,00
Подрубка	132,17	52,45
Итого	632,00	180,69

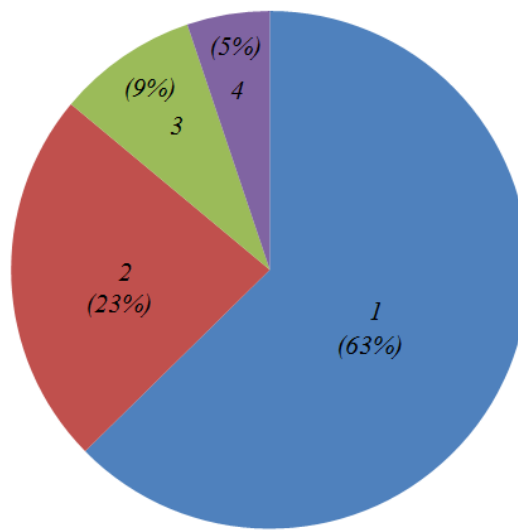


Рисунок 4.17 – Доля времени выполнения отдельных технологических операций при работе комбайна «Урал-20Р-11»:

1 – работа комбайна полным забоем; 2 – работа комбайна при подрубке пласта;  
3 – зарубка; 4 – отгонка комбайна из очистной камеры

Фактические значения удельных затрат энергии процесса добычи калийной руды при работе комбайна «Урал-20Р-11» для каждого временного периода находятся на основании данных о производительности комбайна и расходе энергии за данный период. В соответствии с зависимостью (2.52) определяется коэффициент энергоэффективности использования проходческо-очистного комбайна  $k_{э.эф}$ , как отношение базовых удельных затрат энергии к фактической величине (таблица 4.5) [199].

Таблица 4.5 – Значения коэффициентов энергоэффективности  $k_{э.эф}$  при различных режимах работы комбайна «Урал-20Р-11»

Работа комбайна в ходе замера	Площадь сечения забоя, м <sup>2</sup>	Производительность, т/мин	Угол падения выработки град	Удельные затраты эл. энергии кВт·ч/т	Коэфф. эн. эффективности
Отработка камеры глухим забоем, пройдено за замер 10,46 м	15,5	5,9	-2	1,33	0,87
Отработка камеры глухим забоем, пройдено за замер 16,60 м	15,5	5,8	-2	1,20	0,97
Отработка камерой вторым ходом (подрубка пласта), пройдено за замер 13,80 м	6,2	3,4	+1	1,78	0,65
Отработка камеры глухим забоем, пройдено за замер 11,13 м	15,5	4,5	-5	1,49	0,78

Таким образом, предлагаемые методологические основы и программно-регистрирующее оборудование обеспечивают возможность контроля энергоэффективности использования комбайна и оценки технологического уровня организации добычных работ в условиях калийных рудников. Изменения значений коэффициентов энергоэффективности и производительной работы во времени позволят выявлять и своевременно устранять неявные причины, негативно влияющие на процесс функционирования комбайнов при добыче калийной руды.

#### 4.7 Выводы по главе 4

1. Разработаны методика и программно-регистрирующее оборудование для проведения экспериментальных исследований процесса формирования нагрузок приводов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников и

количественного определения величин коэффициентов производительной работы и энергоэффективности функционирования комбайнов.

2. Определены средние значения и средние квадратичные отклонения сигналов активной мощности приводных электродвигателей исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р-11» при разрушении калийного массива полным сечением исполнительного органа и при выполнении подрубки продуктивного пласта. В рассматриваемых горнотехнических условиях при скорости подачи комбайна «Урал-20Р-11»  $V_{\text{п}} = 0,14$  м/мин и работе полным сечением исполнительного органа двигателя относительного вращения резцовых дисков загружены на 72 и 74 %, двигатели отбойного устройства, конвейера и относительного вращения резцовых дисков загружены на 44, 51 и 25,6 % соответственно.

3. Установлено, что при работе комбайна «Урал-20Р-11» полным сечением исполнительного органа переменный характер нагрузок на приводы относительного вращения резцовых дисков обусловлен взаимодействием резцовых дисков с отделенной от массива рудой, циркулирующей в призабойном пространстве. Неэффективная отгрузка руды обуславливает увеличение нагрузок на приводы планетарных и бермовых исполнительных органов комбайна, определяет переизмельчение руды, что ухудшает её гранулометрический состав.

4. Экспериментально доказано, что при работе комбайна в режиме подрубки пласта с повышенной скоростью подачи  $V_{\text{п}} = 0,4$  м/мин наиболее нагруженными являются приводы бермовых фрез. Уровень вариативности нагрузок на приводы относительного и переносного вращения резцовых дисков увеличился в 2,3...2,5 раза по сравнению с работой комбайна полным сечением исполнительного органа. Указанное обуславливает ускоренный расход ресурса редукторов исполнительных органов и увеличивает вероятность возникновения аварийных отказов.

5. Доказано влияние типа резцов на количество труднообогатимых классов в добываемой руде. По критерию обеспечения минимального

количества мелких труднообогатимых классов в добываемой руде рациональная производительность комбайнов «Урал-20Р-11» (диски оснащены резцами РС-14У) составляет  $Q = 6 \dots 6,5$  т/мин, для комбайнов «Урал-20Р-12» (диски оснащены поворотными резцами ПС) рациональная производительность составляет  $Q = 6 \dots 8$  т/мин.

6. Доказано существование корреляции между количеством труднообогатимых классов в добываемой руде и энергоэффективностью процесса добычи руды при работе комбайнов «Урал-20Р-11»: минимальному количеству труднообогатимых классов соответствует минимум удельных затрат энергии.

7. Определены величины комплексных показателей эффективности использования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11». Средний за рассматриваемый временной период 26 суток коэффициент производительной работы  $k_{п.р.} = 0,29$ , а значение коэффициента энергоэффективности изменялось в диапазоне  $k_{э.эф} = 0,65 \dots 0,97$ .

## **ГЛАВА 5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ КОМБАЙНОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ КАК ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

### **5.1 Совершенствование породоразрушающих исполнительных органов комбайнов калийных рудников**

Анализ результатов исследований, выполненных автором в настоящей работе, показывает, что повышение энергоэффективности процесса разрушения калийного массива резанием и увеличение массовой доли обогатимых классов в добываемой руде обеспечиваются при формировании в срезе последовательных крупных сколов с устойчивыми геометрическими параметрами. Сколы устойчивой формы отделяются от калийного массива при развитии имеющихся техногенных трещин, сформированных вдоль линий пересечения поверхностей разрушения реализованных резов. Устойчивая форма сколов позволяет минимизировать измельчение добытой руды на этапах погрузки и транспортирования [179, 185, 187, 189, 191, 188].

Формирование областей концентрации напряжений и техногенных трещин, по которым осуществляется отделение последовательных сколов от калийного массива, частично реализуется при использовании некоторых традиционных схем резания, например, шахматной, последовательной (см. рисунок 2.6). При этом параметры резов должны находиться в диапазонах рациональных значений. Таким образом, первоочередной задачей совершенствования оборудования комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования является обоснование конструкции и рациональных параметров работы породоразрушающих исполнительных органов [13, 15, 27, 31, 72, 79].

В сравнении с угольными очистными комбайнами добычные машины калийных рудников характеризуются низкой степенью автоматизации работы приводов. Актуальной является задача разработки способов

автоматического регулирования и поддержания параметров резания в рациональных диапазонах.

Кроме того, следует обратить внимание на конструкции резцовых инструментов, изыскать технические решения, направленные на повышение эффективности работы резцов калийных комбайнов по критериям энергоэффективности, минимального образования пылевидных труднообогатимых классов руды, надежности.

Например, повышение энергоэффективности функционирования наиболее мощных и производительных комбайнов «Урал-20Р», выпускаемых российским машиностроением для калийной отрасли, возможно посредством совершенствования планетарно-дисковых исполнительных органов [167].

Резцовые диски комбайнов «Урал-20Р» разрушают калийный массив радиальными резами с переменным шагом  $t$  и толщиной стружки  $h$ . Оптимизацию параметров резания осуществляют по средним значениям указанных параметров, при этом доказано, что рациональный диапазон отношения среднего шага резания к толщине стружки составляет  $t_{cp}/h_{cp} = 2...4$  [189, 198].

В главе 2 (подраздел 2.4.1) на основании расчетов показано, что для комбайнов «Урал-20Р-11/12» рациональный диапазон  $t_{cp}/h_{cp}$  соответствует производительности  $Q = 3...6$  т/мин (см. рисунок 2.13). При производительности комбайна  $Q = 8$  т/мин отношение среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{cp}/h_{cp}$  существенно меньше рациональных значений, что обуславливает увеличение удельных затрат энергии на добычу калийной руды механизированным способом и повышение массовой доли труднообогатимых классов в продуктах отбойки (см. рисунок 4.15).

В соответствии с выражениями (2.36) и (2.37), наиболее простым способом обеспечения рациональных параметров резания при работе комбайнов «Урал-20Р-11/12» с производительностью  $Q = 8$  т/мин является уменьшение количество резцов  $Z_p$  на каждом диске планетарного органа с 17 до 12 штук (рисунок 5.1) [79].

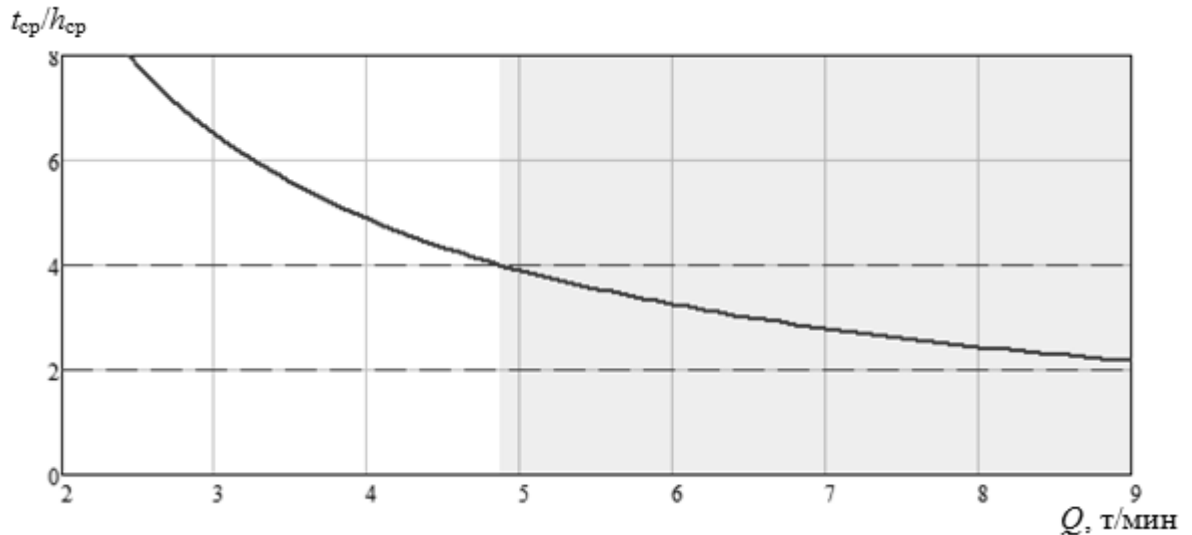


Рисунок 5.1 – Изменение отношения среднего шага резания к толщине стружки  $t_{cp}/h_{cp}$  в зависимости от производительности  $Q$  комбайна «Урал-20Р-11/12» при работе пространственного планетарно-дискового органа с уменьшенным количеством резцов на каждом диске до  $Z_p = 12$  шт

Повышение энергоэффективности функционирования барабанных исполнительных органов (верхних отбойных устройств и берм) комбайнов «Урал» возможно посредством перехода с последовательной схемы разрушения калийного массива на шахматную схему резания. В подразделе 2.3.1 указывалось, что при использовании шахматной схемы резания удельные затраты энергии на разрушение калийной руды на 30...40 % ниже, чем при использовании последовательной схемы (см. рисунок 2.8). Аналогичный вывод следует и из анализа зависимостей изменения массовой доли труднообогатимых классов в добываемой руде в зависимости от толщины стружки [77, 79, 89, 174, 187].

Работа комбайнов с гусеничным ходовым оборудованием в выработках с положительными углами наклона (движение вверх) зачастую сопровождается проскальзыванием гусениц, что негативно отражается на энергоэффективности функционирования комбайна и гранулометрическом составе руды вследствие снижения производительности добычной машины. Изменение направления вращения верхнего отбойного устройства на противоположное (от почвы выработки к кровле) обуславливает увеличение

прижатия гусениц комбайна к почве выработки за счет действия сил реакции забоя на резцы отбойного устройства. Таким образом, расширяется область работы проходческо-очистных комбайнов в наклонных выработках без проскальзывания гусениц.

Внедрение предложенных технических решений не потребует значительных материальных затрат со стороны завода-изготовителя, а на работающих добычных машинах может быть реализовано силами специалистов ремонтно-механических мастерских рудников.

## **5.2 Выбор энергоэффективных режимов работы комбайнов калийных рудников**

### **5.2.1 Обоснование энергоэффективных режимов работы планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов калийных рудников**

Повышение энергоэффективности функционирования комбайнов калийных рудников возможно посредством использования систем автоматического управления, обеспечивающих поддержание режимных параметров работы исполнительных органов комбайна в диапазонах рациональных значений с учетом изменения горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации добычных машин [188].

В настоящее время регулирование режимных параметров работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников с исполнительными органами бурового типа осуществляется посредством изменения скорости подачи добычных машин на забой в соответствии с зависимостью (2.34). Следовательно, регулируемым параметром при работе породоразрушающих исполнительных органов является толщина стружки  $h$  или её среднее значение  $h_{\text{ср}}$ . Среднее значение шага резания является постоянной величиной, то есть в соответствии с выражением (5.1)

$$\begin{cases} h_{\text{ср}} = \text{var}; \\ t_{\text{ср}} = \text{const}. \end{cases} \quad (5.1)$$



Управление скоростью подачи современных проходческо-очистных комбайнов калийных рудников осуществляется оператором вручную, путем регулирования расхода рабочей жидкости, подаваемой к гидромоторам гусеничного хода добычных машин. Применение ручного управления зачастую является причиной возникновения сверхнормативных нагрузок на детали и узлы комбайна при нарушении режимов работы и выбора машинистом чрезмерно высокой скорости подачи для минимизации организационных простоев [156, 157].

Оценка нагруженности приводов комбайна осуществляется машинистом по приборам индикации, установленным в кабине. Информация на индикаторы нагрузки передаётся от датчиков, контролирующих величину тока приводных электродвигателей, и не всегда достоверно характеризует нагруженность элементов разветвленных механических трансмиссий [50, 180]. Как показывает анализ результатов экспериментальных исследований, приведенных в главе 4, при работе комбайна неполным сечением исполнительных органов и превышении максимально допустимой скорости подачи приводные двигатели планетарно-дисковых исполнительных органов могут работать без превышения номинальных значений токов, в то время как поворотные редукторы подвергаются сверхнормативным нагрузкам.

Одним из перспективных направлений совершенствования горных машин является использование в их конструкции частотно-регулируемого привода. Изменение частоты вращения исполнительных органов горных комбайнов даже в относительно узких диапазонах регулирования позволяет обеспечить повышение энергоэффективности функционирования добычных машин, оптимизировав процессы разрушения и погрузки руды по удельным затратам энергии, улучшить гранулометрический состав добываемой руды.

В главе 2 настоящей работы показано, что минимальные удельные затраты энергии  $H_w$  процесса разрушения калийного массива резанием обеспечиваются поддержанием режимных параметров планетарно-дисковых исполнительных органов в диапазонах рациональных величин, что может

быть реализовано посредством изменения частот вращения резцовых дисков. То есть для каждой скорости подачи комбайна  $V_{\text{п}}$  существуют такие значения переносного  $n_{\text{пер}}$  и относительного  $n_{\text{отн}}$  вращения резцовых дисков, когда отношение среднего шага резания к средней толщине стружки находятся в диапазоне рациональных значений  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 2 \dots 4$ .

На рисунке 5.2 приведены графики изменения отношения  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$  в зависимости от производительности  $Q$  комбайна «Урал-20Р-11» при различных частотах переносного вращения резцовых дисков  $n_{\text{пер}} = 4,2 \dots 5,8$  об/мин.

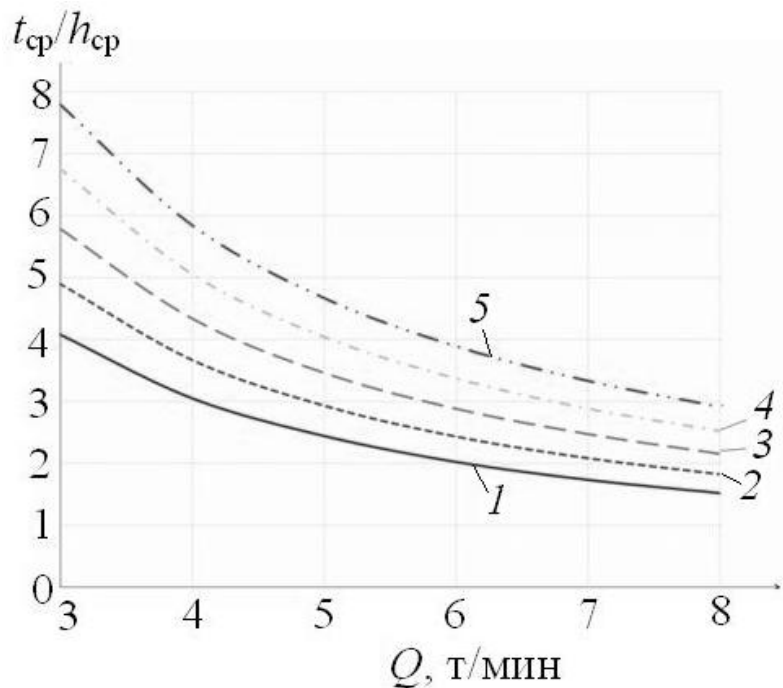


Рисунок 5.2 – Изменение отношения  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$  при разрушении калийного массива резцами планетарно-дискового органа комбайна «Урал-20Р-11» в зависимости от скорости подачи

$V_{\text{п}}$  и частоты переносного вращения  $n_{\text{пер}}$ : 1 –  $n_{\text{пер}} = 4,2$  об/мин; 2 –  $n_{\text{пер}} = 4,6$  об/мин;

3 –  $n_{\text{пер}} = 5,0$  об/мин; 4 –  $n_{\text{пер}} = 5,4$  об/мин; 5 –  $n_{\text{пер}} = 5,8$  об/мин

Анализ представленных графиков показывает, что при увеличении производительности комбайна  $Q > 6$  т/мин параметры резов планетарного органа находятся вне диапазонов рациональных значений. Посредством увеличения частоты переносного вращения  $n_{\text{пер}}$  резцовых дисков обеспечивается энергоэффективное разрушение массива с  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 2 \dots 4$  (см.

рисунок 5.2, поз. 2...5) при номинальной и близкой к номинальной производительности комбайна  $Q = 6...8$  т/мин [188].

Существующие системы управления проходческо-очистных комбайнов «Урал» и их зарубежных аналогов не обеспечивают регулирования частот вращения исполнительных органов в процессе функционирования добычной машины. Реализация предлагаемого способа управления потребует внедрения в конструкцию комбайнов «Урал» частотно-регулируемого привода переносного вращения резцовых дисков. Данные приводы комбайнов «Урал» являются наименее нагруженными и имеют значительные резервы по мощности.

Оценивать удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива в соответствии с выражением (4.7) возможно по значениям активных мощностей приводов относительного вращения резцовых дисков и скорости подачи комбайна на забой.

### **5.2.2 Алгоритм управления приводами планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов калийных рудников**

Автором предложен способ автоматического управления приводами комбайнов с планетарно-дисковыми исполнительными органами, суть которого заключается в следующем [98]. Проходческо-очистной комбайн оборудуется бортовым компьютером, частотным преобразователем для изменения скорости переносного вращения дисков планетарных органов, сервоприводом регулятора расхода рабочей жидкости в системе механизма хода. Оценка нагруженности приводов исполнительных органов комбайна реализуется по действующим значениям активной мощности, потребляемой приводными двигателями относительного вращения резцовых дисков. Скорость подачи комбайна контролируется посредством датчика скорости.

При производительной работе комбайна в выработке при достижении заданной скорости подачи  $V_{\text{зад}}$  регулируется частота переносного вращения резцовых дисков  $n_{\text{пер}}$ , что обеспечивает поддержание отношения параметров

резания – среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{cp}/h_{cp}$  – в диапазонах рациональных значений. Указанное позволяет поддерживать энергоэффективный режим работы приводов относительного вращения резцовых дисков, минимизируя их нагруженность [195].

В качестве примера на рисунке 5.3 представлена блок-схема алгоритма автоматического способа управления приводами исполнительных органов комбайна «Урал-20Р-11».

В бортовой компьютер комбайна вводятся максимально допустимые значения мощностей, потребляемых двигателями породоразрушающих исполнительных органов:

- двигателями относительного движения  $N_{\max.\text{отн.1}}$  и  $N_{\max.\text{отн.2}}$ ;
- двигателями бермовых исполнительных органов  $N_{\max.\text{берм.1}}$  и  $N_{\max.\text{берм.2}}$ ;
- двигателем отбойного устройства  $N_{\max.\text{отб.}}$ ;
- двигателем переносного вращения  $N_{\max.\text{пер.}}$ .

Задаются скорость подачи проходческо-очистного комбайна на забой  $V_{\text{зад}}$  и начальная частота вращения вала двигателя переносного вращения дисков  $n$ . При нажатии кнопки «ПУСК» осуществляется запуск системы автоматического управления приводами комбайна. Бортовой компьютер добычной машины начинает последовательный опрос датчиков мощности с целью определения фактических значений активных мощностей, потребляемых двигателями относительного вращения резцовых дисков:  $N_{\text{факт.отн.1}}$  и  $N_{\text{факт.отн.2}}$ ; бермовых фрез  $N_{\text{факт.берм.1}}$  и  $N_{\text{факт.берм.2}}$ ; отбойного устройства  $N_{\text{факт.отб.}}$ ; переносного вращения  $N_{\text{факт.пер.}}$ . Фактические значения сравниваются с установленными максимально-допустимыми.

Превышение фактического значения активной мощности любого из контролируемых двигателей над заданным значением обуславливает, в соответствии с предлагаемым алгоритмом, уменьшение скорости подачи комбайна на забой на величину  $\Delta V$ , при этом на дисплее в кабине комбайна отобразится информация о перегрузке двигателей [162].

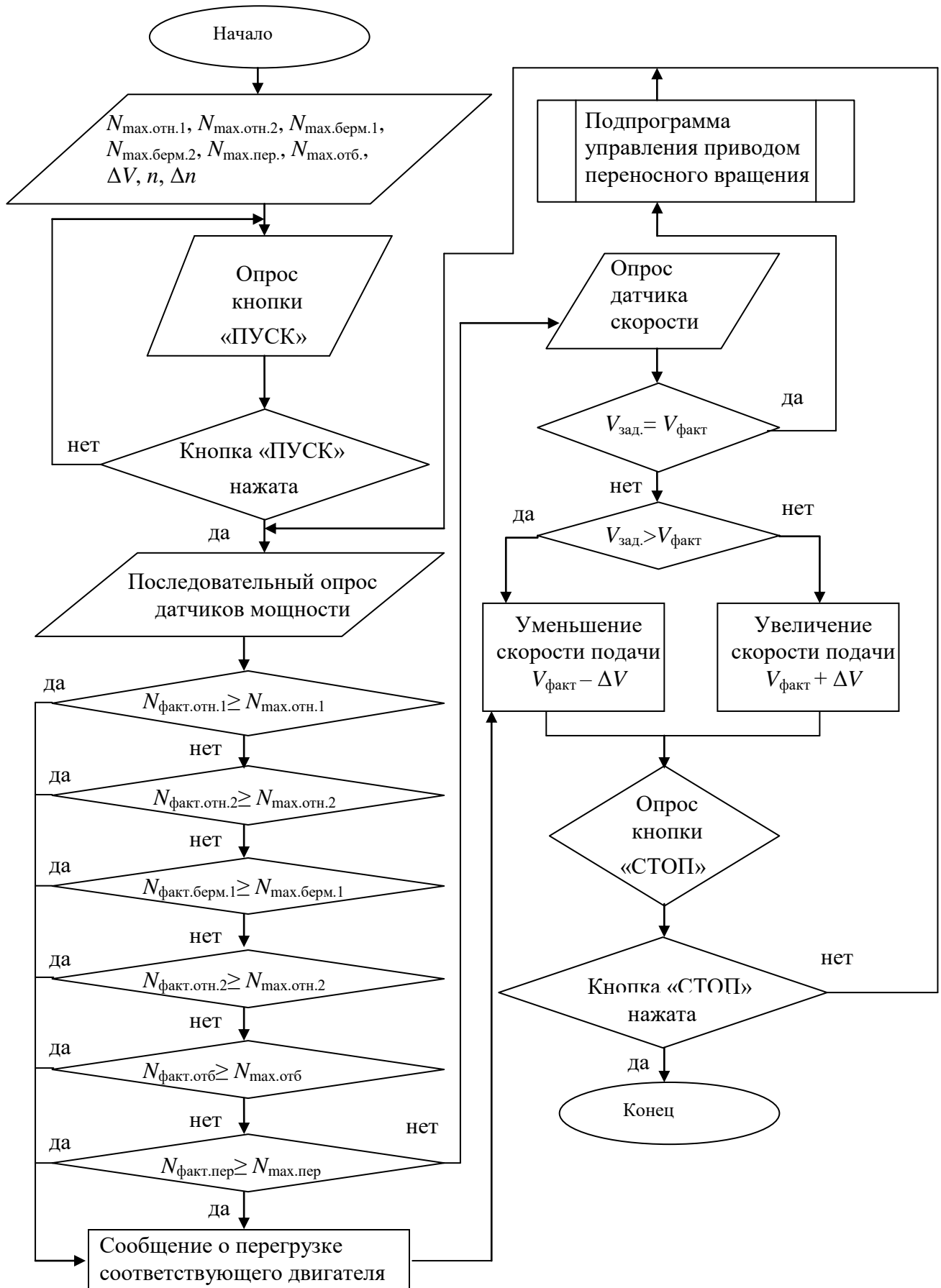


Рисунок 5.3 – Блок-схема алгоритма автоматического способа управления комбайном

«Урал-20Р-11»

В случае отсутствия перегрузок приводных электродвигателей реализуются опрос датчика скорости и определение фактического значения скорости подачи комбайна на забой  $V_{\text{факт}}$ . Полученное значение  $V_{\text{факт}}$  сравнивается с заданным значением скорости подачи  $V_{\text{зад}}$ . Если фактическое значение скорости подачи комбайна  $V_{\text{факт}}$  больше (меньше) заданного значения  $V_{\text{зад}}$ , осуществляется уменьшение (увеличение) скорости подачи комбайна на величину  $\Delta V$  посредством включения сервопривода регулятора потока гидропривода хода комбайна.

При условии, что  $V_{\text{факт}} = V_{\text{зад}}$ , реализуется подпрограмма управления приводом переносного вращения резцовых дисков (рисунок 5.4) посредством использования преобразователя частоты питающего напряжения соответствующего электродвигателя.

Удельные энергозатраты разрушения массива планетарным исполнительным органом комбайна «Урал» определяются по формуле (5.2)

$$H_w = (N_{\text{отн}} + N_{\text{пер}})(60S_{\text{и.о.}} V_{\text{п}})^{-1}, \quad (5.2)$$

где  $N_{\text{пер}}$  – мощность двигателя переносного вращения дисков, кВт;  $N_{\text{отн}}$  – мощность двигателей относительного вращения дисков, кВт;  $S_{\text{и.о.}}$  – площадь забоя, обрабатываемая планетарным исполнительным органом, м<sup>2</sup>.

Учитывая, что параметры выражения (5.2) в общем виде могут быть представлены системой (5.3)

$$\begin{cases} S_{\text{и.о.}} = \text{const}; \\ V_{\text{п}} \rightarrow \text{const}; \\ N_{\text{пер}} \ll N_{\text{отн}}, \end{cases} \quad (5.3)$$

то изменение частоты вращения ротора двигателя привода переносного вращения резцовых дисков осуществляется при удержании в заданном диапазоне мощности наиболее нагруженных приводов относительного вращения дисков планетарного исполнительного органа.

Снижение энергопотребления двигателей относительного вращения резцовых дисков обеспечивается за счет поддержания параметров резания в рациональных диапазонах значений, в частности обеспечения  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 2 \dots 4$ .

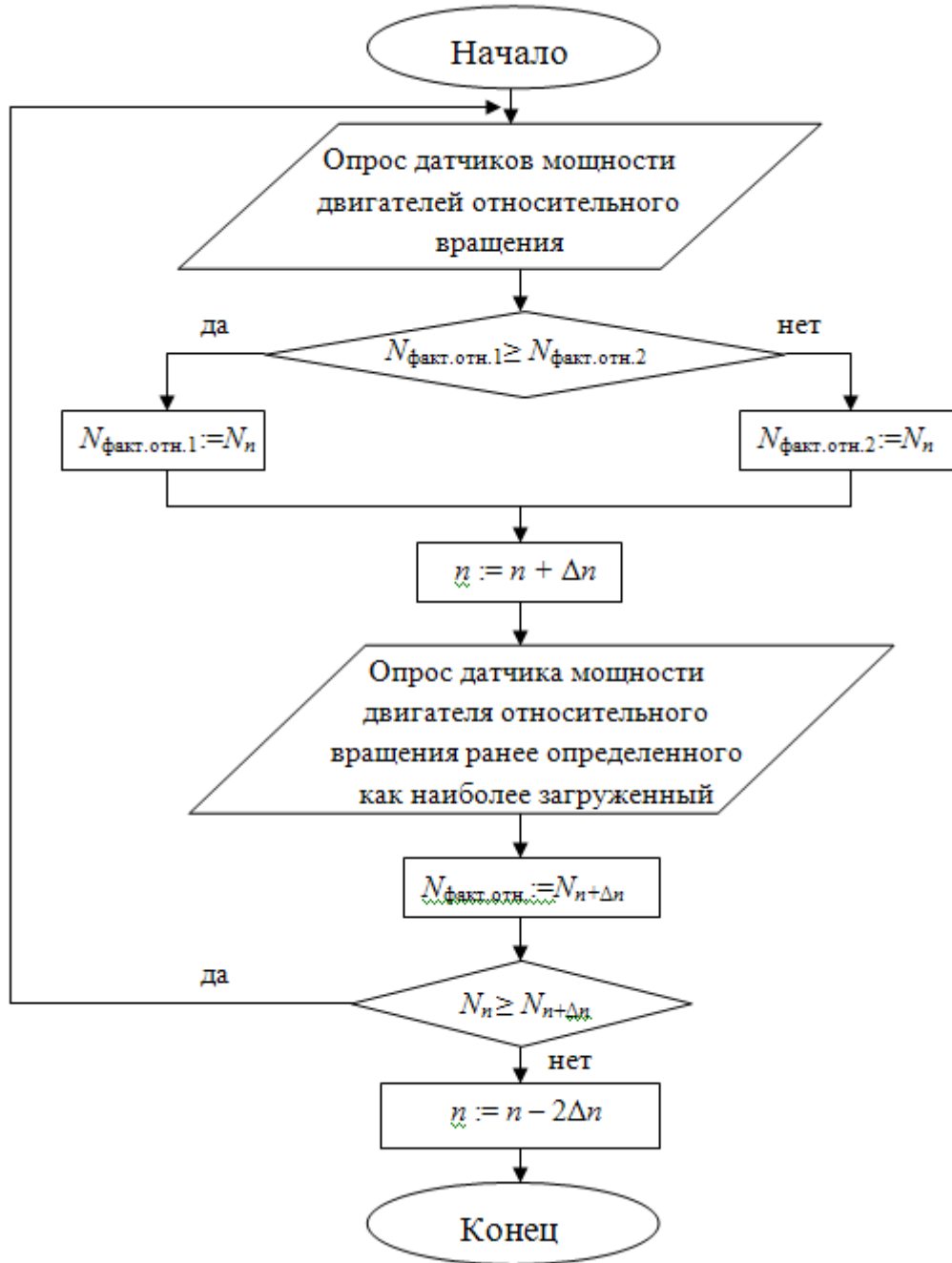


Рисунок 5.4 – Подпрограмма управления приводом переносного вращения дисков

Порядок работы подпрограммы управления приводом переносного вращения (см. рисунок 5.4) включает опрос датчиков мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков и сравнение полученных значений  $N_{\text{факт.отн.1}}$  и  $N_{\text{факт.отн.2}}$ . Максимальному значению  $N_{\text{факт.отн.}}$  присваивается индекс  $N_n$ . Далее осуществляется регулирование частоты переносного вращения резцовых дисков: частота вращения ротора

соответствующего приводного электродвигателя дискретно увеличивается на величину  $\Delta n$ .

По показаниям датчика определяется фактическое значение мощности  $N_{n+\Delta n}$  и, пока выполняется условие  $N_n > N_{n+\Delta n}$ , посредством использования частотного преобразователя частота переносного вращения резцовых дисков дискретно увеличивается. В случае увеличения мощности двигателя относительного вращения ( $N_n < N_{n+\Delta n}$ ) частота вращения ротора двигателя переносного вращения резцовых дисков дискретно уменьшается на величину  $2\Delta n$ . Достижение минимальных (или близких к минимальным) значений потребляемой мощности  $N_{\text{факт.отн.}}$  позволяет минимизировать удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива планетарно-дисковыми исполнительными органами комбайна [188].

При работе комбайна неполным забоем заданную скорость подачи  $V_{\text{зад}}$  следует ограничивать по условию максимальной допустимой толщины стружки с целью недопущения контакта кулаков-резцедержателей с разрушаемым калийным массивом и возникновения сверхнормативных динамических нагрузок [179].

Таким образом, энергоэффективная работа комбайнов, оснащенных планетарно-дисковыми исполнительными органами, при добыче калийной руды обеспечивается поддержанием рационального отношения среднего шага резания к средней толщине стружки  $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ , что достигается изменением скорости переносного вращения резцовых дисков. Регулирование частоты переносного вращения резцовых дисков осуществляется при удержании в заданном диапазоне мощностей электродвигателей приводов относительного вращения резцовых дисков при заданной постоянной скорости подачи комбайна. Предложенный способ управления проходческо-очистным комбайном с планетарно-дисковым исполнительным органом защищен патентом [98].



### 5.3 Разработка пространственных планетарных исполнительных органов комбайнов, разрушающих калийный массив перекрестными резами

Ранее в главах 2 и 3 указывалось, что к преимуществам планетарных породоразрушающих органов относят возможность создания на поверхности забоя сетки пересекающихся резов. Применение перекрестной схемы резания обеспечивает разрушение калийного массива с реализацией имеющихся стартовых трещин и зон концентрации напряжений, что снижает удельные затраты энергии и уменьшает долю труднообогатимых классов в добываемой руде. Кроме того, образование в стружке крупных сколов устойчивой формы обуславливает меньшее измельчение руды при погрузке и транспортировании [100, 183].

Вариант исполнительного органа проходческо-очистного комбайна, разрушающего калийный массив перекрестными резами, разработан с участием автора в сотрудничестве со специалистами АО «Копейский машиностроительный завод» и ОАО «Сильвинит» в 2008 году [95]. Предлагаемый комбинированный роторно-дисковый исполнительный орган (рисунок 5.5) состоит из дисков 1, установленных на поворотных редукторах 2, и ротора 3, закрепленного на корпусе раздаточного редуктора 5.

При разрушении массива диски 1 вращаются вокруг осей 4 с частотой  $n_{отн}$  и оси 7 водила с частотой  $n_{пер}$ , обрабатывая забой радиальными резами. Стружка, отделяемая от массива резами 6 дисков 1, имеет серповидную форму. Толщина стружки  $h_d$  не постоянна и определяется выражением (5.4)

$$h_d = \frac{V_n 10^3}{n_{пер} Z_d} \sin \varphi_i, \quad (5.4)$$

где  $h_d$  – толщина стружки, отделяемой от калийного массива резами дисков, мм;  $Z_d$  – число дисков на исполнительном органе, шт;  $V_n$  – скорость подачи комбайна на забой, м/мин;  $\varphi_i$  – текущее значение угла поворота диска, град.;  $n_{пер}$  – частота переносного вращения дисков, об/мин.

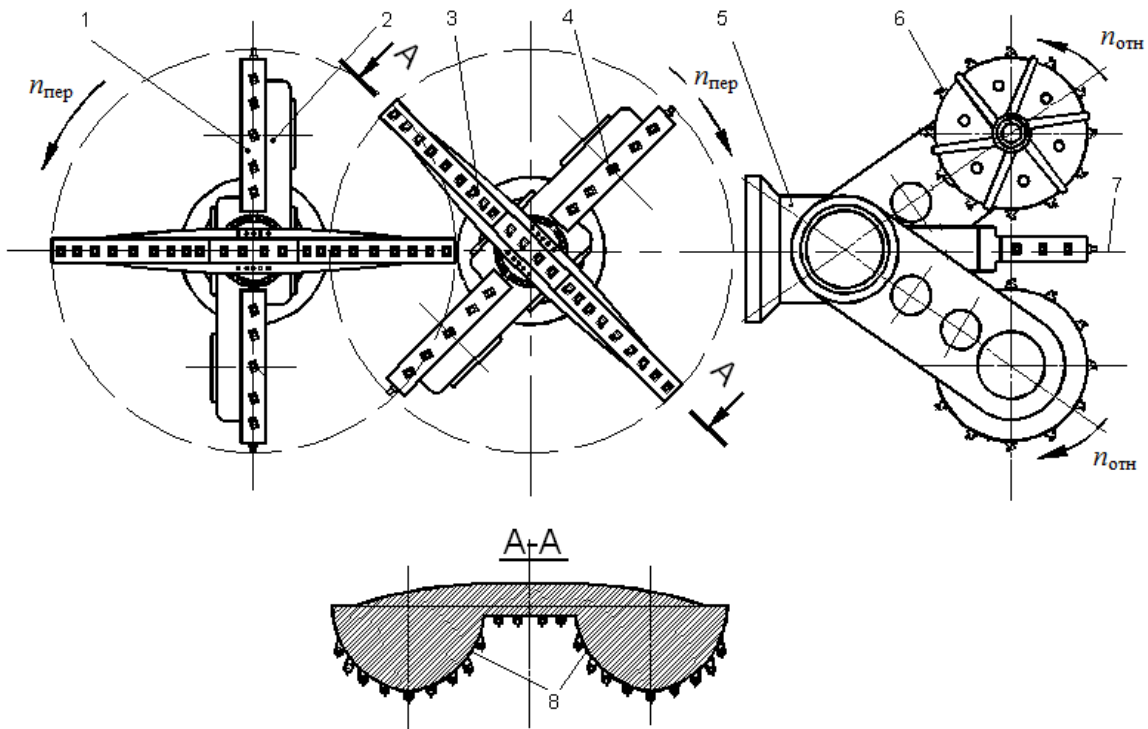


Рисунок 5.5 – Схема комбинированного исполнительного органа, разрушающего калийный массив перекрестными резами

Поверхности ротора выполнены в виде двухлучевой планшайбы. Резцы ротора разрушают массив концентрическими резами *II*, пересекающимися с радиальными резами *I* под углами, близкими к  $90^\circ$  (рисунок 5.6). Глубина концентрических резов, реализуемых резцами ротора, постоянна и рассчитывается по формуле (5.5)

$$h_p = \frac{V_{II} 10^3}{n_{пер} x_p}, \quad (5.5)$$

где  $x_p$  – число резцов в линии резания, шт.

Анализ зависимостей (5.4) и (5.5) показывает, что при равном количестве резцов ротора и дисков  $Z_d = x_p$  выполнение опорной поверхности ротора в виде полуокружностей с диаметром, равным диаметру диска, обусловит разные глубины резов в местах пересечения *III* (см. рисунок 5.6), что определит снижение эффективности процесса разрушения калийного массива перекрестными резами.

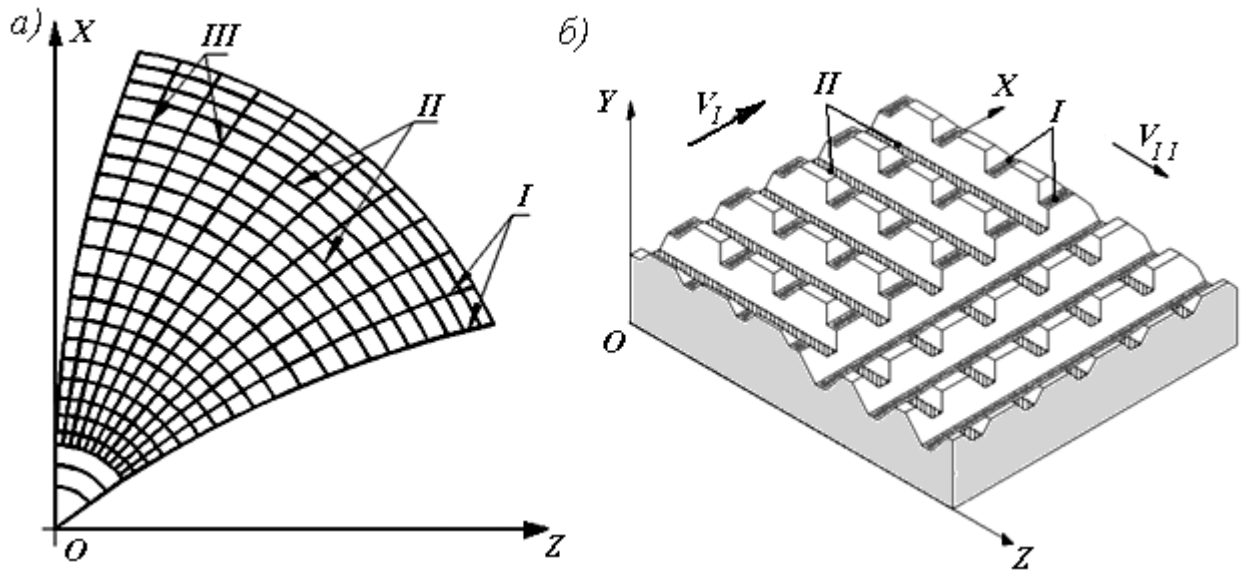


Рисунок 5.6 – Схема резания комбинированного роторно-дискового исполнительного органа: *a* – положение резов на поверхности забоя; *б* – аксонометрическая проекция резов на поверхности забоя; *I* – радиальные резы поворотных дисков; *II* – резы ротора; *III* – пересечения резов;  $V_I$  – направление резов дисков;  $V_{II}$  – направление резов ротора

Равенство глубин резов в местах пересечения *III* обеспечивается при выполнении опорной поверхности ротора со смещением относительно поверхностей дисков на величину  $h_c$ , которая рассчитывается по формуле (5.6)

$$h_c = h_p - h_n = \frac{V_n 10^3}{n_{\text{пер}} Z_p} (1 - \sin \varphi_i). \quad (5.6)$$

Недостатком предложенной конструкции является значительное количество резов, находящихся в контакте с забоем, что определяет необходимость обеспечения значительных напорных усилий на забой при работе комбайна [175]. Для устранения указанного недостатка сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета с участием автора разработана конструкция исполнительного органа, представленная на рисунке 5.7 [96].

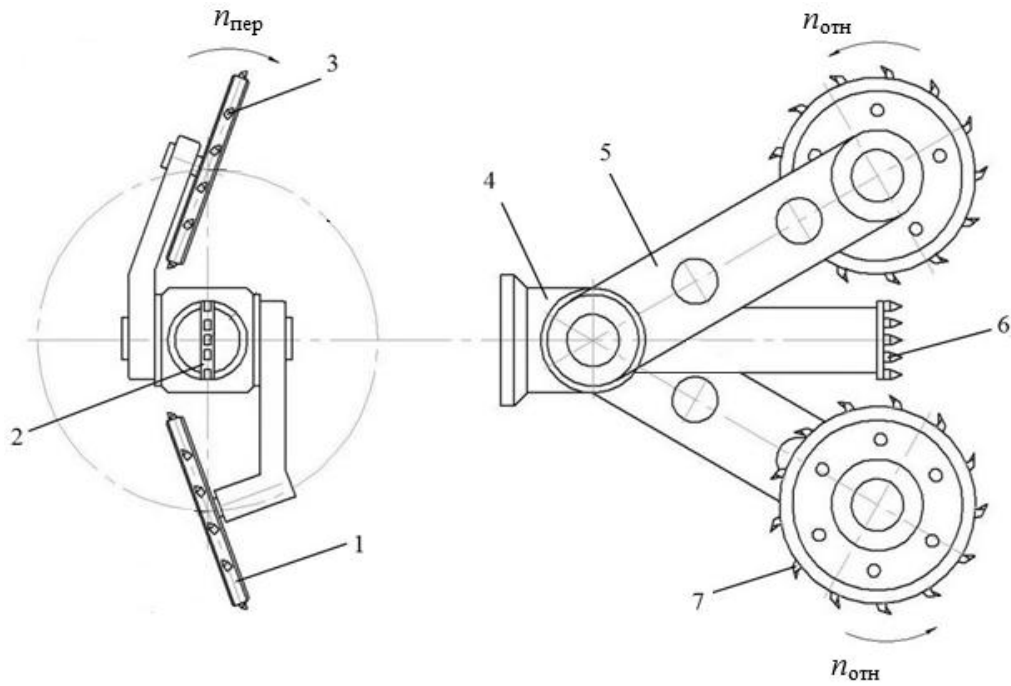


Рисунок 5.7 – Схема планетарно-дискового исполнительного органа с наклоном резовых дисков относительно плоскости симметрии

Конструкция предлагаемого пространственного планетарного исполнительного органа состоит из поворотных дисков *1* и *3* с установленными на них резами *7*. Поворотные диски располагаются под углом к плоскости симметрии *2* и вращаются в противоположные стороны. Резцы поворотного диска *1* разрушают забой последовательными тангенциально-радиальными резами, направленными от периферии к центру забоя. Резцы диска *3* разрушают массив радиально-тангенциальными резами, направленными от центра к периферии забоя. Вращающий момент на диски *1* и *3* передаётся водилом *4* и наклонно установленными раздаточными редукторами *5*. Забурником *6* разрушается центральная часть забоя. Переносное движение и разнонаправленное относительно вращение наклонно установленных поворотных дисков обеспечивают создание на поверхности разрушаемого забоя сетки резов, пересекающихся друг с другом (рисунок 5.8) [175].

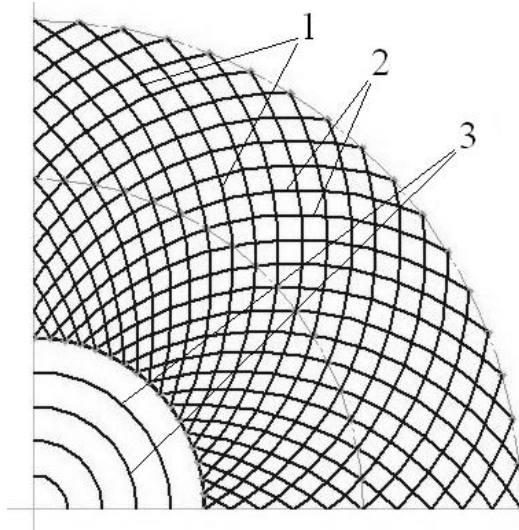


Рисунок 5.8 – Расположение резов при обработке забоя планетарным исполнительным органом с разнонаправленным вращением поворотных дисков:  
 1, 2 – резы, реализуемые поворотными дисками с разнонаправленным вращением;  
 3 – резы забурника

Конструкция и привод исполнительного органа, представленного на рисунке 5.7, незначительно отличаются от исполнительных органов серийно выпускаемых отечественных комбайнов «Урал». Недостатком предлагаемой конструкции является наличие изгибающего момента, действующего на раздаточный редуктор (см. рисунок 5.7, поз. 4) и обуславливающий динамическую неуравновешенность исполнительного органа [19].

Указанный недостаток устранен в конструкции пространственного планетарного четырехдискового исполнительного органа, разработанного с участием автора [99]. Конструкция перспективного исполнительного органа (рисунок 5.9) включает поворотные диски 1-4, установленные на поворотных редукторах 6 и разрушающие забой пересекающимися резами посредством резцов 5. Вращающий момент на поворотные редукторы 6 передается от раздаточного редуктора 7. Диски 1 и 3 разрушают калийный массив резами, направленными от центра к периферии забоя. Относительное вращение резцовых дисков 2 и 4 противоположно вращению дисков 1 и 3. Диски 2 и 4 разрушают массив резами, направленными от периферии к центру забоя.

Известно, что при работе пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов наибольшее количество мелких труднообогатимых

классов руды образуется при разрушении периферийных участков забоя, где массив разрушается блокированными резами малой толщины. Для устранения указанного недостатка в конструкции предлагаемого исполнительного органа предусмотрены гребенки ротора 9 с резами 10, которые устанавливаются на поворотных редукторах 6 и вращаются вокруг оси 8 исполнительного органа.

Таким образом, большая часть забоя разрушается пересекающимися резами, реализуемыми резами 5 поворотных дисков 1-4. При этом разнонаправленное вращение дисков 1, 3 и 2, 4 обуславливает компенсацию изгибающего момента на валу раздаточного редуктора 7.

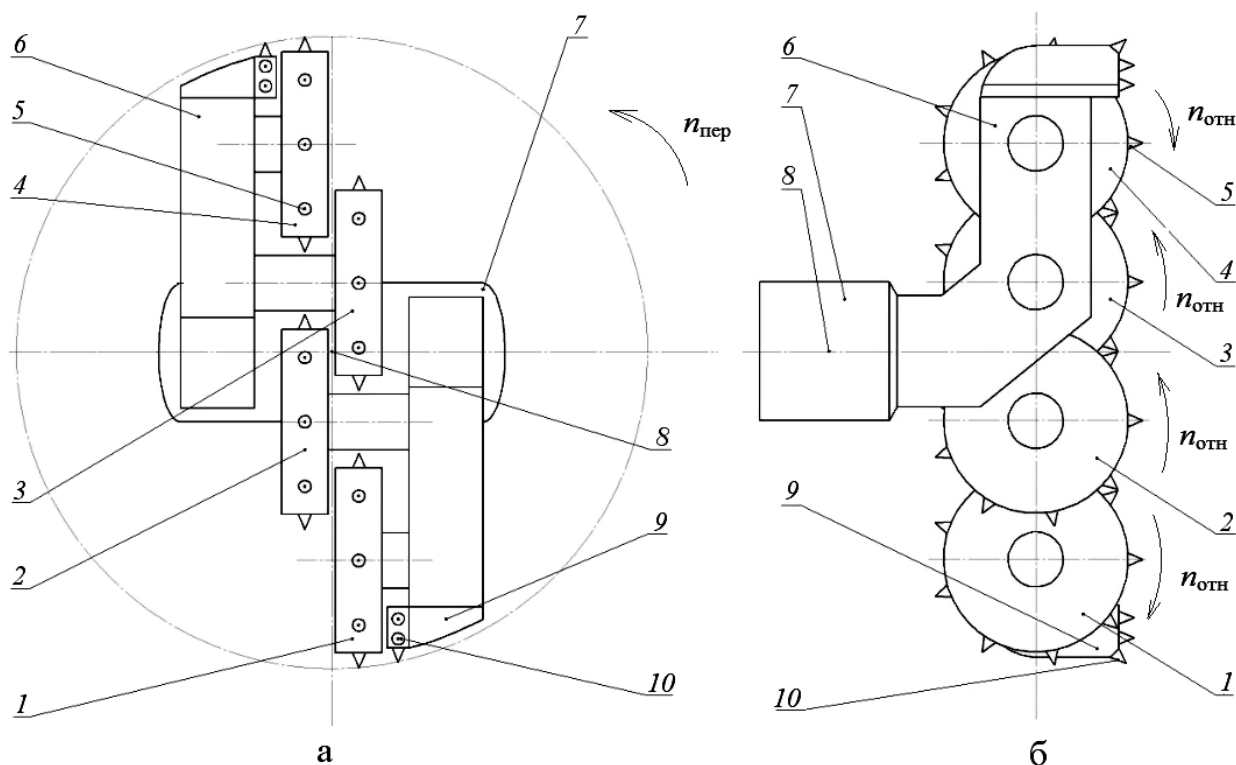


Рисунок 5.9 – Четырехдисковый пространственный планетарный исполнительный орган, реализующий перекрестную схему резания: а – вид спереди; б – вид сбоку

Схема расположения резов на поверхности забоя при разрушении массива предлагаемым исполнительным органом приведена на рисунке 5.10. Пересекающиеся резы 1 и 2, реализуемые резами противоположно вращающихся дисков, создают на поверхности забоя чередующиеся выступы и зоны концентрации наведенных трещин и ослаблений. Концентрические

резы 3 реализуются гребенками ротора, что обеспечивает разрушение периферийных участков массива с рациональными параметрами резания – шагом резания  $t$  и толщиной стружки  $h$  [191].

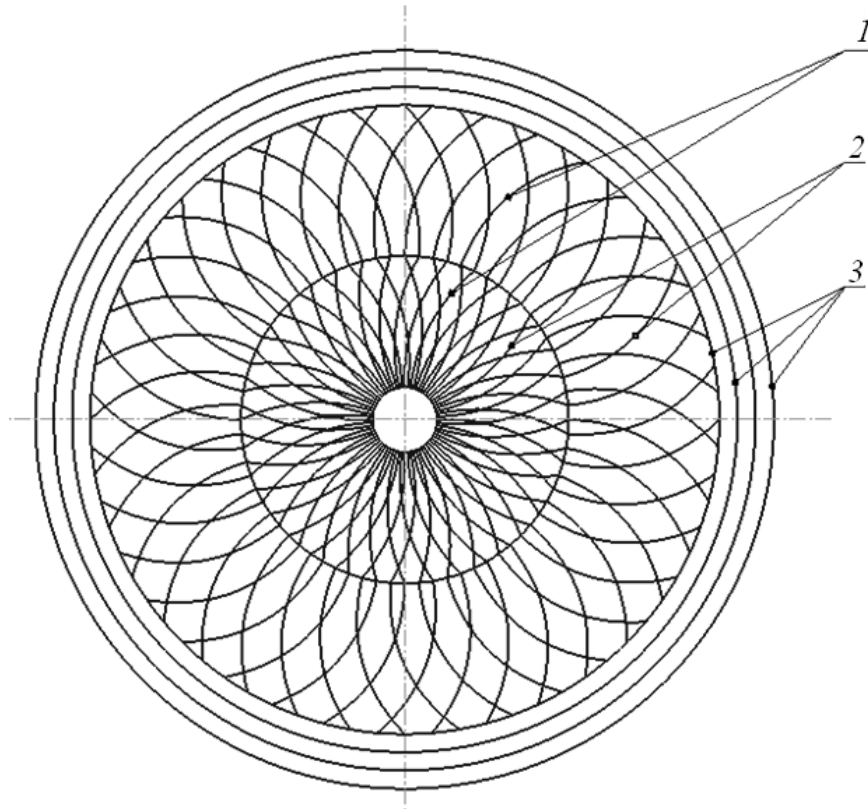


Рисунок 5.10 – Расположение резов на поверхности забоя при разрушении калийного массива четырехдисковым пространственным планетарным исполнительным органом

Предложенные пространственные планетарно-дисковые исполнительные органы, реализующие перекрестную схему разрушения калийного массива, обеспечивают повышение энергоэффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников и уменьшение массовой доли труднообогатимых классов в добываемой руде. За счет снижения нагрузок, в том числе и динамических, увеличивается долговечность приводов и режущего инструмента.

## **5.4 Обоснование параметров плоского планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна для добычи калийных руд**

### **5.4.1 Теоретические основы конструирования плоских планетарно-дисковых исполнительных органов**

Создание на поверхности разрушаемого забоя сетки пересекающихся резцов возможно при использовании плоских планетарно-дисковых исполнительных органов. Исполнительные органы данного типа известны давно и широко применялись в конструкциях механизированных проходческих щитов Л-1 (шестидисковый), 105М, 105К, 105Т (двухдисковые), ПЦМ-5,6 (шестидисковый), «Демаг АГ» (девятидисковый) [16]. Известны экспериментальные образцы проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд, оснащённые плоскими планетарно-дисковыми исполнительными органами, однако серийно данные машины не выпускаются [190].

Обоснование рациональных параметров плоского планетарно-дискового исполнительного органа применительно к конструкции опытного проходческо-очистного комбайна МВ 900 СМ проведено автором в 2019 году в ходе выполнения работ по договору с компанией-производителем «*T-Machinery*» (Чешская республика) [113]. Письмо об использовании результатов работ приведено в приложении 3.

Опытный проходческо-очистной комбайн МВ 900 СМ испытывался на одном из рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Данный комбайн оснащен сдвоенным планетарным исполнительным органом, который состоит из четырёх фрез, осуществляющих относительное и переносное вращение параллельно плоскости забоя (рисунок 5.11).



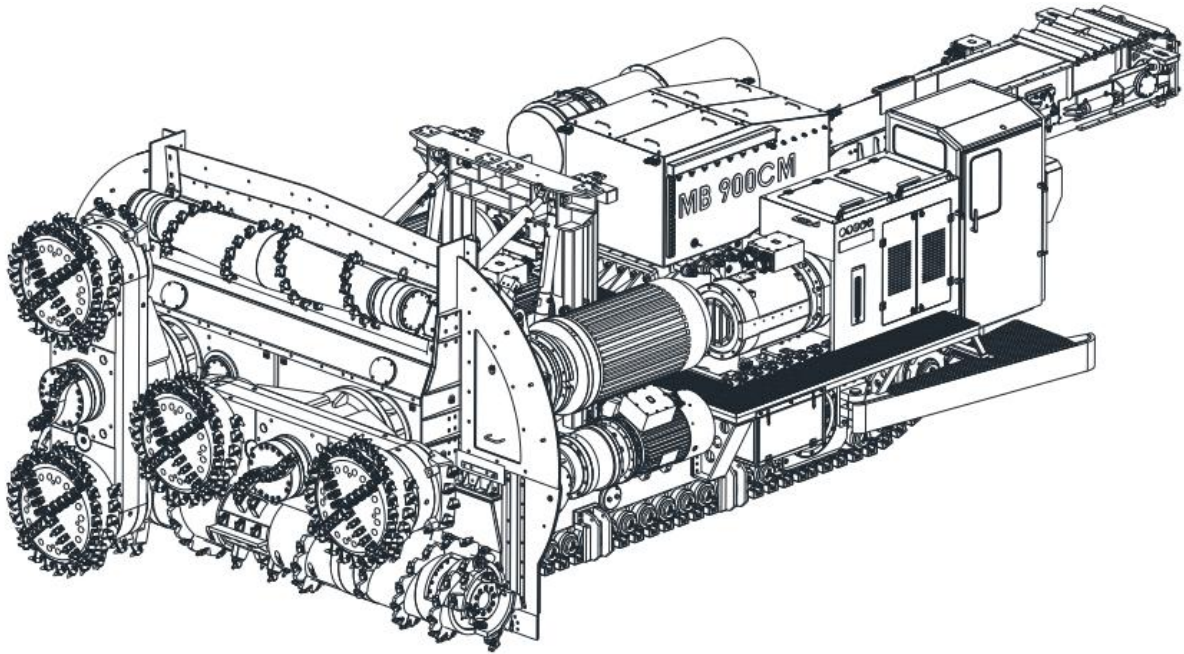


Рисунок 5.11 – Опытный проходческо-очистной комбайн МВ-900СМ

В процессе пуско-наладочных работ была установлена необходимость модернизации исполнительных органов опытного комбайна МВ 900 СМ ввиду невозможности достижения комбайном заявленной номинальной технической производительности без внесения конструктивных изменений. Наиболее существенным выявленным недостатком является нерациональная схема расстановки режцового инструмента на породоразрушающих исполнительных органах.

Кинематика приводов плоских планетарно-дисковых исполнительных органов определяет движение породоразрушающего инструмента в пространстве по сложным криволинейным траекториям. Зависимость положения резца от поворота водила в случаях сонаправленного/разнонаправленного вращения диска и водила (рисунок 5.12) описывается выражениями (5.7) и (5.8) [43, 86]:

$$x = r_{\text{вод}} \cos \varphi_{\text{вод}} + r_{\text{д}} \cos \left( \left( 1 \pm \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{пер}}} \right) \varphi_{\text{вод}} \right); \quad (5.7)$$

$$y = r_{\text{вод}} \sin \varphi_{\text{вод}} + r_{\text{д}} \sin \left( \left( 1 \pm \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{пер}}} \right) \varphi_{\text{вод}} \right), \quad (5.8)$$

где  $r_{\text{д}}$  – радиус диска по резцам, мм;  $r_{\text{вод}}$  – радиус водила, мм;  $\varphi_{\text{вод}}$  – угол поворота водила, рад;  $n_{\text{пер}}$  – частота переносного вращения водила, об/мин;  $n_{\text{отн}}$  – частота относительного вращения резцовых дисков, об/мин.

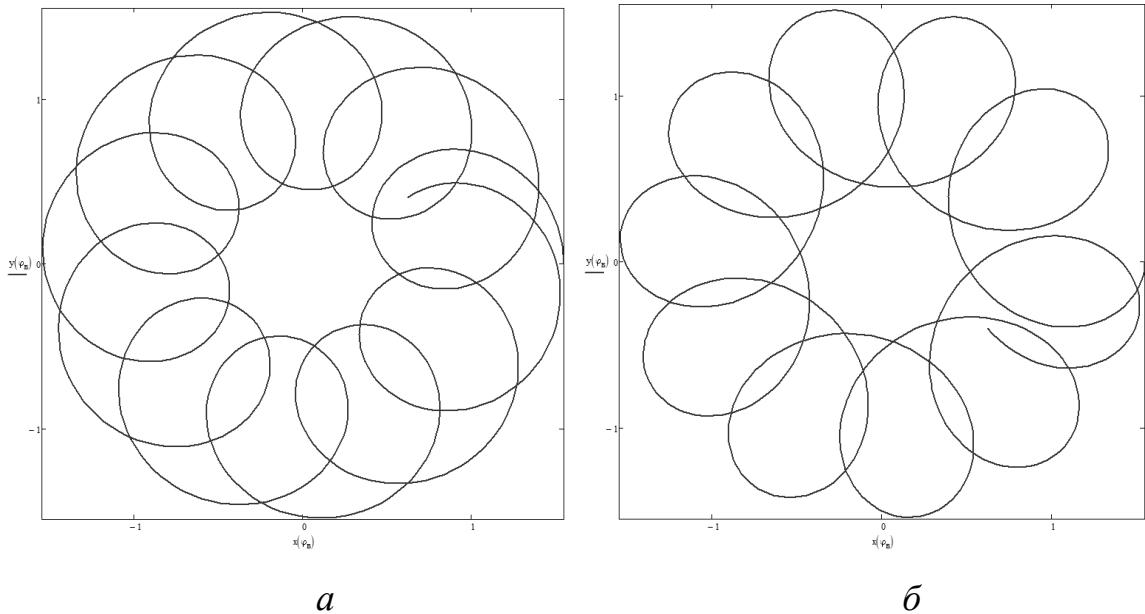


Рисунок 5.12 – Траектории движения резца плоского планетарно-дискового исполнительного органа в случае сонаправленного (а) и разнонаправленного (б) вращения дисков и водила

Абсолютная скорость движения резца плоского планетарно-дискового исполнительного органа (рисунок 5.13) определяется выражением (5.9)

$$V_{\text{р}} = r_{\text{д}} \omega_{\text{вод}} \sqrt{\left( r_{\text{вод}} / r_{\text{д}} \right)^2 + \left( 1 + \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{пер}}} \right)^2 + \frac{2r_{\text{вод}}}{r_{\text{д}}} \left( 1 + \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{пер}}} \right) \cos \varphi_i}, \quad (5.9)$$

где  $V_{\text{р}}$  – скорость резания, м/с;  $\omega_{\text{вод}}$  – угловая скорость вращения водила, рад/с.

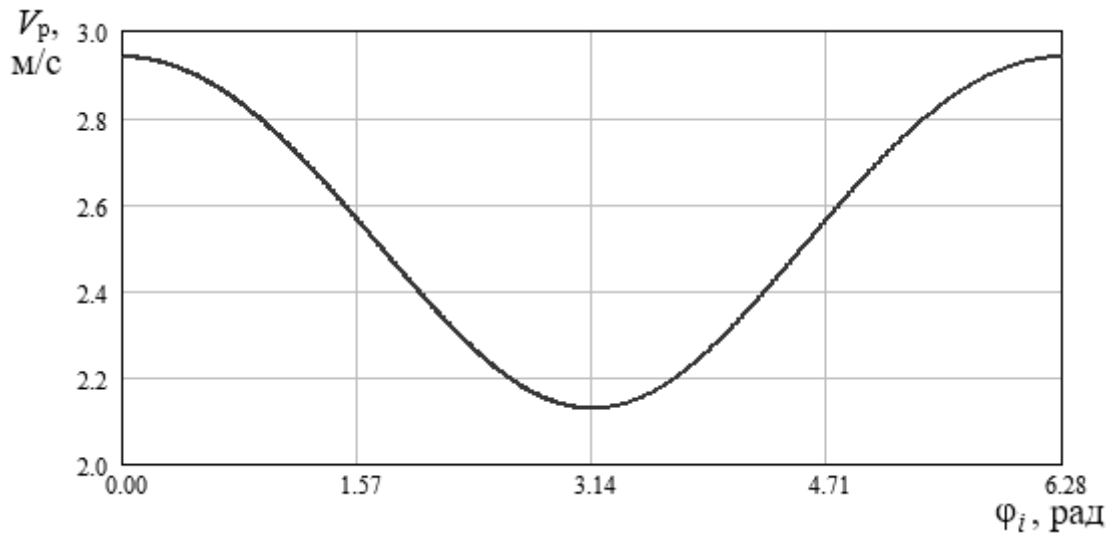


Рисунок 5.13 – Зависимость скорости резания  $V_p$  резца плоского планетарно-дискового исполнительного органа от угла поворота резцового диска  $\phi_i$  (в случае сонаправленного вращения дисков и водила)

Скорость резания  $V_p$  при заданных параметрах исполнительного органа опытного комбайна МВ 900 СМ (радиус диска по резцам  $r_d = 550$  мм; радиус водила  $r_{\text{вод}} = 1000$  мм; частота переносного вращения водила  $n_{\text{пер}} = 3,87$  об/мин; частота относительного вращения резцовых дисков  $n_{\text{отн}} = 40,13$  об/мин) изменяется в диапазоне значений от 2,94 м/с при положении резца на периферии забоя (векторы относительного и переносного движения сонаправлены), до 2,13 м/с при положении резца, ближайшем к оси вращения водила (векторы относительного и переносного движения разнонаправлены). Указанный диапазон соответствует диапазону рациональных значений скорости резания калийной руды  $V_{p,\text{рац.}} = 2 \dots 5$  м/с [8, 71, 73].

Величина шага резания  $t$  плоского планетарно-дискового исполнительного органа (рисунок 5.14) зависит от соотношения частот относительного и переносного вращения резцового диска, числа режущих инструментов на нем, конструктивных параметров исполнительного органа и изменяется в зависимости от угла поворота диска. Зависимость шага резания  $t$  от угла поворота резцового диска  $\phi_i$  описывается выражением (5.10)

$$t = \left| \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi n_{\text{пер}}}{n_{\text{отн}} Z_p}\right) \frac{r_{\text{вод}} n_{\text{отн}} \sin \varphi_i}{n_{\text{пер}} \sqrt{\left(r_{\text{вод}} / r_{\text{д}}\right)^2 + \left(1 + \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{пер}}}\right)^2 + \frac{2r_{\text{вод}}}{r_{\text{д}}}\left(1 + \frac{n_{\text{отн}}}{n_{\text{пер}}}\right) \cos \varphi_i}}}{\right|}, \quad (5.10)$$

где  $t$  – шаг резания, мм; где  $Z_p$  – количество резцов на одном диске, шт.

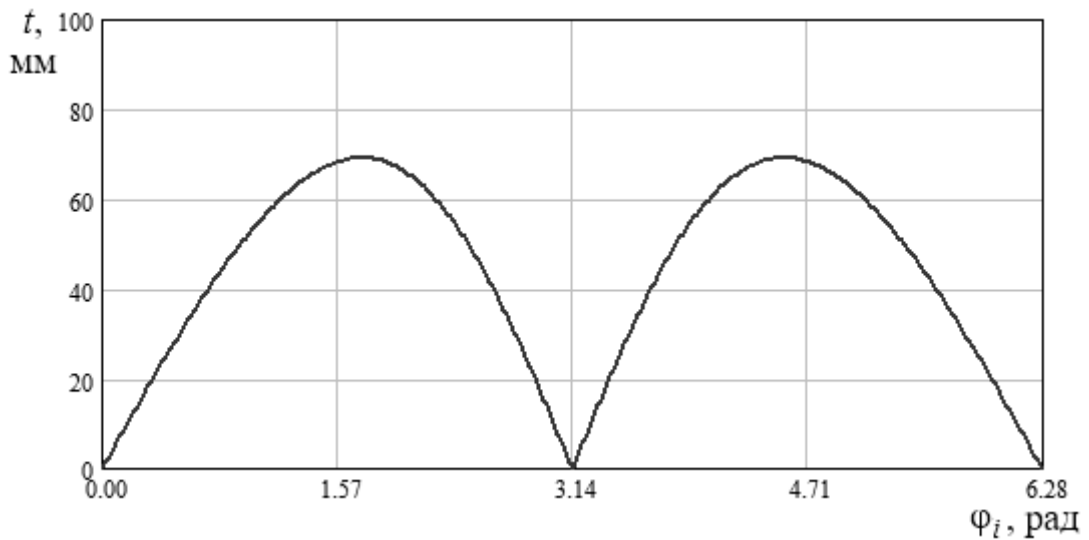


Рисунок 5.14 – Зависимость шага резания  $t$  плоского планетарно-дискового исполнительного органа от угла поворота резцового диска  $\varphi_i$  (в случае сонаправленного вращения дисков и водила)

При повороте диска на угол от  $0$  до  $180^\circ$  ( $\pi$ ) резец находится на «передней» его части, шаг резания  $t$  возрастает с нулевого значения при положении резца на периферии забоя до максимального значения  $t_{\text{max}}$ , затем снижается, принимая нулевое значение при положении резца, ближайшем к оси вращения водила. При повороте диска на угол от  $180$  до  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) резец находится на «задней» части, шаг резания  $t$  возрастает с нулевого значения при положении резца, ближайшем к оси вращения водила, до максимального значения  $t_{\text{max}}$ , затем снижается, принимая нулевое значение при положении резца на периферии забоя.

Глубина резания плоского планетарно-дискового исполнительного органа (рисунок 5.15) определяется выражениями (5.11) и (5.12)

$$h_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}} \left( 0,5\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{r_{\text{д}} \sin \varphi_i}{r_{\text{вод}} + r_{\text{д}} \cos \varphi_i} \right| \right)}{\pi n_{\text{пер}}}; \quad (5.11)$$

$$h_{\text{зад}} = \frac{V_{\text{п}} \operatorname{arctg} \left| \frac{r_{\text{д}} \sin \varphi_i}{r_{\text{вод}} + r_{\text{д}} \cos \varphi_i} \right|}{\pi n_{\text{пер}}}, \quad (5.12)$$

где  $h_{\text{п}}$  – глубина резания резцом, находящимся на «передней» части диска, мм;  $h_{\text{зад}}$  – глубина резания резцом, находящимся на «задней» части диска, мм.

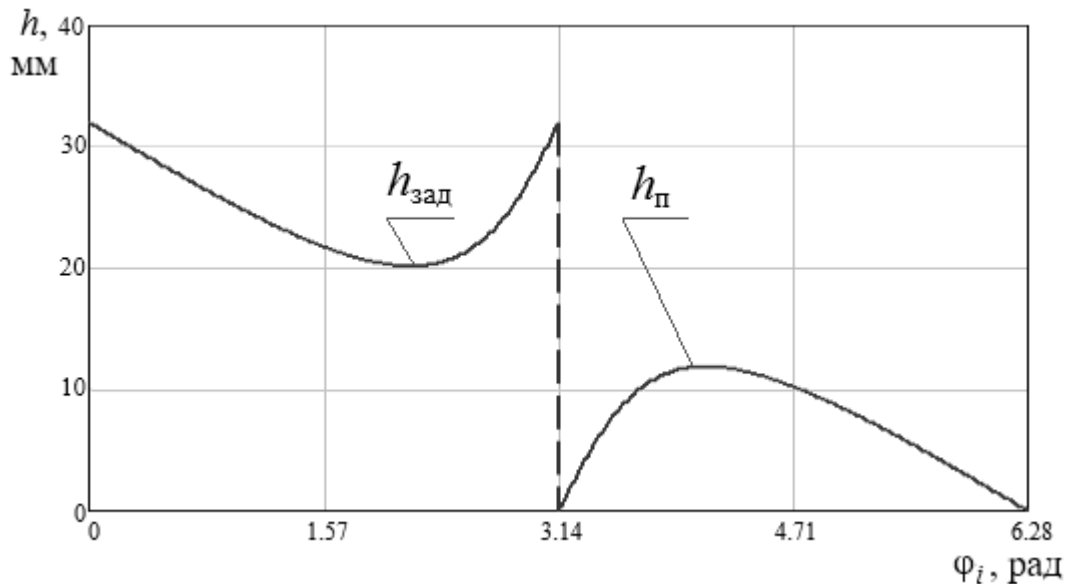


Рисунок 5.15 – Зависимость глубины резания  $h$  плоского планетарно-дискового исполнительного органа от угла поворота резцового диска  $\varphi_i$  (в случае сонаправленного вращения дисков и водила)

Анализ полученных графиков (см. рисунки 5.14 и 5.15) показывает, что на периферийных участках забоя, обрабатываемых резцами дисков плоского планетарного исполнительного органа, резы имеют малый шаг, что обуславливает, несмотря на значительную толщину стружки, переизмельчение руды и повышенное пылеобразование [113].

Резы «задней» части диска (поворот резцового диска от  $\pi$  до  $2\pi$ ) имеют малую глубину, что снижает эффективность перекрестного резания.

С целью обеспечения высокой эффективности схемы перекрестного резания, реализуемой плоскими планетарно-дисковыми исполнительными органами, отношение  $n_{\text{отн}}/n_{\text{пер}}$  должно быть подобрано таким образом, чтобы не являться целым числом. В противном случае резы обоих дисков каждого из планетарных органов комбайна будут совпадать на забое, идти след в след, что обусловит разрушение калийного массива резами с повышенными удельными затратами энергии и высоким выходом мелких труднообогатимых классов руды. Кроме того, разрушение забоя резами, идущими след в след, сопровождается значительными усилиями, действующими на исполнительные органы со стороны забоя, преодоление которых требует создания больших напорных усилий гусеничными органами перемещения.

#### **5.4.2 Обоснование конструкции и параметров плоского планетарно-дискового исполнительного органа комбайна для добычи калийных руд**

Анализ данных о традиционных конструкциях плоских планетарно-дисковых органов позволяет определить их наиболее существенные недостатки:

- во время производительной работы комбайна в призабойном пространстве происходит интенсивное измельчение отделенной от массива руды вследствие контакта с движущимися резцовыми дисками;

- периферийные участки забоя разрушаются резами малой толщины, что обуславливает увеличение массовой доли труднообогатимых классов в добываемой руде;

- для осуществления поворота комбайна при его производительной работе или зарубке требуется установка кутковых резцов, что негативно влияет на качество добываемой руды; другим распространенным вариантом конструкции является установка фронтальных резцов с наклоном, что

уменьшает величину радиального вылета резца и ограничивает производительность комбайна;

– исполнительные органы не снабжены эффективными механическими приспособлениями для предотвращения перегрузок, например, срезными штифтами, шпонками и т.п.;

– фронтальные резцы, установленные на торцевых поверхностях резцовых дисков, находятся в постоянном контакте с забоем и нагреваются при работе вследствие отсутствия охлаждения, что в сочетании с криволинейной траекторией движения резцов и наличием существенных боковых нагрузок определяет высокий удельный расход резцов;

– при отгонке комбайна по выработке задним ходом от отработываемого забоя возможен контакт резцовых дисков со стенками, почвой и кровлей проведенной выработки, что с высокой вероятностью может привести к аварийному отказу, например, отделению кулака-резцедержателя от резцового диска.

Указанные недостатки устранены в конструкции плоского планетарно-дискового исполнительного органа, предложенного автором (рисунки 5.16 и 5.17). Исполнительный орган проходческо-очистного комбайна состоит из резцовых дисков 1 с резцами 2, установленных на рукоятях 3 со смещением от центральных осей 4 рукоятей 3 в сторону, противоположную направлению переносного вращения исполнительного органа. Вращающий момент на резцовые диски 1 передаётся от приводного двигателя (не показан на схемах) через раздаточный редуктор 5 и рукояти 3. Центральная часть забоя разрушается роторным забурником 6 с резцами 7. Периферийные участки забоя разрушаются гребёнками 8 с установленными резцами 9. Гребёнки 8 монтируются на рукоятях 3 на крепежах 10 с возможностью демонтажа или изменения положения. Гребёнки 8 выполнены в виде подгребающих лопаток с наклоном в сторону, противоположную вращению исполнительного органа. Крепежи 10 рассчитываются на определённую величину нагрузок и разрушаются при возникновении перегрузок. В вариантах исполнения

устройства целостность крепежей *10* и положение гребёнок *8* относительно узлов исполнительного органа может контролироваться посредством датчиков.

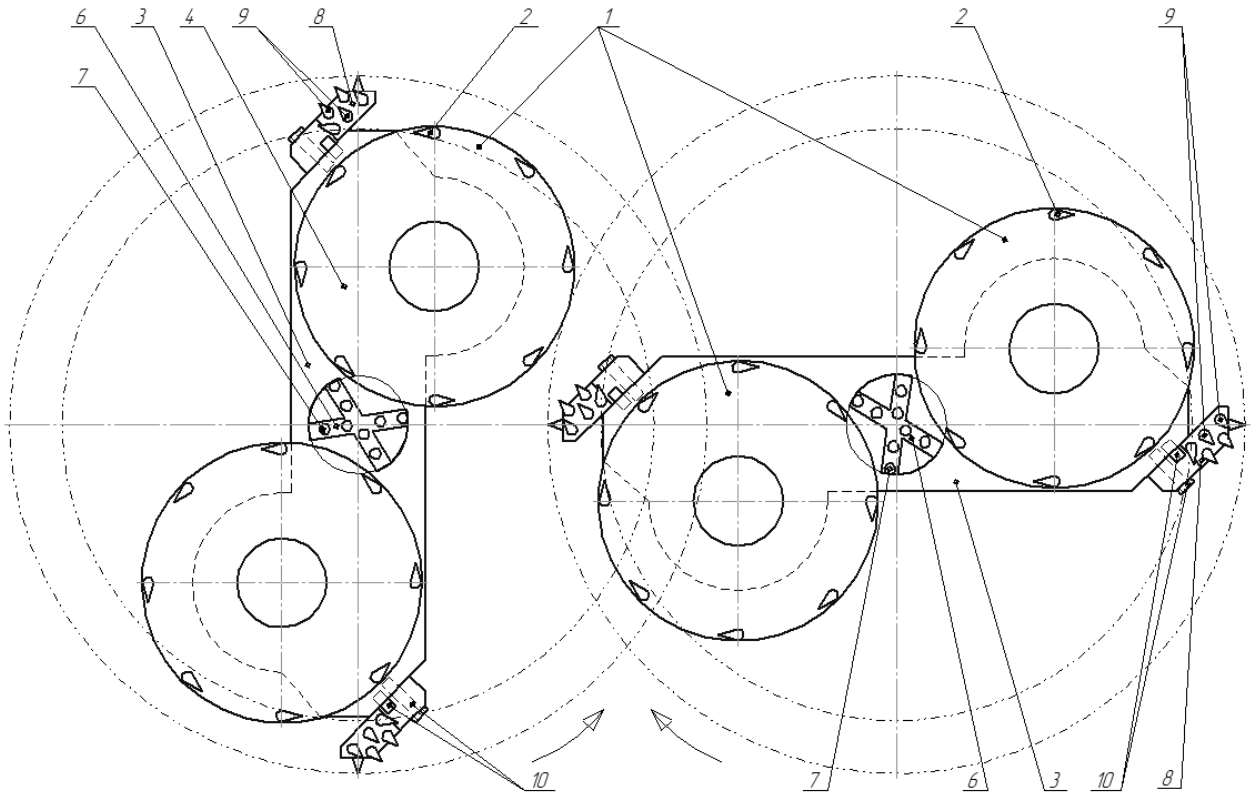


Рисунок 5.16 – Принципиальная схема перспективного плоского планетарно-дискового исполнительного органа (фронтальная проекция)

Работа устройства осуществляется следующим образом. Установленный на проходческо-очистной комбайн исполнительный орган подаётся на забой. Резцы *7* забурников *6* и резцы *9* гребёнок *8* осуществляют зарубку в массив и разрушение центральных и периферийных участков забоя концентрическими резами. Резцы *2* резцовых дисков *1* входят в контакт с массивом позже резцов *7* и *9*. Резцы *2* движутся по сложным циклоидным траекториям и разрушают забой пересекающимися резами радиально-тангенциального направления. Разрушение забоя пересекающимися резами обеспечивает снижение измельчения добываемой горной массы на этапе отделения от массива.



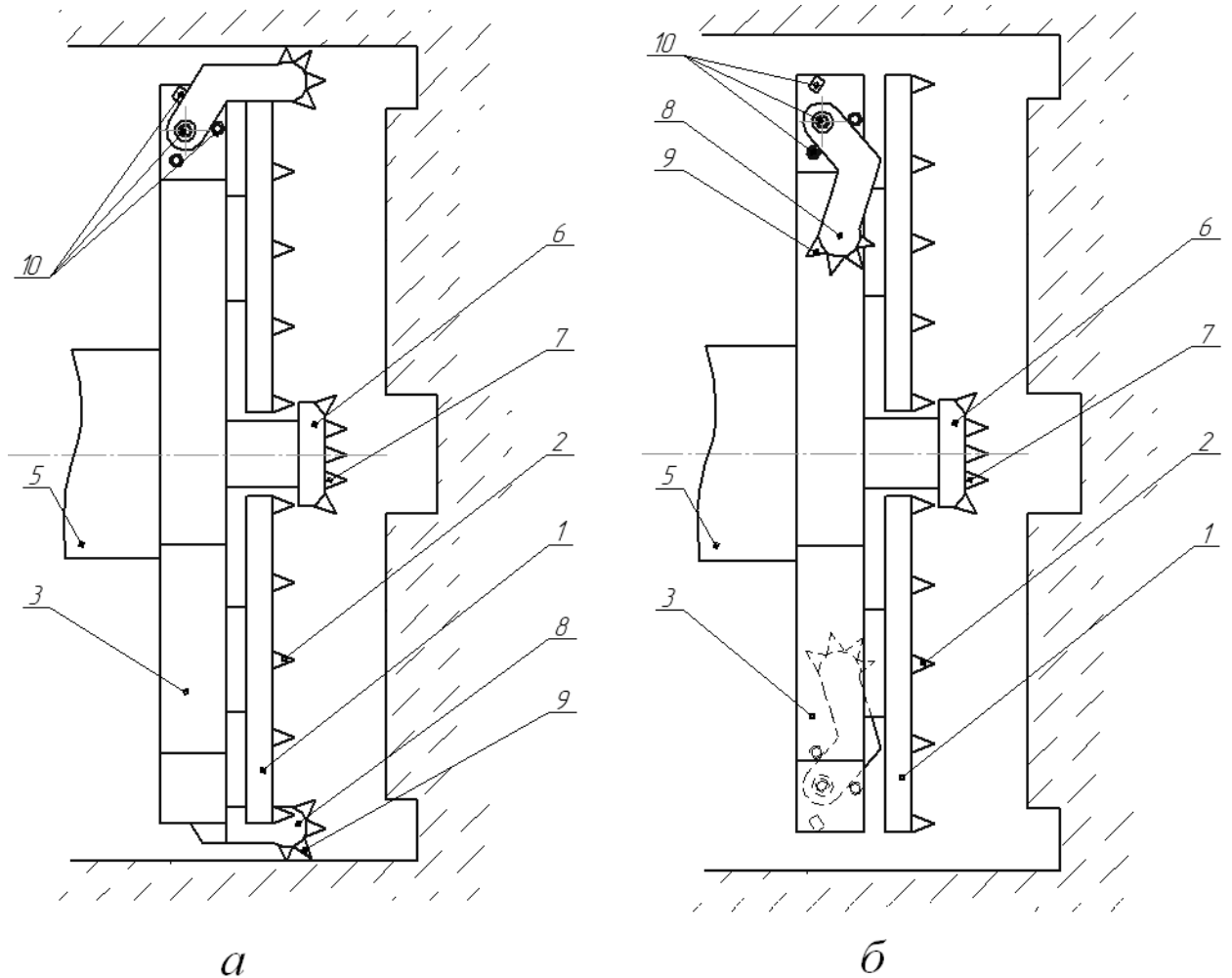


Рисунок 5.17 – Принципиальная схема перспективного плоского планетарно-дискового исполнительного органа (боковая проекция): *а* – рабочее положение гребёнок ротора; *б* – транспортное положение гребёнок ротора при отгонке комбайна из выработки

На периферийных и центральных участках забоя резцы 2 выходят из контакта с массивом и охлаждаются. Таким образом обеспечивается улучшение условий работы резцов и уменьшение их удельного расхода.

Отделённая от массива горная масса поступает в призабойное пространство, откуда подаётся гребёнками 8 на погрузочные органы проходческо-очистного комбайна. Таким образом минимизируется вероятность контакта вращающихся резцовых дисков 1 с горной массой, что снижает её измельчение на этапе погрузки.

В случае возникновения перегрузок крепежи 10 гребёнок 8 разрушаются, работа исполнительного органа прекращается. Целостность

крепей *10* и положение гребёнок *8* относительно узлов исполнительного органа могут контролироваться посредством датчиков (не показаны на схемах), информация от которых может являться сигналом для своевременного прекращения работы исполнительного органа. Таким образом минимизируется вероятность возникновения аварийных отказов при работе исполнительного органа вследствие появления сверхнормативных нагрузок локального характера.

При отгонке комбайна от забоя крепежи *10* отсоединяются, гребёнки *8* демонтируются или переводятся в транспортное положение (см. рисунок 5.17, б), что минимизирует вероятность контакта элементов исполнительного органа с почвой и стенками выработки при движении комбайна задним ходом. Схема расположения резов на поверхности забоя, разрушаемого предлагаемым исполнительным органом, приведена на рисунке 5.18.

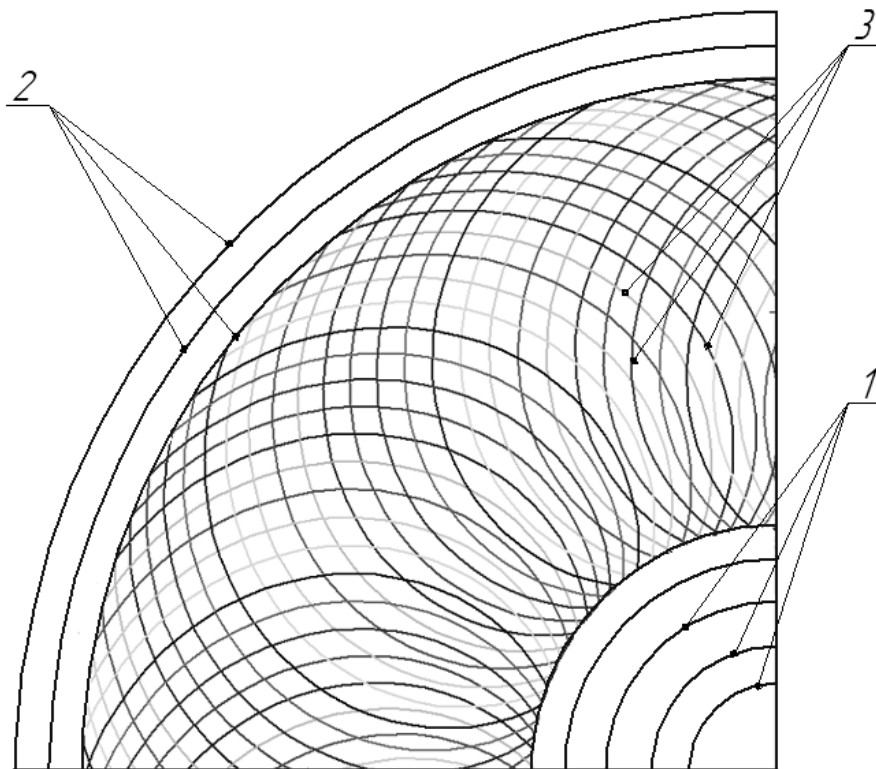


Рисунок 5.18 – Схема резов на поверхности забоя при работе предлагаемого исполнительного органа: *1* – резы забурника; *2* – резы гребенок; *3* – резы дисков

Таким образом, при работе предложенного исполнительного органа обеспечивается: повышение качества гранулометрического состава добываемой калийной руды на этапах отделения от забоя и погрузки, увеличение наработки и снижение удельного расхода породоразрушающего инструмента, уменьшение вероятности возникновения аварийных отказов, вызванных сверхнормативными локальными нагрузками при производительной работе и отводе исполнительного органа от забоя. На предложенную конструкцию планетарно-дискового исполнительного органа получен патент [104].

Некоторые параметры исполнительного органа опытного проходческо-очистного комбайна МВ 900СМ приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные параметры планетарно-дискового исполнительного органа опытного комбайна МВ 900СМ

Наименование основных параметров	Значение
Техническая производительность при сопротивляемости пород резанию $A_p=450$ Н/мм, т/мин, не менее	8
Площадь сечения забоя, м <sup>2</sup>	15,6
Высота проводимой выработки, м	3,1
Количество резцовых дисков, шт.	4
Диаметр диска по резцам, мм	1100
Частота относительного вращения резцовых дисков, об/мин	40,13
Частота переносного вращения резцовых дисков, об/мин	3,87
Тип резца	РС-14

Согласно зависимостям (5.6)-(5.11), при установке на каждом резцовом диске 8 резцов, средний шаг перекрестных резов  $t_{cp} = 44$  мм. Средняя толщина стружки при производительности комбайна  $Q = 8$  т/мин для передней части диска  $h_{п.ср} = 25$  мм; для задней части диска  $h_{зад.ср} = 7,4$  мм [113].

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что при работе плоских планетарно-дисковых исполнительных органов значительное изменение значений шага резания наблюдается только на центральном и периферийном участках забоя. Большая часть забоя отрабатывается резами с

мало изменяющимся шагом, что является благоприятным фактором по сравнению с используемыми в настоящее время пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами.

## **5.5 Совершенствование резцового инструмента проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд**

### **5.5.1 Разработка самоустанавливающихся резцов**

Как указывалось в подразделе 1.3.2, работа планетарно-дисковых исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов характеризуется реализацией резов с криволинейными траекториями, что обуславливает контакт боковых поверхностей резцов с разрушаемым забоем [73, 177, 176]. Указанное обуславливает увеличение нагруженности резцового инструмента и снижение энергоэффективности процесса резания вследствие дробления руды боковыми поверхностями резцов, увеличение удельного расхода резцов и времени простоя добычных машин, связанного с необходимостью замены резцового инструмента.

Устранение перечисленных недостатков и факторов, негативно влияющих на энергоэффективность процесса разрушения калийной руды, возможно посредством использования самоустанавливающихся породоразрушающих инструментов, конструкции которых обеспечивают автоматический поворот резца в направлении траектории линии резания [151].

С участием автора разработано устройство для крепления резца на поворотных дисках планетарных исполнительных органов горных комбайнов (рисунок 5.19), состоящее из корпуса-резцедержателя 1 со сквозным отверстием 2 под резец 3. Корпус-резцедержатель 1 выполнен с отверстием 5, в которое запрессовывается втулка 8, имеет возможность поворота относительно оси 9 и опирается на буртик 10. Отверстие 5 защищено от попадания кусков руды заглушкой 4. Также в корпусе-резцедержателе 1

имеются пазы 13, а ось 9 выполнена с проточкой б под пружинную чеку-фиксатор 7. Буртик 10 крепится к исполнительному органу 11 комбайна сваркой таким образом, что между корпусом-резцедержателем 1 и исполнительным органом 11 комбайна формируется зазор 12.

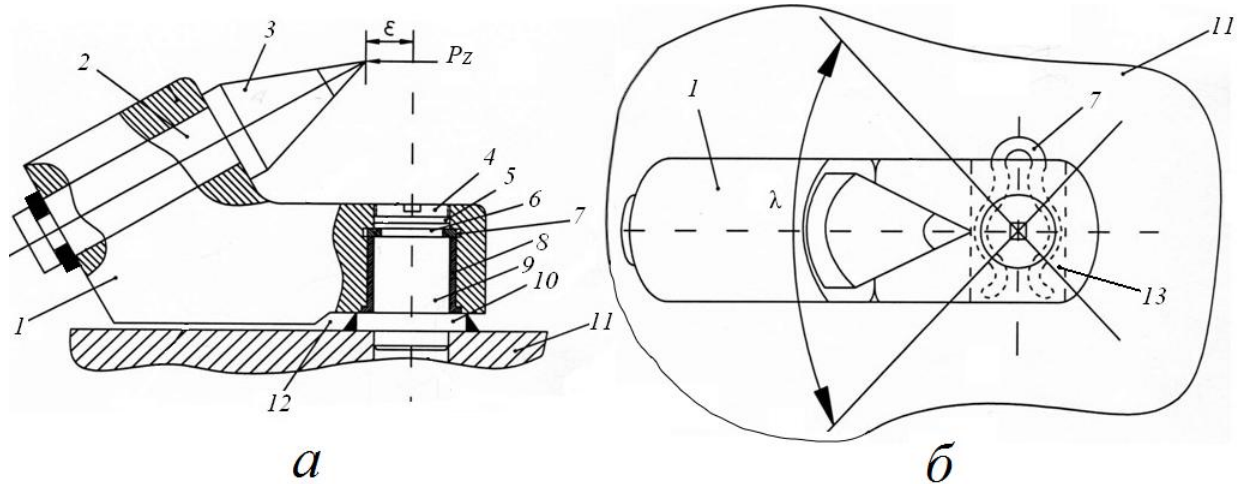


Рисунок 5.19 – Схема устройства для крепления тангенциального резца на исполнительном органе горного комбайна: а – вид сбоку; б – вид сверху

Режущая кромка резца 3 смещена относительно центральной линии оси 9 на величину эксцентриситета  $\epsilon$ . В процессе резания корпус-резцедержатель 1 имеет возможность поворота относительно оси 9 на угол  $\lambda$  для автоматической самоустановки резца 3 по направлению линии резания.

Устройство работает следующим образом (рисунок 5.20). При подаче исполнительного органа на забой корпус резцедержателя зафиксирован в первоначальном положении I чекой-фиксатором на оси «O–O'». Вектор скорости подачи исполнительного органа обозначен  $\Pi$ , а вектор абсолютной скорости движения резца  $\Pi'$ . Вследствие наличия эксцентриситета  $\epsilon$  между режущей кромкой резца и осью резцедержателя при контакте с забоем на резцедержатель начинает действовать вращающий момент, равный  $M_{\Pi} = lP_z$ , что обуславливает поворот резцедержателя на угол  $\lambda$  в положение II вдоль действия силу резания  $P_z$  по направлению абсолютной скорости движения резца  $\Pi'$ . При выходе резца из контакта с забоем корпус-резцедержатель под действием пружинной чеки-фиксатора возвращается в исходное положение.

Таким образом, в процессе разрушения калийного массива резами с криволинейными траекториями обеспечивается автоматическая самоустановка резцов и минимизируются боковые нагрузки на породоразрушающий инструмент.

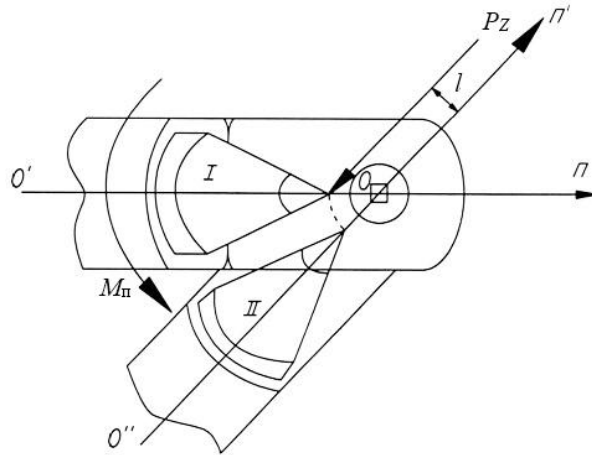


Рисунок 5.20 – Схема функционирования устройства для крепления и автоматической самоустановки резца

Предлагаемое устройство может быть использовано для крепления тангенциальных (см. рисунок 5.19) и тангенциальных (рисунок 5.21) резцов на исполнительных органах горных комбайнов [97].

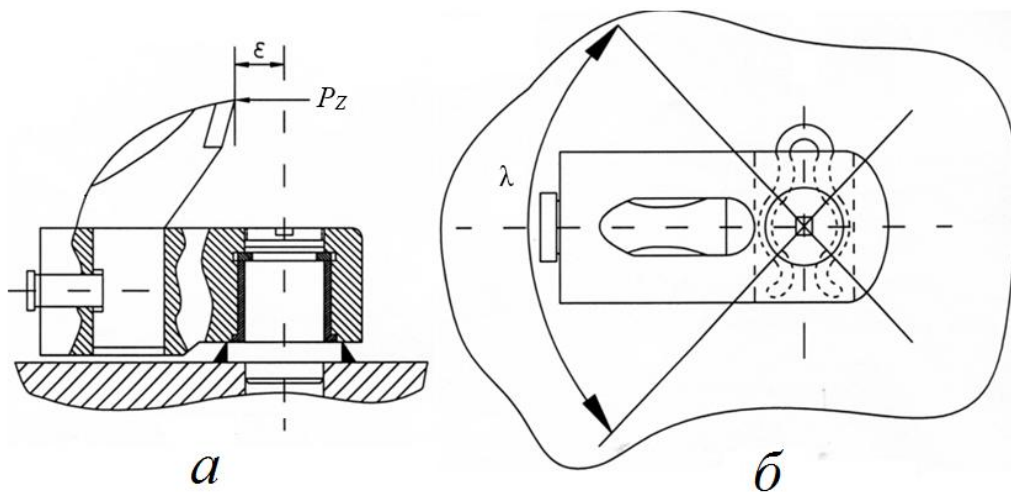


Рисунок 5.21 – Схема устройства для крепления радиального резца на исполнительном органе горного комбайна: а – вид сбоку; б – вид сверху

Упрощение конструкции и повышение надежности описанного выше устройства возможны посредством использования разработанного с участием автора самоустанавливающегося резца (рисунок 5.22) [101].

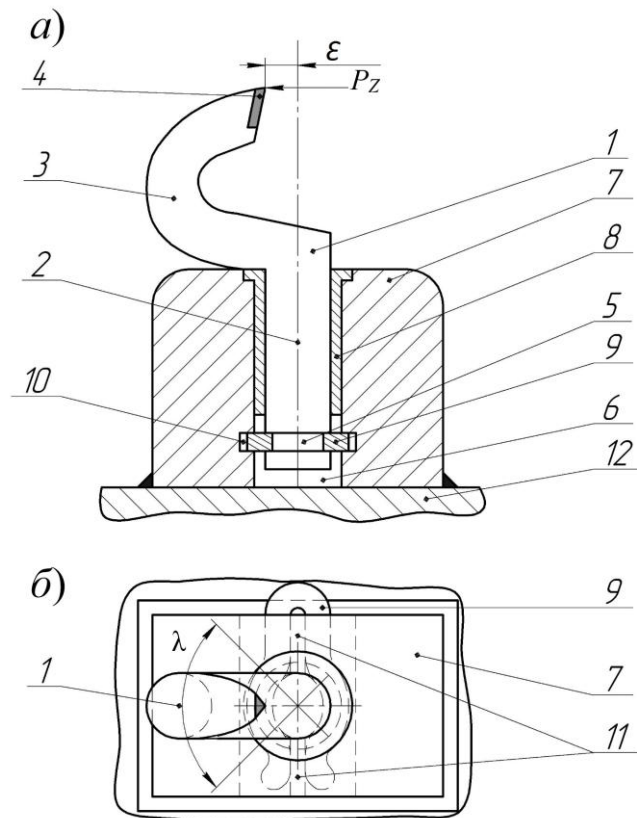


Рисунок 5.22 – Самоустанавливающийся резец, размещенный в резцедержателе на исполнительном органе горного комбайна: *а* – вид сбоку; *б* – вид сверху

Конструкция устройства включает резец *1* с цилиндрическим хвостовиком *2*, головной частью *3* и режущей кромкой *4*. В хвостовике *2* выполнена круговая проточка *5* под чеку-фиксатор *9*. Резец *1* вставлен в сквозное отверстие *6* резцедержателя *7* через запрессованную подшипниковую втулку *8*, выполненную из антифрикционного материала. При этом режущая кромка *4* головной части резца смещена на величину эксцентриситета  $\varepsilon$  от центральной линии отверстия *6*. Чека-фиксатор *9* вставляется в пазы *10* резцедержателя *7* поверх межпазовой перегородки *11* и закрепляет резец *1* за круговую проточку *5* хвостовика *2* с возможностью поворота в резцедержателе *7*.

Резцедержатель *7* жестко закреплен на исполнительном органе *12* горного комбайна сваркой.

Принцип работы устройства аналогичен описанному выше, с той разницей, что установка резца вдоль линии резания происходит посредством поворота самого резца, а не резцедержателя.

Использование предложенных автором устройств обеспечивает минимизацию воздействия неуравновешенных боковых нагрузок на головную часть резца, а также снижение интенсивности дробления руды боковыми поверхностями резцов, что определяет повышение энергоэффективности процесса разрушения калийного массива и уменьшение массовой доли мелких труднообогатимых классов в добываемой руде.

### **5.5.2 Разработка составного резца со сменной головной частью**

Известно, что в процессе эксплуатации резцов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников твердосплавные вставки и головные части резцов подвергаются значительному износу, что обуславливает их выход из строя. Интенсивному износу резцов способствуют неблагоприятные условия охлаждения. Так, например, резцы роторных и плоских планетарно-дисковых исполнительных органов при работе комбайнов находятся в непрерывном контакте с забоем и не охлаждаются, что обуславливает ускоренный расход ресурса головных частей породоразрушающих инструментов. В то же время державки резцов остаются практически неизношенными. Замена всего резца целиком является экономически нерациональной операцией в связи с высокой стоимостью металла – закаленной легированной стали.

Автором разработана конструкция составного резца со сменной головной частью (рисунок 5.23).

Составной резец с устройством крепления на исполнительном органе машины включает в себя сменную рабочую головку 1 и державку 2. Рабочая головка выполнена в форме тетраэдра, каждая вершина которого имеет армирующую твердосплавную вставку 3. В каждой из граней сменной рабочей головки выполнены глухие отверстия 4 под разъемные соединения,



например резьбовые. Державка 2 устанавливается в одно из отверстий 4, в остальные отверстия устанавливаются заглушки 5, например резьбовые пробки. При этом резьбы, выполненные на передней части державки 2 и заглушках 5, должны быть одинаковы.

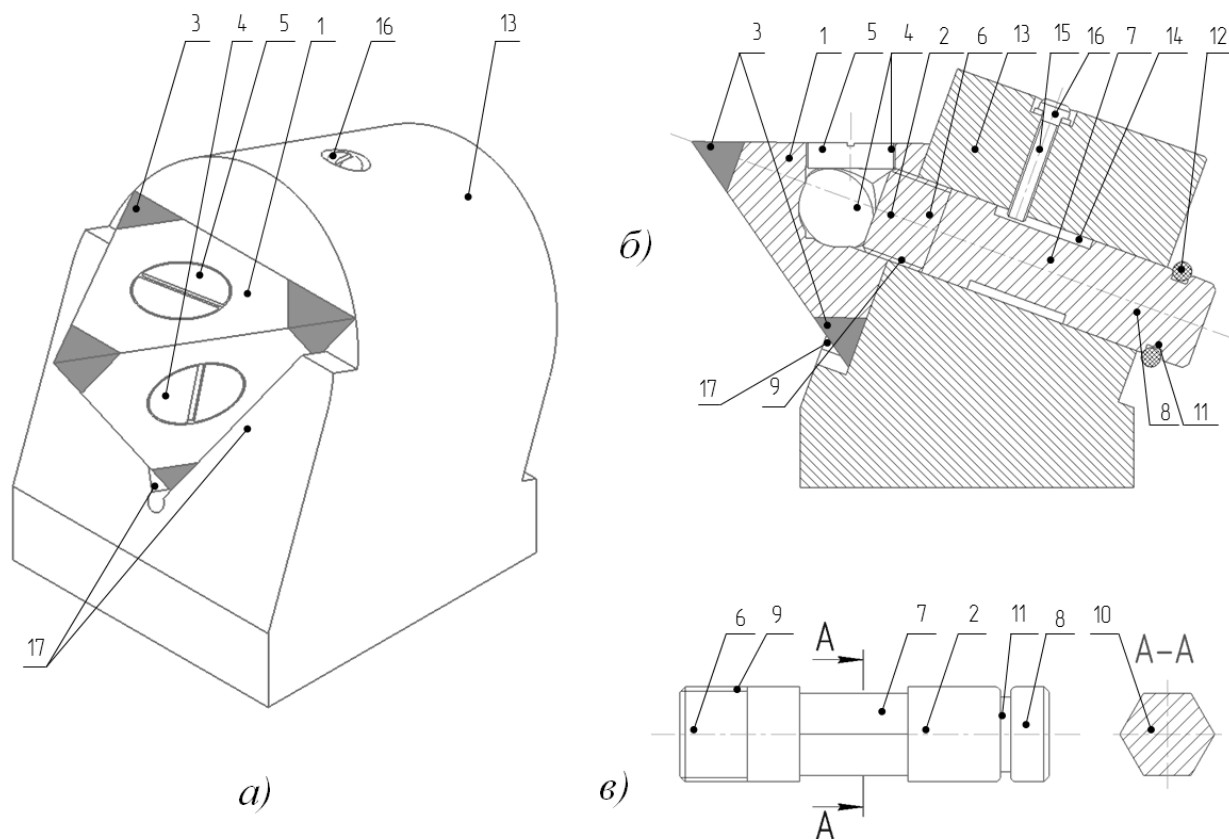


Рисунок 5.23 – Составной резец:

*а* – аксонометрическая проекция; *б* – боковой разрез; *в* – державка

Державка 2 (см. рисунок 5.15, *в*) представляет собой цилиндрическое тело ступенчатой формы с тремя участками: передним 6, промежуточным 7 и хвостовым 8. На переднем участке 6 державки 2 выполнен крепеж разъемного соединения 9, например резьба. Промежуточный участок 7 державки 2 имеет в сечении многоугольник 10. Хвостовой участок 8 державки 2 снабжен проточкой 11 для установки стопорного кольца 12.

Резцедержатель 13 жестко крепится на исполнительном органе машины (не показан на рисунке). В резцедержателе выполнены сквозное отверстие 14 (для установки державки 2 собранного составного резца) и, как минимум,

одно глухое резьбовое отверстие 15 для установки стопорного винта 16. Стопорный винт 16 выполнен таким образом, что нижним торцом упирается в грань многоугольника 10 промежуточного участка державки 2 и фиксирует её от проворота относительно своей оси.

На передней поверхности резцедержателя 13 выполнен, как минимум, один упор 17, фиксирующий от проворота рабочую головку 1. Упор может быть выполнен произвольной формы, например V-образным.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Сменная рабочая головка 1 соединяется с державкой 2. В свободные отверстия 4 на гранях рабочей головки 1 устанавливаются заглушки 5. Резец в сборе устанавливается в отверстие 14 резцедержателя 13, жестко закрепленного на исполнительном органе горной машины. Составной резец фиксируется в резцедержателе посредством стопорного кольца 12, устанавливаемого в проточку 11 хвостового участка 8 державки 2, и стопорного винта 16, вкрученного в резьбовое отверстие 15 и упирающегося нижним торцом в одну из плоских граней промежуточного участка 7 державки 2, а также посредством упоров 17, фиксирующих от проворота рабочую головку составного резца.

При контакте собранного устройства с разрушаемым материалом рабочая головка 1 воздействует на разрушаемый материал острым ребром армирующей твердосплавной вставки 3. Процесс механического разрушения твердой среды сопровождается износом армирующей твердосплавной вставки 3 и затуплением ребра, направленного по траектории реза. При наступлении существенного износа острого ребра армирующей твердосплавной вставки 3 исполнительный орган машины останавливают. Стопорное кольцо 12 вынимают из проточки 11 хвостового участка 8 державки 2. Стопорный винт 16 выкручивают из резьбового отверстия 15 на величину, обеспечивающую свободный выход державки 2 из отверстия 14. Собранный резец вынимается из отверстия 14 резцедержателя 13 и устанавливается обратно в отверстие 14 таким образом, что в направлении

траектории реза оказывается ориентированным неизношенное острое ребро армирующей твердосплавной вставки 3 рабочей головки 1. После чего производят фиксацию положения резца в резцедержателе.

В случае износа всех ребер или потери твердосплавной вставки 3 рабочей головки 1 составной резец вынимают из резцедержателя 13 описанным выше способом. Рабочую головку 1 отсоединяют от державки 2. Одно из отверстий 4 на гранях рабочей головки 1 освобождают от заглушки 5. Державку 2 устанавливают в освобожденное от заглушки 5 отверстие 4, а заглушку 5 устанавливают в отверстие, освобожденное от державки 2. Таким образом, на вершине рабочей головки 1 составного резца оказывается неизношенная твердосплавная вставка 3. Собранный резец устанавливают в резцедержатель 13, фиксируют и продолжают работу по разрушению материала.

Таким образом, предлагаемое устройство обеспечивает увеличение наработки и уменьшение удельного расхода резцов при разрушении калийных руд исполнительными органами проходческо-очистных комбайнов.

На предложенную конструкцию составного резца получен патент [103].

## 5.6 Выводы по главе 5

1. Предложены технические решения по совершенствованию породоразрушающих исполнительных органов комбайнов «Урал».

2. Показано, что при работе комбайнов, оснащенных планетарно-дисковыми исполнительными органами, рациональные параметры разрушения калийного массива достигаются регулированием частоты переносного вращения планетарно-дискового исполнительного органа при заданной скорости подачи на забой.

3. Предложен алгоритм управления приводами проходческо-очистного комбайна «Урал», обеспечивающий реализацию процесса разрушения

калийного массива с рациональными параметрами резания на основе информации о нагруженности приводных двигателей добычной машины.

4. Предложены варианты конструкций планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов, реализующих перекрёстную схему разрушения калийного массива.

5. Приведены методология и обоснованы рациональные параметры работы плоского планетарно-дискового исполнительного органа опытного проходческо-очистного комбайна МВ 900СМ.

6. Предложены технические решения по совершенствованию породоразрушающего инструмента проходческо-очистных комбайнов калийных рудников, направленные на повышение энергоэффективности процесса добычи руды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований процесса разрушения калийной руды резцами комбайнов при заданном алгоритме выбора режимов работы приводов их исполнительных органов решена крупная научная проблема разработки научной методологии формирования и эксплуатации проходческо-очистных комбайнов как энергоэффективных объектов калийных рудников с учетом установленных закономерностей процесса отделения от массива последовательных элементарных сколов, составляющих срез, что имеет важное значение для горнодобывающей отрасли России.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Выполнены обобщение и анализ теоретических и экспериментальных материалов по теме исследования, изучен опыт эксплуатации проходческо-очистных комбайнов на калийных рудниках России.

2. Исследован процесс формирования последовательных элементарных сколов, составляющих срез, при разрушении блоков калийной руды перекрестными резами. Доказано, что создание на поверхности разрушаемого забоя чередующихся зон локализации ослаблений и регулярных выступов обуславливает снижение на 34 % средних значений и на 16 % средних квадратичных отклонений нагрузок на резцах комбайнов, уменьшение на 15 % удельных затрат энергии процесса резания, а также определяет уменьшения количества мелких труднообогатимых классов в отделённой от массива калийной руде на 42 % по сравнению с шахматной схемой резания.

3. Установлено, что создание на поверхности калийного массива сетки пересекающихся резов с рациональным отношением шага резания к толщине стружки  $t/h = 5 \dots 7$  обуславливает образование в отделяемой стружке сколов устойчивой формы. Частота реализации крупных сколов прямо пропорциональна скорости резания и обратно пропорциональна шагу резания. Частота реализации мелких промежуточных сколов прямо пропорциональна

скорости резания и ширине режущей кромки резца и обратно пропорциональна величине заглубления резца в массив относительно поперечных резов.

4. Экспериментально определены величины и характер изменения нагрузок приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» при отработке забоя полным и неполным сечением. Установлено, что при работе полным забоем функции изменения нагрузок на приводы проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11» носят экспоненциальный характер. Наиболее нагруженными являются приводы бермовых исполнительных органов и относительного вращения резцовых дисков. В диапазоне скоростей подач комбайна  $V_{\pi} = 0,10 \dots 0,14$  м/мин коэффициент вариации сигналов активной мощности приводов относительного вращения резцовых дисков составляет  $K_v = 0,08 \dots 0,16$ , приводов бермовых исполнительных органов –  $K_v = 0,14 \dots 0,18$ . При этом двигатели переносного вращения резцовых дисков, отбойного устройства и конвейера имеют резерв по мощности 40...70 %.

5. Показано, что при работе комбайнов «Урал-20Р-11» неполным сечением забоя на приводы переносного вращения планетарно-дисковых исполнительных органов действуют высоковариативные нагрузки (коэффициент вариации  $K_v = 0,39 \dots 0,44$  при  $V_{\pi} = 0,4$  м/мин), обуславливающие возникновение отказов редукторов.

6. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что эффективность функционирования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников необходимо определять двумя комплексными показателями: коэффициентом энергоэффективности и коэффициентом производительной работы. При этом первый определяется отношением базовых затрат энергии на тонну добытого полезного ископаемого к соответствующей фактической величине, а второй – отношением времени производительной работы к общему времени работоспособного состояния комбайна за рассматриваемый период.

7. Доказано существование корреляции между количеством

труднообогатимых классов в калийной руде  $M_{0,25}$  и величиной удельных энергозатрат  $H_w$  процесса разрушения массива резцами проходческо-очистных комбайнов: минимальному количеству пылевидных классов соответствует минимум удельных затрат энергии. Экспериментально подтверждено, что минимум энергозатрат на разрушение калийной руды пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11» и максимальный выход руды обогатимых классов достигаются при отношении среднего шага резания к средней толщине стружки, находящимся в диапазоне  $t_{cp}/h_{cp} = 2...4$ , и производительности комбайна  $Q = 6,0...6,5$  т/мин.

8. Разработана методология выбора энергоэффективных режимов работы и совершенствования оборудования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников с учетом установленных закономерностей процесса отделения последовательных элементарных сколов, составляющих срез, от калийного массива.

9. Предложен методологический подход и разработан алгоритм управления приводами проходческо-очистных комбайнов с планетарно-дисковыми исполнительными органами, позволяющий при неизменной частоте относительного вращения резцовых дисков устанавливать частоту переносного вращения резцовых дисков по критерию обеспечения минимума удельных затрат энергии и осуществлять поддержание рационального отношения среднего шага резания к средней толщине стружки в диапазоне  $t_{cp}/h_{cp} = 2...4$ . Предложены и запатентованы варианты конструкций планетарно-дисковых исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов, реализующих перекрёстную схему разрушения калийного массива.

10. Результаты диссертационной работы приняты к использованию в компании *T-Machinery a.s.* (Чешская Республика) при проектировании исполнительных органов и погрузочного оборудования проходческо-очистных комбайнов; использованы в ООО «ЕвроХим-Проект» (г. Пермь) при

разработке технологических решений, направленных на улучшение качества и снижение затрат на обогащение калийной руды, добываемой механизированным способом. Разработанные методология и оборудование для контроля нагруженности приводов комбайнов калийных рудников используются в ООО «НПП «РОС» (г. Пермь) и ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр «Горный институт УрО РАН» (г. Пермь) при проведении испытаний новой техники. Результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело» специализация «Горные машины и оборудование».

11. Перспективы разработки данной тематики включают исследования в процессе эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников с усовершенствованными породоразрушающими исполнительными органами и погрузочным оборудованием. Внедрение в практику производства планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов, обеспечивающих разрушение калийного массива перекрестными резами, позволит снизить удельные затраты энергии на добычу калийной руды до 15 % и уменьшить количество труднообогатимых классов в добываемой руде до 42 %. Уменьшение массовой доли труднообогатимых частиц класса «-0,25 мм» в обогащаемой калийной руде на 1 % определяет увеличение извлечения полезного компонента в среднем на 0,1...0,2 %, что увеличивает прибыль горнодобывающих предприятий.



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a$  – часть глубины реза без бокового развала, обусловленная вязкими свойствами калийной руды, мм;
- $a_{кр}$  – абразивность калийной руды, мг/км;
- $A$  – смещение плоскости резцового диска от плоскости симметрии, м;
- $A_p$  – сопротивляемость калийной руды резанию, кН/м;
- $b_p$  – ширина режущей кромки резца, мм;
- $b_k$  – расчётная ширина режущей кромки, м;
- $B$  – ширина шнека или барабана, м;
- $c$  – длина трещины, мм;
- $C$  – расстояние от оси вращения диска до оси вращения водила, м;
- $d_d$  – диаметр диска по кромкам резцов, м;
- $d_{заб}$  – диаметр забурника по кромкам резцов, м;
- $d_c$  – размер ячейки сита, м;
- $d_{шн}$  – диаметр ступицы шнека, м;
- $D_{ИЮ}$  – диаметр планетарно-дискового исполнительного органа, м;
- $D_{шн}$  – диаметр шнека по лопасти, м;
- $D_p$  – дисперсия силы резания  $P_z$ ;
- $E$  – модуль Юнга, ГПа;
- $f$  – коэффициент трения калийной руды по металлу;
- $f_{пр}$  – частота ограничения спектра аналогового сигнала, Гц;
- $f_1$  – частота реализации крупных сколов при разрушении калийного массива перекрестными резами, Гц;
- $f_2$  – частота реализации мелких промежуточных сколов при разрушении калийного массива перекрестными резами, Гц;
- $F_k$  – площадь сечения выработки, м<sup>2</sup>;
- $F_{оп}$  – площадь прямоугольника, описанного вокруг контура выработки, м<sup>2</sup>;
- $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;
- $G$  – масса продуктов разрушения, кг;

$h$  – глубина реза, м;

$h_{\text{в}}$  – высота выступа, м;

$h_{\text{з}}$  – величина заглубления перекрёстных резов относительно дна резов отработанного слоя породы, м;

$h_{\text{ск}}$  – высота скребка, м;

$h_{\text{ср}}$  – средняя глубина реза, м;

$H_{\text{w}}$  – удельные энергозатраты процесса разрушения массива резцами выемочной машины, кВт·ч/т (кВт·ч/м<sup>3</sup>);

$H_{\text{wб}}$  – базовое значение удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива резцами комбайна, кВт·ч/т (кВт·ч/м<sup>3</sup>);

$i$  – отношение частоты относительного вращения резцовых дисков к переносной частоте вращения;

$i_m$  – мгновенное значение тока в момент времени  $t$ , А;

$I_{\text{эф}}$  – эффективное значение тока, А;

$k_{\text{в.з.}}$  – коэффициент взаимного обнажения забоя;

$k_{\text{п.р.}}$  – коэффициент производительной работы;

$k_{\text{э.эф.}}$  – коэффициент энергоэффективности;

$k_{t/h}$  – коэффициент степени блокированности реза;

$k_b$  – коэффициент ширины режущей кромки рабочего инструмента;

$k_{\alpha}$  – коэффициент угла резания;

$k_{\text{зат}}$  – коэффициент затупления резца;

$k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы передней грани резца;

$k_{\psi}$  – коэффициент ориентации резца;

$K$  – коэффициент интенсивности напряжений, кгс/мм<sup>3/2</sup>;

$K_{\text{з}}$  – коэффициент заполнения поперечного сечения шнека;

$K_{\text{пр}}$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий отношение толщины среза к скорости подачи комбайна;

$K_{\text{р}}$  – коэффициент, учитывающий реологические свойства руды;

$K_{\text{ри}}$  – коэффициент, учитывающий конструктивные параметры режущего инструмента и параметры схемы резания;

$K_{ц}$  – коэффициент циркуляции руды в шнеке;

$K_v$  – коэффициент вариации активной мощности, потребляемой электродвигателем;

$l_{ск}$  – длина скребка, м;

$l_{э.ск.}$  – максимальная длина элементарного скола, мм;

$l_i$  – путь, пройденный комбайном за время  $i$ -го замера, м;

$L$  – длина реза, м;

$L_{уд}$  – удельный путь резания, км/м<sup>3</sup>;

$m$  – масса пробы, кг;

$m_{пр}$  – минимальная масса пробы для ситового анализа, кг;

$m_{шн}$  – количество шнеков, шт.;

$m_i$  – масса  $i$ -го класса частиц, кг;

$m_P$  – среднее значение силы резания  $P_z$ , Н;

$M_i$  – массовое содержание  $i$ -го класса частиц, %;

$M_{KCl}$  – массовое содержание  $KCl$  в разрушаемой породе, %;

$M_{NaCl}$  – массовое содержание  $NaCl$  в разрушаемой породе, %;

$M_{н.о}$  – массовое содержание нерастворимого остатка в породе, %;

$M_{0,25}$  – массовое содержание класса частиц размером менее 0,25 мм, %;

$n$  – число линий резания, шт;

$n_{отн}$  – частота относительного вращения резцовых дисков планетарно-дискового органа, об/мин;

$n_{пер}$  – частота переносного вращения резцовых дисков планетарно-дискового органа, об/мин;

$n_{шн}$  – частота вращения шнека, об/мин;

$n_P$  – количество интервалов дискретизации;

$N_a$  – активная мощность, потребляемая электродвигателем, кВт;

$N_{б.л.}$  – сила, действующая по нормали к левой боковой поверхности резца, Н;

$N_{б.п.}$  – сила, действующая по нормали к правой боковой поверхности резца, Н;

$N_3$  – число заходов лопастей шнека, шт.;

$N_{п}$  – нормальная сила, действующая на переднюю грань резца, Н;

$\Sigma N_{p.и.о.}$  – расчетная мощность электродвигателей приводов исполнительных органов, кВт;

$p_k$  – контактная прочность, МПа;

$p(r)$  – автокорреляционная функция силы резания  $P_Z$ ;

$P_{изм}$  – давление в измерительном гидроцилиндре стенда, МПа;

$P(T)$  – мгновенное значение нагрузки на приводе исполнительного органа выемочной машины;

$P_1(T)$  – составляющая нагрузки на приводе исполнительного органа выемочной машины, характеризующая физико-механические свойства разрушаемого соляного массива;

$P_2(T)$  – составляющая нагрузки на приводе исполнительного органа выемочной машины, характеризующая кинематику исполнительных органов, техническое состояние выемочной машины;

$P_3(T)$  – составляющая нагрузки на приводе исполнительного органа выемочной машины, характеризующая режимные параметры работы выемочной машины, в частности скорость подачи комбайна на забой;

$P_i$  – мгновенное значение силы резания в заданный момент времени  $i$ , Н;

$P_X$  – геометрическая сумма проекций сил, действующих на резец, на ось  $OX$  (боковая сила), Н;

$P_Y$  – геометрическая сумма проекций сил, действующих на резец, на ось  $OY$  (сила подачи), Н;

$P_Z$  – геометрическая сумма проекций сил, действующих на резец, на ось  $OZ$  (сила резания), Н;

$q_{пр}$  – минимальная масса пробы для ситового анализа, кг;

$Q$  – производительность комбайна, т/мин;

$Q_{шн}$  – производительность шнека (в осевом направлении), т/мин;

$Q_k$  – производительность скребкового конвейера, т/мин;

$Q_i$  – производительность комбайна на  $i$ -м участке, т/мин;

$r$  – расстояние от вершины трещины до точки, где определяется напряжение, мм;

$r_{\text{вод}}$  – радиус вращения водила планетарно-дискового органа, м;

$r_{\text{д}}$  – радиус резцового диска, м;

$R_1, R_2, R_3$  – сопротивление резисторов, Ом;

$R_{\text{внW}}$  – внутреннее сопротивление канала измерения напряжения ваттметра, Ом;

$R_{\text{шн}}$  – радиус шнека по лопасти, м;

$S$  – площадь забоя, обрабатываемая исполнительными органами комбайна, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{зат}}$  – площадь затупленной площадки задней поверхности резца, мм<sup>2</sup>;

$S_{\text{з.ч.}}$  – площадь заполненной части сечения шнека, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{н.ч.}}$  – площадь незаполненной части сечения шнека, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{п}}$  – площадь передней поверхности резца, контактирующей с массивом, мм<sup>2</sup>;

$S_{\text{пор.}}$  – площадь поршня измерительного гидроцилиндра, мм<sup>2</sup>;

$S_{\text{р}}$  – площадь поперечного сечения реза, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{т}}$  – площадь поверхности разрыва (трещины), м<sup>2</sup>;

$S_{\text{w}}$  – полная мощность потребителя, кВА;

$t$  – шаг резания, м;

$t_0$  – период тепловых флуктуаций, не зависит от химического состава и структуры тела,  $t_0 \approx 10^{-14} \dots 10^{-13}$  с;

$t_{\text{р}}$  – время от момента приложения постоянной нагрузки до разрушения образца, с;

$t_{\text{рац}}$  – рациональный шаг резания, м;

$t_{\text{р.п.}}$  – рациональный шаг перекрестных резов, м;

$t_{\text{ск}}$  – расстояние между скребками, м;

$t_{\text{ср}}$  – средний шаг резания, м;

$t_{\text{шн}}$  – шаг лопасти шнека, м;

$t_i$  – время  $i$ -го замера, с;

$T_1$  – время перемещения резца на расстояние, равное  $t$ , с;

$T_2$  – время реализации промежуточных сколов, с;

$u_m$  – мгновенное значение фазного напряжения, измеренное прибором в  $m$ -й момент времени, В;

$U_0$  – начальная энергия активации разрушения, Дж;

$U_1$  – фазное напряжение на вводе № 1, В;

$U_2$  – фазное напряжение на вводе № 2, В;

$U_{\text{эф}}$  – эффективное значение фазного напряжения, В;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$V_{\text{зад}}$  – заданная скорость подачи комбайна на забой, м/мин;

$V_{\text{п}}$  – скорость подачи комбайна на забой, м/мин;

$V_{\text{п}i}$  – скорость подачи комбайна на  $i$ -м участке, м/мин;

$V_{\text{р}}$  – скорость резания, м/с;

$V_{\text{р.п.}}$  – скорость движения раздробленной породы вдоль передней поверхности резца, м/с;

$V_{\text{ц}}$  – скорость движения цепи скребкового конвейера, м/с;

$x_{\text{р}}$  – число резцов в линии резания, шт;

$x_m, x_{m-1}$  – положение комбайна в текущий  $m$  и предшествующий ему  $m-1$  момент времени, м;

$Y_1$  – отжимающая сила, действующая на породоразрушающий инструмент, Н;

$Y_2$  – сила сопротивления подаче резца, Н;

$z$  – количество точек базы расчета отклонения активной мощности двигателя отбойного устройства;

$Z_{\text{д}}$  – количество резцовых дисков на одном исполнительном органе, шт.;

$Z_{\text{р}}$  – количество резцов на резцовом диске, шт.;

$Z_{\text{п}}$  – сопротивление массива резанию передней гранью резца, Н;

$\alpha$  – угол наклона скребкового конвейера относительно горизонтальной плоскости, град;

$\alpha_{\text{р}}$  – угол резания, град;

$\alpha_{\text{я.у.}}$  – угол образования сторон клиновидного ядра уплотнения, град;

$\beta$  – предельный угол вовлечения ступицей шнека калийной руды в тангенциальное движение, град;

$\beta_{\text{р}}$  – задний угол резца, град;

$\gamma$  – насыпная плотность калийной руды при машинной выемке, т/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{\text{п}}$  – свободная поверхностная энергия материала, Дж/м<sup>2</sup>;

$\gamma_k$  – плотность калийной руды в массиве, т/м<sup>3</sup>;

$\gamma_p$  – передний угол резца, град;

$\gamma_{\text{шн}}$  – угол наклона образующей лопасти шнека относительно оси вращения шнека, град;

$\delta_{\text{шн}}$  – толщина лопасти шнека, м;

$\delta S_T$  – величина приращения поверхности трещины, м<sup>2</sup>;

$\delta W$  – уменьшение упругой энергии тела при приращении поверхности трещины на величину  $\delta S_T$ , Дж;

$\delta П$  – приращение поверхностной энергии трещины при увеличении её поверхности на величину  $\delta S_T$ , Дж;

$\theta$  – угол наклона выработки, град;

$\theta_T$  – угол между осью  $X$ , лежащей в плоскости распространения трещины, и радиус-вектором  $\vec{r}$ , град;

$\lambda_T$  – оператор, учитывающий динамические свойства системы подачи и другие постоянные параметры, характерные для данного типа комбайна;

$\lambda$  – угол отклонения плоскости, проходящей через ось резца, от плоскости, проходящей через вектор абсолютной скорости его движения, град;

$\lambda_v$  – угол отклонения плоскости, проходящей через ось резца, от вектора абсолютной скорости, град;

$\lambda_{\text{шн}}$  – угол наклона оси шнека к горизонтальной плоскости, град;

$\mu$  – коэффициент трения разрушенной породы о переднюю грань резца;

$\mu_x$  – коэффициент трения боковых поверхностей резца о породу;

$\mu_y$  – коэффициент трения задней поверхности резца о породу;

$\xi$  – угол заострения боковых поверхностей резца, град;

$\xi_{\text{тр}}$  – коэффициент, учитывающий динамические свойства трансмиссии и электропривода;

$\sum N_{\text{ф.и.о.}}$  – сумма средних за контролируемый период  $T$  значений активных мощностей приводов комбайна, кВт

$П$  – поверхностная энергия трещины, Дж;

$П_{\%}$  – величина потерь руды в очистной камере, %;

- $\rho$  – угол естественного откоса руды в движении, град;
- $\rho_{п}$  – угол естественного откоса руды в покое, град;
- $\sigma_{раст}$  – предел прочности при растяжении, МПа;
- $\sigma_{сж}$  – предел прочности при одноосном сжатии, МПа;
- $\sigma_{сж.ср.}$  – среднее значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа;
- $\sigma_{сж.х.}$  – среднее значение предела прочности при одноосном сжатии вдоль направления напластования образца калийного массива, МПа;
- $\sigma_{сж.у.}$  – среднее значение предела прочности при одноосном сжатии перпендикулярно направлению напластования образца калийного массива, МПа;
- $\sigma_{сж.з.}$  – среднее значение предела прочности при одноосном сжатии вдоль направления напластования образца калийного массива, МПа;
- $\sigma_P$  – среднеквадратичное отклонение силы резания  $P_z$ ;
- $\Delta_m$  – доля разности массы исходной навески и суммы масс классов крупности, составляющих навеску, от массы исходной навески, %;
- $\Delta T$  – период расчета значений активных мощностей приводов;
- $\tau$  – интервал дискретизации функции аналогового сигнала по времени, с;
- $\upsilon$  – угол трения породы о резец, град;
- $\varphi$  – угол заострения резца, град;
- $\varphi_i$  – угол поворота резцового диска в рассматриваемый момент времени, град;
- $\psi$  – угол бокового развала реза, град;
- $\psi_k$  – угол, образуемый между вектором абсолютной скорости режущей части резца и плоскостью диска, град;
- $\psi_p$  – угол разворота резца между направлением вектора скорости и проекцией оси резца на плоскость резания, град;
- $\psi_{уст}$  – угол разворота резца на режущем диске, град;
- $\psi_{шн}$  – угол подъема винтовой линии шнека, град.;
- $\psi_0$  – величина, характеризующая вязкость калийного массива, град;
- $\nu_P$  – коэффициент вариации силы резания  $P_z$ ;



$\omega_{\text{пер}}$  – угловая скорость переносного вращения исполнительного органа (водила), рад/с;

$\omega_{\text{отн}}$  – угловая скорость относительного вращения исполнительного органа (дисков), рад/с;

$\Omega$  – угол скола крупного элемента, град.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Аверин, Е. А.** Развитие теоретических основ проектирования горнопроходческих машин для проведения подземных горных выработок различного назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Аверин Евгений Анатольевич. – Тула, 2021. – 361 с.
2. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. **Андреева, Л. И.** Методология формирования технического сервиса горно-транспортного оборудования на угледобывающем предприятии: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук / Л. И. Андреева. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2004. – 25 с.
4. **Андреева, Л. И.** Методология формирования эффективной системы обеспечения работоспособности горной техники / Л. И. Андреева, Т. И. Красникова, Ю. Ю. Ушаков // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 92–106.
5. **Артемьев, А. А.** К вопросу оценки ресурса элементов трансмиссии горных машин / А. А. Артемьев, В. С. Потапенко, С. Л. Иванов, Э. А. Кремчеев, А. А. Поддубная, А. С. Фокин // Горные машины и электромеханика. – 2007. – № 9. – С. 31–35.
6. **Архангельский, А. С.** Проходческий комбайн конструкции Якова Гуменника / А. С. Архангельский. – М.: Углетехиздат, 1956. – 57 с.
7. **Баклашов, И. В.** Геомеханика: учебник для вузов. В 2 т. – М.: Из-во МГГУ. Т1. Основы геомеханики, 2004. – 208 с.
8. **Барон, Л. И.** Влияние скорости резания калийных солей на износ резцов / Л. И. Барон, К. Д. Бондарев // Проектирование и строительство угольных предприятий. – 1966. – № 5(89). – С. 12–15.
9. **Барон, Л. И.** Определение сопротивляемости соляных пород резанию методом технологической пробы / Л. И. Барон, Д. В. Брусиловский // Технология добычи угля подземным способом. – 1969. – № 5. – С. 51–53.

10. **Барях, А. А.** Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие / А. А. Барях, В. А. Асанов, И. Л. Паньков. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.
11. **Белов, В. Н.** Добыча и переработка калийных солей / В. Н. Белов, А. В. Соколов – Л.: Химия, 1971. – 319 с.
12. **Бернштейн, М. Л.** Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
13. **Берон, А. И.** Резание угля / А. И. Берон, А. С. Казанский, Б. М. Лейбов, Е. З. Позин. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 439 с.
14. **Берон, А. И.** Условия возникновения наростов на передних гранях резцов и их влияние на процесс разрушения горных пород. Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород. № 2 / А. И. Берон. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 224 с.
15. **Бреннер, В. А.** Режимы работы комбайнов для добычи калийных руд / В. А. Бреннер, И. С. Зильберт, В. А. Зыков, Д. М. Любоцинский. – М.: Недра, 1978. – 216 с.
16. **Бреннер, В. А.** Щитовые проходческие комплексы / В. А. Бреннер, А. Б. Жабин, М. М. Щеголевский, Ал. В. Поляков, Ан. В. Поляков. – М.: Горная книга, 2009. – 447 с.
17. **Бреннер, В. А.** Виброактивное разрушение горных пород проходческими комбайнами / В. А. Бреннер, И. П. Кавыршин, В. А. Кутлунин, В. Б. Струков, И. Г. Шмакин, Нин Чжун Лян, Т. В. Ковалёва, Ю. В. Антипов. – Тула: Тульский полиграфист, 2000. – 203 с.
18. **Брусиловский, Д. В.** Режущий инструмент отечественных и зарубежных калийных комбайнов / Д. В. Брусиловский, Л. Н. Вировец, С. М. Ущеренко // Обзорная информация. Сер. Калийная промышленность. – М.: Изд-во НИИТЭХИМ, 1983. – 44 с.

19. **Буевич, В. В.** Совершенствование исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал» / В. В. Буевич, Н. В. Чекмасов, Д. И. Шишлянников, В. В. Габов // Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 52–55.
20. **Валишин, А. А.** Комплекс математических моделей механизма разрушения полимеров/ дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 05.13.18 / Валишин Анатолий Анатольевич. – М., 2007. – 421 с.
21. **Васильев, Л. М.** Исследование процесса скола единичного элемента стружки при резании горных пород / Л. М. Васильев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1976. – № 6. – С. 41–46.
22. **Вернер, В. Н.** Исследование и обоснование рациональных параметров шнековых погрузочно-транспортирующих органов выемочных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Вернер Владимир Николаевич. – Кемерово, 1999. – 318 с.
23. **Ветров, Ю. А.** Разрушение прочных грунтов / Ю. А. Ветров, В. Л. Баладинский, В. Ф. Баранников, В. П. Кукса. – Киев: Будівельник, 1973. – 352 с.
24. **Ветров, Ю. А.** Сопротивление резанию мерзлого грунта / Ю. А. Ветров, А. А. Киоленко // Строительные и дорожные машины. – 1961. – № 10. – С. 7–8.
25. **Габов, В. В.** Стенд для экспериментальных исследований процесса резания калийных руд одиночным резцом горных машин / В. В. Габов, А. Д. Шефнер, Д. И. Шишлянников, Н. В. Чекмасов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 245–248.
26. **Габов, В. В.** Повышение эффективности отделения калийной руды от массива с использованием шахматной симметричной перекрестной схемы резания/ В. В. Габов, Д. И. Шишлянников, Н. В. Чекмасов // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 11. – С. 41–44.

27. **Габов, В. В.** Исследование процесса формирования элементарных сколов при разрушении калийных солей перекрестными резами / В. В. Габов, Н. В. Чекмасов, А. Я. Бурак, **Д. И. Шишлянников** // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 8. – С. 42–43.

28. **Габов, В. В.** Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обеспечивающих эффективность погрузки угля на забойный конвейер / В. В. Габов, К. Л. Нгуен, В. С. Нгуен, Т. Б. Ле, Д. А. Задков // Уголь. – 2018. – С. 32–35.

29. **Гавриков, А. А.** Обоснование параметров планетарных исполнительных органов со скрещивающимися осями, обеспечивающих повышение производительности проходческих комбайнов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.06 / А. А. Гавриков. – Тула, 1986. – 23 с.

30. **Гепотанов, В. Н.** Выбор длительности хронометражных наблюдений при исследованиях надежности забойного оборудования / В. Н. Гепотанов, Ю. Н. Алешин // Известия вузов. Горный журнал. – 1972. – Вып. 7. – С. 31–35.

31. **Гепотанов, В. Н.** Некоторые закономерности процесса разрушения горных пород резцовым инструментом выемочных горных машин / В. Н. Гепотанов // Научные труды, Сб. №17. – М. : МГГИ, 1956. – С. 21–27.

32. **Горячкин, В. П.** Учение об ударе / В. П. Горячкин // Собр. соч. Т. 1. – М.: Колос, 1965. – С. 178–202.

33. **ГОСТ 21878-76.** Случайные процессы и динамические системы. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 33 с.

34. **ГОСТ 27.002-2015.** Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 28 с.

35. **Давиденко, А. М.** Планетарные породоразрушающие конструкции и возможности их применения в алмазном бурении / А. М. Давиденко, В. Л. Хоменко // Научный вестник Национального горного университета Украины. – 2020. – № 4. – С. 75–78.

36. **Деветьев, В. З.** Возможности снижения удельной энергоемкости разрушения калийных пород резцовым инструментом / В. З. Деветьев // Научные труды ПермНИУИ. – 1964. – Сб. 7. – С. 181–189.

37. **Деветьев, В. З.** Шахтные исследования по определению показателя буримости калийных солей / В. З. Деветьев, А. Н. Трегубов, Д. М. Светличный // Научные труды ПермНИУИ. – 1964. – Сб. 7. – С. 23–29.

38. **Деветьев, В. З.** Исследование разрушаемости соляных пород в установившемся режиме резания с учетом затупленности режущего инструмента / В. З. Деветьев, Д. М. Светличный // Научные труды ПермНИУИ. – 1966. – Сб. 9. – С. 166–181.

39. **Деветьев, В. З.** Лабораторные и шахтные исследования по разрушению калийных пород Верхнекамского месторождения резцовым инструментом / В. З. Деветьев, А. Н. Трегубов, Д. М. Светличный // Научные труды ПермНИУИ. – 1965. – Сб. 8. – С. 16–21.

40. **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 611 с.

41. **Докукин, А. В.** Динамические процессы горных машин / А. В. Докукин, Ю. Д. Красников, З. Я. Хургин. – М.: Наука, 1972. – 150 с.

42. **Докукин, А. В.** Выбор параметров выемочных машин. Научно-методические основы / А. В. Докукин, А. Г. Фролов, Е. З. Позин. – М.: Наука, 1976. – 144 с.

43. **Долгов, В. Л.** Совершенствование плоско-планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов / В. Л. Долгов // Горная электромеханика и механизация горных работ. – 1969. – Вып. 6. – С. 61–64.

44. **Евстратов, В. А.** Повышение эффективности шнековых модулей горных машин / В. А. Евстратов, Э. Ю. Воронова, А. С. Апачанов, В. И. Григорьев, В. А. Сухарникова, И. В. Бреславцева // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2 (154). – С. 42–47.

45. **Ефимов, В. И.** Горнопромышленные отходы: типы потребительских рынков и оценка степени соответствия их различным видам продукции / В. И. Ефимов, С. М. Попов, К. А. Головин, А. Б. Копылов // Известия Тульского государственного университета. – 2017. – № 3. – С. 223–231.
46. **Жабин, А. Б.** Об учете неоптимальных режимов резания горных пород тангенциальными резцами / А. Б. Жабин, А. В. Поляков, А. Е. Аверин, Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 20–24.
47. **Жабин, А. Б.** Основы проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих машин / А. Б. Жабин, А. В. Поляков, Е. А. Аверин, Ю. Н. Линник // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 6. – С. 156–164.
48. **Жабин, А. Б.** Пути развития теории разрушения углей и горных пород резцовым инструментом / А. Б. Жабин, А. В. Поляков, А. Е. Аверин, Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник // Уголь. – 2019. – № 9. – С. 24–28.
49. **Жабин, А. Б.** Состояние научных исследований в области разрушения горных пород резцовым инструментом на рубеже веков / А. Б. Жабин, А. В. Поляков, Е. А. Аверин, В. И. Сарычев // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2018. – № 1. – С. 230–247.
50. **Загвоздкин, И. В.** Обеспечение безопасности и безаварийной работы комбайновых комплексов на рудниках ОАО «Уралкалий» / И. В. Загвоздкин, Г. П. Лесов, Д. М. Янович // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 9. – С. 46–49.
51. **Задков, Д. А.** Способ отделения угля от массива при отработке трещиновато-слоистых угольных пластов / Д. А. Задков, А. А. Банников, Д. И. Шишлянников, К. П. Талеров, К. А. Головин // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 30–33.

52. **Залманзон, Л. А.** Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.

53. **Земсков, А. Н.** Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними / А. Н. Земсков, П. И. Кондрашев, Л. Г. Травникова – Пермь: Изд. дом «Типография купца Тарасова», 2008. – 414 с.

54. **Зильбершмидт, В. Г.** Разрушение соляных пород / В. Г. Зильбершмидт, В. В. Зильбершмидт, О. Б. Наймарк. – М. : Наука, 1992. – 144 с.

55. **Иванов, С. Л.** Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / С. Л. Иванов. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. горного ин-та., 1999. – 92 с.

56. **Иванов, С. Л.** Пилотная диагностика состояния трансмиссий горных машин по параметрам питания электропривода / С. Л. Иванов, М. А. Семенов, А. С. Иванов, А. А. Поддубная, А. С. Фокин // Записки Горного института. – Т. 178: Проблемы горно-транспортных систем и электромеханики. – СПб., 2008. – С.159–161.

57. Изучение режимов разрушения соляных пород и разработка параметров добычных машин для Верхнекамских калийных рудников: Отчёт/Руковод. Д. М Светличный. № ИС-27– Пермь: Изд-во ПермНИУИ, 1965. – 372 с.

58. Исследование основных закономерностей резания и скола соляных пород на калийных рудниках : отчет о НИР : 52-66 / ВНИИГ ; руковод. А. В. Соболев; исполн. Д. В. Брусиловский [и др.]. – Л., 1967. – 219 с.

59. Исследование основных закономерностей резания калийных солей : отчет о НИР Ч.1 : 72-31 / ТПИ ; руковод. И. Г. Шмакин; исполн.: В. С. Евсеев – Тула, 1973. – 126 с.

60. Исследование основных закономерностей резания калийных солей : отчет о НИР Ч.2 : 72-31 / ТПИ ; руковод. И. Г. Шмакин; исполн.: В. С. Евсеев [и др.]. – Тула, 1973. – 147 с.



61. Исследование энергоемкости и эффективности процесса разрушения калийных руд модернизированными рабочими органами : отчет о НИР / ООО «РКЦ» ; руковод. Г. Д. Трифанов; исполн. Н. В. Чекмасов [и др.]. – Пермь, 2003. – 36 с.

62. **Кабиев, С. К.** Оптимизация параметров комбайнов для добычи калийных руд / С. К. Кабиев. – М.: Недра, 1992. – 239 с.

63. **Кобылянский, Д. М.** Исследование процесса транспортирования материала винтовым конвейером / Д. М. Кобылянский // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 2. – С. 17–21.

64. **Коваль, П. В.** Методы и средства исследования параметров горных машин: учебное пособие по УИРС / П. В. Коваль, К. М. Первов, А. Г. Бурьгин – М.: Изд-во МГИ, 1981. – 88 с.

65. **Козин, В. З.** Опробование на обогатительных фабриках / В. З. Козин. – М.: Недра, 1988. – 287 с.

66. **Коломийцев, М. Д.** Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов: учеб. пособие / М. Д. Коломийцев. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1988. – 96 с.

67. Комбайн проходческо-очистной «Урал-20Р»: руководство по эксплуатации 41.00.00.000 РЭ / ОАО «КМЗ». – Копейск, 2013. – 273 с.

68. Комбайн проходческо-очистной «Урал-310»: руководство по эксплуатации 230.00.00.000 РЭ / ОАО «КМЗ». – Копейск, 2017. – 302 с.

69. Комбайны проходческо-очистные для добычи калийных руд. Выбор показателей назначения и расчет параметров разрушения горных пород. Отраслевая методика. – Л.: Изд-во ВНИИГ, 1986. – 31 с.

70. Компания Sandvik Mining and Construction подписала контракт с ОАО «Уралкалий» о поставке горных комбайнов. Режим доступа: <http://mining-media.ru/ru/article/podzemmach/273-kompaniya-sandvik-mining-and-construction-podpisala-kontrakt-s-oao-uralkalij-o-postavke-gornyx-kombajnov>. – Заглавие с экрана. – (дата обращения: 03.09.2021).

71. **Крапивин, М. Г.** Горные инструменты / М. Г. Крапивин, И. Я. Раков, Н. И. Сысоев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 256 с.

72. **Красников, Ю. Д.** Анализ теоретической производительности очистного комбайна при добыче сильвинита / Ю. Д. Красников, Т. П. Щерба // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 8. – С. 34–37.

73. **Леванковский, Л. А.** Анализ и оценка влияния основных факторов и условий на износ поворотных резцов при работе проходческих комбайнов / Л. А. Леванковский, Л. Б. Глатман // Разрушение горных пород и композиционных материалов поворотными резцами: Сб. научных трудов. – М.: АГН, 1998. – № 1. – С. 81–109.

74. **Линник, Ю. Н.** Анализ структуры отказов шнеков очистных комбайнов / Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник, Э. Ю. Воронова, В. А. Евстратов, А. Цих // Уголь. – 2021. – № 4(1141). – С. 20–24.

75. **Линник, Ю. Н.** Оценка влияния отказов резцов и резцедержателей на показатели эффективности работы угледобывающих комбайнов / Ю. Н. Линник, А. Б. Жабин, В. Ю. Линник, А. В. Поляков // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. – 2018. – № 2. – С. 247–263.

76. **Литвинский, Г. Г.** Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. – Монография / ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.

77. **Максимов, А. Б.** Обоснование параметров породоразрушающих исполнительных органов и погрузочного оборудования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Максимов Алексей Борисович. – Пермь, 2019. – 182 с.

78. **Максимов, А. Б.** Определение рациональных параметров шнековых грузчиков проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» / А. Б. Максимов, Д. И. Шишлянников, Н. В. Чекмасов // Известия УГГУ. – 2019. – № 2 (54). – С. 97–101.

79. **Максимов, А. Б.** Повышение качества гранулометрического состава калийной руды, добываемой проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р» / А. Б. Максимов, **Д. И. Шишлянников** // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4. – С. 4–11.

80. **Малевич, Н. А.** Горнопроходческие машины и комплексы: учебник для вузов / Н. А. Малевич ; под ред. В. А. Бреннера. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 384 с.

81. Мариетта для «Уралкалия». Режим доступа: <https://www.newsko.ru/articles/nk-301520.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 03.09.2021).

82. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / сост. А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов, В. В. Федорищев, Д. В. Грищенко – СПб.: НОУ «Севзапучцентр», 2012. – 68 с.

83. Методика проведения измерений режимов работы двигателей комбайнов / сост. Н. В. Чекмасов, М. Г. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2001. – 12 с.

84. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» / ОАО «Галургия». – Новосибирск : Наука, 2011. – 487 с.

85. **Миничев, В. И.** Угледобывающие комбайны. Конструирование и расчет / В. И. Миничев. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.

86. **Михайлов, В. Г.** Оценка условий резания угля при движении инструмента по циклоидной кривой / В. Г. Михайлов, В. И. Дубянский // Труды Новочеркасского политехнического института. – 1968. – Т. 175. – С. 142–147.

87. Модернизация рабочих органов проходческо-очистных комбайнов с целью снижения энергоемкости разрушения и выхода мелких классов руды : отчет о НИР / ООО «РКЦ» ; рук. Трифанов Г. Д. ; исполн.: Чекмасов Н. В. [и др.]. – Пермь, 2005. – 41 с.

88. **Монтгомери, Д. К.** Планирование эксперимента и анализ данных/ Д. К. Монтгомери – Л.: Судостроение, 1980. – 381 с.

89. Обоснование технических предложений по повышению эффективности комбайна «Урал-20Р» при разработке калийных пластов «АБ», «В» и «Красный-П»: отчет о НИР / ООО «РКЦ»; рук. Трифанов Г. Д.; исполн.: Чекмасов Н. В. [и др.]. – Пермь, 2008. – 58 с.

90. **Озорнин, М. С.** Определение параметров работы комбайновых комплексов калийных рудников при проходке камер неполным сечением забоя / М. С. Озорнин, **Д. И. Шишляников**, В. А. Романов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 105–112. - DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-105-112.

91. **Озорнин, М. С.** Методика определения производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников с учетом условных единиц работы / М. С. Озорнин, **Д. И. Шишляников**, В. А. Романов, В. А. Лопухов // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 4. – С. 34–39.

92. **Патент 2720863 Российская Федерация, МПК Е 21 С41/20 (2006.01).** Способ разработки пологих пластов калийных солей комбайновыми комплексами: № 2019122555; заявлено 15.07.2019; опубликовано 13.05.2020 / **Д. И. Шишляников**, В. А. Романов, М. С. Озорнин; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 14. – 7 л.: ил.

93. **Патент 2213078 Российская Федерация, МПК С05D1/02 (2006.01), С01D3/04 (2006.01).** Способ получения агломерированного хлористого калия: № 2001124027/12; заявлено 29.08.2001; опубликовано 27.09.2003 / Ю. В. Букша, Л. М. Перминов, П. А. Дерябин, С. Б. Фролов, Ю. И. Гержберг; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 27. – 6 с.

94. **Патент 2357943 Российская Федерация, МПК С05D1/02 (2006.01).** Способ получения гранулированного калийного удобрения: № 2007122887/15; заявлено 18.06.2007; опубликовано 10.06.2009 / Н. П. Крутько и др.; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 16. – 7 с.

95. Патент **2375571** Российская Федерация, МПК E21C27/24 (2006.01). Способ разрушения горного массива перекрестными резами: № 2008127396/03; заявл. 04.07.2008; опубл. 10.12.2009 / Н. В. Чекмасов, А. Н. Чистяков, В. В. Семёнов, **Д. И. Шишлянников**; заявитель АО «Сильвинит». Бюл. № 34. – 7 с.

96. Патент **2522111** Российская Федерация, МПК E21C27/24 (2006.01). Способ разрушения горного массива перекрестными резами: № 2013113586/03; заявлено 26.03.2013; опубликовано 10.07.2014 / Н. В. Чекмасов, **Д. И. Шишлянников**; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 19. – 7 с.

97. Патент **2602435** Российская Федерация, МПК E21C35/19 (2006.01). Устройство для крепления резца на исполнительном органе горной машины: № 2015142649/03; заявлено 07.10.2015; опубликовано 20.11.2016 / Л. И. Старков, Л. Е. Макарова, М. Г. Трифанов, **Д. И. Шишлянников** В. В. Лаук; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 32. – 12 с.

98. Патент **2618630** Российская Федерация, МПК E21C35/24 (2006.01). Способ управления горным комбайном с планетарно-дисковым исполнительным органом: № 2016110648; заявлено 22.03.2016; опубликовано 05.05.2017 / Н. В. Чекмасов, **Д. И. Шишлянников**, М. Г. Трифанов, А. С. Асонов; заявитель ПНИПУ. Бюл. №13. – 9 с.

99. Патент **2630839** Российская Федерация, МПК E21C27/24, (2006.01). Способ разрушения горного массива перекрестными резами № 2016120144; заявлено 24.05.2016; опубликовано 13.09.2017 / Л. И. Старков, **Д. И. Шишлянников**, Н. В. Чекмасов, А. Б. Максимов, Л. А. Лоскутов; заявитель ПНИПУ. Бюл. №26. – 9 с.

100. Патент **2652778** Российская Федерация, МПК E21C27/14 (2006.01). Исполнительный орган агрегата для проходческо-очистных работ: № 2017113633; заявлено 19.04.2017; опубликовано 28.04.2018 / Л. И. Старков, **Д. И. Шишлянников**, А. Б. Максимов, С. А. Лавренко; заявитель ПНИПУ. Бюл. №13. – 10 с.

101. Патент **2672071** Российская Федерация, МПК **E21C35/17 (2006.01)**. Самоустанавливающийся резец с устройством крепления на исполнительном органе машины: № 2018100204; заявл. 09.01.2018; опубл. 09.11.2018 / Л. И. Старков, **Д. И. Шишляников**, А. Б. Максимов, К. В. Биринцева; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 31. – 10 с.

102. Патент **2745841** Российская Федерация, МПК **E21C25/24 (2006.01)**. Исполнительный орган агрегата для проходческо-очистных работ: № 2020125436; заявлено 22.07.2020; опубликовано 01.04.2021 / **Д. И. Шишляников**, В. И. Шишляников, А. Л. Васильев; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 10. – 12 с.

103. Патент **2755106** Российская Федерация, МПК **E21C35/18 (2006.01)**. Составной резец с устройством крепления на исполнительном органе машины: № 2020141330; заявлено 14.12.2020; опубликовано 13.09.2021 / **Д. И. Шишляников**, А. Е. Суханов, А. Л. Васильев, А. В. Борисов, Д. С. Грибов; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 26. – 12 с.

104. Патент **2755193** Российская Федерация, МПК **E21C27/24 (2006.01)**. Исполнительный орган проходческо-очистного комбайна: № 2021101728; заявлено 26.01.2021; опубликовано 14.09.2021 / **Д. И. Шишляников**, А. Л. Васильев ; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 26. – 14. с.

105. **Пинский, В. Л.** Развитие техники и технологии добычи калийных руд в России / В. Л. Пинский // Горный журнал. – 2007. – № 8. – С. 13–17.

106. Подготовительные процессы: справочник по обогащению калийных руд / под ред. О. С. Богданова. – М. : Недра, 1982. – 367 с.

107. **Позин, Е. З.** Методические основы исследования процессов разрушения угля механическим способом // Разрушение углей и горных пород: научные сообщения. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1989. – С. 4–13.

108. **Позин, Е. З.** Измельчение углей при резании / Е. З. Позин, В. З. Меламед, С. М. Азовцева. – М. : Наука, 1977. – 139 с.

109. **Позин, Е. З.** Разрушение углей выемочными машинами / Е. З. Позин, В. З. Меламед, В. В. Тон. – М. : Недра, 1984. – 288 с.
110. **Покровский, Н. М.** Технология строительства подземных сооружений и шахт. Ч.1. – М.: Недра, 1977. – 400 с.
111. **Полянина, Г. Д.** Газы соляных пород и газопроявления в рудниках Верхнекамского месторождения/ Г. Д. Полянина // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 1995. – № 6. – С. 145–150.
112. **Полянина, Г. Д.** Научное обоснование и разработка безопасных методов ведения горных работ в соляных породах в условиях газовыделений и газодинамических явлений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Полянина Генриетта Даниловна. – Ленинград, 1990. – 40 с.
113. Проведение испытаний комбайна МВ 900 СМ с доработанным исполнительным органом и обоснование параметров его исполнительных и погрузочных органов : отчет о НИР / ООО «Канат»; рук. Трифанов Г. Д. ; исполн.: **Шишляников Д. И.** – Пермь, 2019. – 89 с.
114. Программно-регистрирующий комплекс «ВАТУР»: паспорт / сост. М. Г. Трифанов; ООО «РКЦ». – Пермь, 2015. – 8 с.
115. **Проскуряков, Н. М.** Физико-механические свойства соляных пород / Н. М. Проскуряков, Р. С. Пермяков, А. К. Черников. – Л.: Недра, 1973. – 271 с.
116. **Протасов, Ю. И.** Пылевыведение при разрушении горных пород / Ю. И. Протасов // Горный журнал. Известия ВУЗов. – 1993. – №1. – С. 51–53.
117. **Протодьяконов, М. М.** Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 76 с.
118. Проходческо-очистные комбайновые комплексы калийных рудников: учеб. пособие для машинистов горн. выемоч. машин. Ч.1 / Б. В. Васильев [и др.]. – Пермь : ПГТУ, 1998. – 275 с.
119. **Прушак, В. Я.** Методика расчета мощностного баланса проходческого комбайна с соосными роторами и комбинированными

исполнительными органами / В. Я. Прушак, Н. А. Высоцкая, Г. В. Казаченко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2017. – № 7. – С. 273–276.

120. Разработка мероприятий по увеличению крупных фракций каменной соли и проведение испытаний новой техники : отчет о НИР / ООО «РКЦ» ; рук. Трифанов Г. Д. ; исполн.: Чекмасов Н. В. [и др.]. – Пермь, 2006. – 50 с.

121. Разработка мероприятий по улучшению гранулометрического состава калийной руды, отделяемой от массива резцами исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов : отчет о НИР / ПНИПУ ; рук. Трифанов Г. Д. ; исполн.: Чекмасов Н. В. [и др.]. – Пермь, 2018. – 145 с.

122. Разработка основ расчета параметров новых выемочных машин по заданным технологическим требованиям : отчет о НИР : 6Б-1971 / ИГД им. А. А. Скочинского ; рук. Докукин А. В. ; исполн.: Фролов А. Г. [и др.]. – М., 1971. – 297 с.

123. Расчет эксплуатационных параметров проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд: метод. указ. / сост. Н. В. Чекмасов. – Пермь : Изд-во ПГТУ, 2003. – 31 с.

124. Региональный канатный центр. Режим доступа: <http://www.vetlan.ru/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.08.2021).

125. Результаты испытаний физико-механических свойств каменной соли: Отчёт/ Руковод. Ольховиков Ю. П – Пермь: УралВНИИГ, 1977. – 6 с.

126. Результаты обследования в условиях рудников СКРУ-3, БКПРУ-2, 4 основных источников образования труднообогатимой фракции менее 0,25 мм в сильвинитовой руде по основным этапам ее движения от забоя до обогатительной фабрики и их сравнительная оценка. Мероприятия для снижения массовой доли фракции менее 0,25 мм в руде, поступающей на фабрику : отчет о НИР / АО «ВНИИ Галургии» ; рук. Кекух С. Г. ; исполн.: Костикова О. А. [и др.]. – Пермь, 2017. – 50 с.

127. Резцы для горных машин. Режим доступа: <https://www.kopemash.ru/products/1/1138.html> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 03.09.2021).



128. **Ржевский, В. В.** Основы физики горных пород: Учебник для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М. : Недра, 1984. – 359 с.
129. **Родин, Р. А.** О механизме роста трещины при разрушении упруго-хрупкого тела / Р. А. Родин // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 1991. – № 10. – С. 5–12.
130. **Сальников, А. Ф.** Виброакустическая диагностика технических объектов / А. Ф. Сальников. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 247 с.
131. **Сафохин, М. С.** Горные машины и оборудование: Учеб. для ВУЗов / М. С. Сафохин. – М. : Недра, 1995. – 463 с.
132. **Светличный, Д. М.** Исследование пород Верхнекамского месторождения на одноосное сжатие, контактную прочность и абразивность / Д. М. Светличный, В. З. Деветьев, А. И. Уразова, Л. С. Шутов // Научные труды ПермНИУИ. – 1964. – № 7. – С. 37–44.
133. **Светличный, Д. М.** Техничко-экономическое обоснование применения выемочных машин на Верхнекамских калийных рудниках / Д. М. Светличный, В. З. Деветьев, Л. А. Леденцов // Научные труды ПермНИУИ. – 1965. – № 8. – С. 221–248.
134. **Седов, Л. И.** Механика сплошной среды. Т2. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 560 с.
135. **Семенов, В. В.** Обоснование и выбор параметров исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов нового поколения для добычи калийных руд: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Семенов Виктор Владимирович. – Тула, 2011. – 219 с.
136. **Семенов, В. В.** Установление связей предела прочности калийных руд на сжатие с показателями их сопротивляемости резанию / В. В. Семенов, И. Г. Шмакин, А. Б. Жабин, П. Н. Чеботарев // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 34–36.
137. **Семенов, В. В.** Обоснование параметров и выбор резцов планетарно-дискового исполнительного органа комбайна «Урал-20Р» /

В. В. Семенов, И. Г. Шмакин, А. Б. Жабин, И. А. Суров // Известия Тульского государственного университета. – 2009. – № 3. – С. 300–309.

138. **Семенов, В. В.** Обоснование рациональных параметров режущих органов комбайнов типа «Урал» / В. В. Семенов, И. Г. Шмакин // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 4. – С. 49–52.

139. **Семенов, В. В.** Проходческо-очистные комбайны «Урал» для добычи калийной руды и каменной соли / В. В. Семенов, М. А. Мальчер, В. П. Петров, С. П. Морозов // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 8. – С. 17–21.

140. **Семенов, В. В.** Совершенствование метода расчета нагруженности резцов при разрушении калийных руд / В. В. Семенов, И. Г. Шмакин, А. Б. Жабин и др. // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

141. **Сидякин, Д. А.** Обоснование параметров и конструкции шнекового грузчика проходческо-очистного комбайна / Д. А. Сидякин // Записки Горного института. – 2009. – Т. 181. – С. 138–140.

142. **Слепьян, Л. И.** Механика трещин: 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1990. – 296 с.

143. **Слободкин, М. И.** Основы аналитической теории резания углей / М. И. Слободкин. – М.: Углетехиздат, 1947. – 207 с.

144. Соловьев, В. А. Элементарные методы обработки результатов измерений / В. А. Соловьев, В. Е. Яхонтова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. – 72 с.

145. **Соловьев, В. А.** Разработка калийных месторождений : практикум / В. А. Соловьев, А. И. Секунцов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 265 с.

146. **Солод, В. И.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / В. И. Солод, В. Н. Гетопанов, В. М. Рачек. – М.: Недра, 1982. – 350 с.

147. **Солод, В. И.** Разрушение горных пород отрывом / В. И. Солод, В. И. Зайков, К. М. Первов // Исследование некоторых физических свойств горных пород: сб. тр. под ред. Ржевского В. В. – М.: Недра, 1967. – С. 18–25.

148. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика: справочник по обогащению калийных руд / под ред. О. С. Богданова. – М. : Недра, 1983. – 384 с.

149. **Старков, Л. И.** Развитие механизированной разработки калийных руд / Л. И. Старков, А. Н. Земсков, П. И. Кондрашев. – Пермь : ПГТУ, 2007. – 522 с.

150. **Старков, Л. И.** Исследование схемы перекрестного резания / Л. И. Старков, Н. А. Харламова // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 1997. – № 7–8. – С. 74–76.

151. **Старков, Л. И.** Устройство для крепления резца на исполнительном органе горного комбайна / Л. И. Старков, Д. И. Шишлянников, А. Б. Максимов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 3. – С. 60–64.

152. **Старовойтов, Ю. В.** Повышение надежности и эффективности использования высоконагруженного оборудования очистных комплексов на калийных рудниках: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Старовойтов Юрий Вячеславович – Солигорск, 2014. – 288 с.

153. **Сумканов, А. И.** Разработка методики оценки состояния оборудования очистных комплексов горных предприятий / А. И. Сумканов, В. В. Зотов, С. С. Кубрин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 10. – С. 260–264.

154. **Суханов, А. Е.** Обоснование параметров погрузочного оборудования проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» / А. Б. Максимов, А. Е. Суханов // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы XI Всероссийской конференции. – 2018. – С. 433–436.

155. **Сысоев, Н. И.** Научные основы выбора параметров высокоэффективных режущих инструментов горных машин / Н. И. Сысоев, Н. Н. Буренков, И. Я. Раков, С. Г. Мирный // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 10. – С. 13–20.

156. **Сысоев, Н. И.** Повышение эффективности функционирования очистных и бурильных машин дискретным управлением их режимными параметрами / Н. И. Сысоев, Д. А. Гринько, А. С. Кожевников // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 3. – С. 37–41.

157. **Сысоев, Н. И.** Очистной комбайн с мехатронным модулем управления режимными параметрами / Н. И. Сысоев, А. С. Кожевников // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 49–51.

158. **Тетерина, Н. Н.** Технология флотационного обогащения калийных руд / Н. Н. Тетерина, Р. Х. Сабилов, Л. Я. Сквирский. – Пермь : Соликамская типография, 2002. – 485 с.

159. **Титков, С. Н.** Обогащение калийных руд / С. Н. Титков, А. И. Мамедов, Е. И. Соловьев. – М. : Недра, 1982. – 216 с.

160. **Трифанов, Г. Д.** Исследование нагруженности и возможности прогнозирования энергоресурса приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» / Г. Д. Трифанов, А. А. Князев, Н. В. Чекмасов, Д. И. Шишляников // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 41–44.

161. **Трифанов, М. Г.** Оценка нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» для выбора технически обоснованных режимов работы в реальных условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Трифанов Михаил Геннадьевич. – Пермь, 2018. – 163 с.

162. **Трифанов, М. Г.** Средства объективного контроля, как инструмент повышения эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников / М. Г. Трифанов, Д. И. Шишляников // Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф.; Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2015. – СПб. – 2015. – Т. I. – С. 106–108.

163. **Уголкин, С. И.** Организация технического сервиса горно-шахтного оборудования производства ОАО «КМЗ» / С. И. Уголкин, В. П. Петров // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 8. – С. 50–53.

164. Усовершенствование применяемых и разработка новых систем разработки на Солигорском калийном руднике на базе новой техники : отчет о НИР : 50СТ-63 / ВНИИГ ; рук. Брусиловский Д. В. – Л., 1964. – 28 с.

165. **Финкель, В. М.** Физика разрушения. – М.: Металлургия, 1970 г. – 736 с.

166. **Хазанович, Г. Ш.** Актуальные направления научных исследований горнопроходческого оборудования / Г. Ш. Хазанович // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 2. – С. 41–45.

167. **Харламова, Н. А.** Влияние глубины и шага резания на энергоемкость разрушения и выход некондиционной мелкой фракции / Н. А. Харламова, В. Г. Зильбершмидт, М. Ф. Леонович // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 1997. – № 1–2. – С. 8–12.

168. **Харламова, Н. А.** Исследование механизма разрушения соляных горных пород резцовым инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11 / Харламова Нэлли Артемьевна. – Пермь, 1998. – 173 с.

169. **Харлампенкова, Ю. А.** Моделирование процессов пылеобразования и их влияние на дисперсный состав угольной пыли / Ю. А. Харлампенкова, Ю. Ф. Патраков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 45–49.

170. **Чекмасов, Н. В.** Исследование нагруженности приводов шахтных самоходных вагонов 5ВС-15М и ВС-30 / Н. В. Чекмасов, Д. И. Шишлянников, М. Г. Трифанов, В. А. Романов, М. А. Васильева // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – №3. – С. 143–149.

171. **Чекмасов, Н. В.** Оценка эффективности процесса разрушения калийного массива резцами исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» / Н. В. Чекмасов, Д. И. Шишлянников, М. Г. Трифанов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 103–107.

172. **Чекмасов, Н. В.** Обоснование направлений совершенствования проходческо-очистных комбайнов / Н. В. Чекмасов, В. А. Немцев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2005. – № 6. – С. 238–239.

173. **Чекмасов, Н. В.** Особенности расчета и увеличение производительности скребковых конвейеров проходческо-очистных комбайнов / Н. В. Чекмасов, А. Н. Чистяков, М. А. Мальчер, М. Г. Трифанов, В. В. Лаук // Горное оборудование и электромеханика. – 2006.–№ 7. – С. 8–10.

174. **Чекмасов, Н. В.** Повышение эффективности погрузки калийной руды при работе проходческо-очистных комбайнов / Н. В. Чекмасов, **Д. И. Шишляников**, В. М. Демин // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – № 6. – С. 4–10.

175. **Чекмасов, Н. В.** Способы и устройства для реализации процессов разрушения калийных пластов перекрестными резами / Н. В. Чекмасов, **Д. И. Шишляников** // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 2–5.

176. **Чупин, С. А.** Совершенствование технологии изготовления тангенциальных поворотных резцов / С. А. Чупин, В. И. Болобов, В. С. Бочков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017 – № 3. – С. 262–271.

177. **Чупин, С. А.** Исследование влияния термомеханической обработки материала державок поворотных резцов на его твердость / С. А. Чупин, В. И. Болобов, А. Б. Максимов // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 9. – С. 38–42.

178. **Шибанов, Д. А.** Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ-18Р/20К, для планирования технического обслуживания и ремонтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук./ Шибанов Даниил Александрович. – СПб.: НМСУ «Горный», 2015. – 21 с.

179. **Шишляников, Д. И.** Оценка нагруженности приводов комбайнов «Урал-20Р» при двухстадийной разработке забоя /

**Д. И. Шишляников**, М. Г. Трифанов, Г. Д. Трифанов // Записки горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 508–512. - DOI: 10.31897/PMI.2020.2.508.

180. **Шишляников, Д. И.** Обоснование рационального способа контроля параметров работы и технического состояния проходческо-очистных комбайнов калийных рудников / **Д. И. Шишляников**, Н. В. Чекмасов, М. Г. Трифанов, С. Л. Иванов, И. Е. Звонарев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 3. – С. 110–115.

181. **Шишляников, Д. И.** Выбор технически обоснованных режимов работы комбайнов «Урал» на основе оценки нагруженности их приводов в реальных условиях эксплуатации / **Д. И. Шишляников**, М. Г. Трифанов, Н. В. Чекмасов, С. Л. Иванов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 7. – С. 3–8.

182. **Шишляников, Д. И.** Гидропневмопривод горных машин: учеб. пособие / **Д. И. Шишляников**, В. Ю. Зверев, А. Ю. Микрюков, С. Л. Иванов, А. К. Муравский, Д. А. Шибанов – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. – 183 с.

183. **Шишляников, Д. И.** Исполнительный орган агрегата для проходческих и очистных работ / **Д. И. Шишляников**, А. Б. Максимов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 13–19.

184. **Шишляников, Д. И.** Использование регистраторов параметров работы проходческо-очистных комбайнов при прогнозировании газодинамических явлений на калийных рудниках / **Д. И. Шишляников** // Известия Урал. гос. горного ун-та. – 2016. – № 1 (41). – С. 106–111.

185. **Шишляников, Д. И.** Исследование процесса формирования необогатимых классов калийной руды при добыче, погрузке и транспортировании / **Д. И. Шишляников**, А. Б. Максимов, Г. Д. Трифанов, Н. В. Чекмасов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – № 2. – С. 231–243.

186. **Шишляников, Д. И.** Обеспечение надежной работы и эффективного сервиса проходческо-очистных комбайнов для добычи

калийных руд/ **Д. И. Шишляников** // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 7. – С. 103–109.

187. **Шишляников, Д. И.** Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников / **Д. И. Шишляников**, С. Л. Иванов, И. Е. Звонарев, В. Ю. Зверев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 116–124.

188. **Шишляников, Д. И.** Повышение эффективности работы проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд на основе информации о нагруженности их приводов/ **Д. И. Шишляников**, М. Г. Трифанов, А. К. Муравский, А. Ю. Микрюков, А. Е. Суханов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 97–105.

189. **Шишляников, Д. И.** Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров / **Д. И. Шишляников**, Н. В. Чекмасов, М. Г. Трифанов, В. В. Габов, С. Л. Иванов, С. А. Асонов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 4 (113). – С. 3–10.

190. **Шишляников, Д. И.** Развитие средств механизированной добычи калийных руд / **Д. И. Шишляников**, А. Б. Максимов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 15–21.

191. **Шишляников, Д. И.** Совершенствование органов разрушения проходческо-очистных комбайнов типа «Урал» / **Д. И. Шишляников** // Известия УГГУ. – 2017. – № 2 (46). – С. 71–74.

192. **Шишляников, Д. И.** Стенд для исследования процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийных солей перекрестными резами/ **Д. И. Шишляников** // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 88–91.

193. **Шмарьян, Е. М.** Исследование и разработка аппаратуры для непрерывной регистрации режимов эксплуатации горной техники /



Е. М. Шмарьян, А. И. Лепихов, Ю. А. Гавинский // Труды ИГД им. А. А. Скочинского. – 1979. – №172. – С. 48–54.

194. **Штокман, И. Г.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / И. Г. Штокман [и др.]. – М.: Недра, 1986. – 392 с.

195. **Яризов, А. Д.** Основы автоматики. Линейные непрерывные системы автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А. Д. Яризов. – М.: Изд-во МГИ, 1971. – С. 78.

196. **Ayhan, M.** Comparison of globoid and cylindrical shearer drums' loading performance / M. Ayhan, E. M. Eyyuboglu // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2006. – V. 106. – P. 51–56.

197. **Gao, K.** Model test of helical angle effect on coal loading performance of shear drum / Kuidong Gao, Changlong Du, Songyong Liu, Lin Fu – International Journal of Mining Science and Technology. – 2012. – V. 22. – P. 165–168.

198. **Lavrenko, S. A.** Energy efficient unit executive body for tunneling and cleaning operations / S. A. Lavrenko, **D. I. Shishljannikov**, A. B. Maksimov // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials. – 2018. – P. 287–292.

199. **Lavrenko, S. A.** Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines / S. A. Lavrenko, **D. I. Shishlyannikov** // MDPI. Applied sciences. – 2021. – 11. – 3444.

200. **Lavrenko, S. A.** Selecting technically justified operating modes of «Ural» combines on the basis of an evaluation of their driver load under real operating conditions / S. A. Lavrenko, **D. I. Shishljannikov**, M. G. Trifanov // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials. – 2018. – P. 301–308.

201. **Li, X.** A study on drum cutting properties with full-scale experiments and numerical simulations / Xuefeng Li, Shibo Wang, Shirong Ge, Reza Malekian // *Measurement*. – 2018. – V. 114. – P. 25–36.

202. **Liu, S.** Experimental research on wear of conical pick interacting with coal-rock / Songyong Liu, Huifu Ji, Xiaohui Liu, Hongxiang Jiang // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – V. 74. – P. 172–187.

203. **Liu, S.** Parameters analysis of shearer drum loading performance / Songyong Liu, Changlong Du, Zhang Jiajia, Jiang Hao // *Mining Science and Technology (China)*. – 2011. – V. 21. – P. 621–624.

204. **Shishlyannikov, D. I.** Determination of the operating time and residual life of self-propelled mine cars of potassium mines on the basis integrated monitoring data / **D. I. Shishlyannikov**, V. A. Romanov, I. E. Zvonarev // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 237 – P. 336–343.

205. **Shishlyannikov, D. I.** Diagnosis of mining and oilfield equipment by excited oscillations analysis technique/ **D. I. Shishlyannikov**, A. E. Pushkarev // *Journal of Physics : Conference Series* 1384 (2019) 012045 - DOI :10.1088/1742-6596/1384/1/012045.

206. **Shishlyannikov, D. I.** Improvement of rock-breaking tools of heading-and-winning machine of potash mines / **D. I. Shishlyannikov**, A. E. Suhanov // *Ural Mining Decade 2020. E3S Web of Conferences* 177, 03018 (2020) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017703018>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – Загл. с экрана.

207. **Shishlyannikov, D. I.** Determination of rational parameters of auger loaders of «Ural-20R» heading-and-winning machines / **D. I. Shishlyannikov**, D. A. Shibanov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 378 (2019) 012029 - DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012029.

208. **Shishlyannikov, D. I.** Improving quality of granulometric composition of potash ore produced by «Ural-20R» heading-and-winning machines/ **D. I. Shishlyannikov**, D. A. Shibanov // *IOP Conf. Series: Earth and*

Environmental Science 378 (2019) 012028 - DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012028.

209. **Shishlyannikov, D. I.** Investigation of the destruction process of potash ore with a single cutter using promising cross cutting pattern / **D. I. Shishlyannikov**, I. E. Zvonarev // Applied sciences. – 2021. – № 1. – T 11. – P. 1–11.

210. **Shishlyannikov, D. I.** Substantiation of the rational method to control the operating and technical-condition parameters of a heading-and-winning machine for potash mines / **D. I. Shishlyannikov**, N. V. Chekmasov, M. G. Trifanov, S. L. Ivanov, I. E. Zvonarev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2015. – № 44 (3). – P. 283–287.

211. **Shishlyannikov, D. I.** Use of heading-and-winning machine parameter loggers to predict gasdynamic phenomena at potash mines/ **D. I. Shishlyannikov**, A. E. Pushkarev // Journal of Physics : Conference Series 1384 (2019) 012046 - DOI:10.1088/1742-6596/1384/1/012046.

212. **Shishlyannikov, D. I.** "Ural-20R" combines loading drives evaluation in two-stage development of the face / **D. I. Shishlyannikov**, M. G. Trifanov, G. D. Trifanov // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 242. – P. 508–512.

213. **Sof'ina, N. N.** Diagnosis of mining and transport equipment of potash mines by excitation of resonant vibrations method / N. N. Sof'ina, **D. I. Shishlyannikov**, V. A. Romanov, S. L. Ivanov // Proceedings Of The Tula States University - Sciences Of Earth. – 2019. – Vol.1. – P. 174–184.

214. **Zvonarev, I. E.** Information and diagnostic tools of objective control as means to improve performance of mining machines / I. E. Zvonarev, **D. I. Shishlyannikov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – 177. – 012045.

215. **Zvonarev, I. E.** Efficiency increase of process of loading of potash ore while working with heading and winning machine «Ural-20R» / I. E. Zvonarev, **D. I. Shishlyannikov**, A. B. Maksimov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1118 (2018) 012053.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Технические характеристики комплекса «ВАТУР»

Таблица А.1 – Основные технические характеристики программно-регистрирующего комплекса «ВАТУР»

Напряжение питания	100...240 В, 50 Гц.
Количество каналов измерения напряжения	2
Количество каналов измерения силы тока	6
Количество каналов измерения линейного перемещения	1
Количество каналов измерения отклонения от вертикали	1
Частота опроса первичных преобразователей	400Гц...10 кГц
Гальваническая развязка измерительных входов тока и напряжения.	1500 В

Таблица А.2 – Погрешности измерительных каналов программно-регистрирующего комплекса «ВАТУР»

Наименование измерительного канала	Диапазон измерения	Первичный преобразователь			Вычислительный блок «ВАТУР»			Погрешность ИК
		Тип	Погрешность	Диапазон выходного сигнала	Диапазон входного сигнала	Погрешность	Диапазон выходного сигнала	
ИК напряжения	±1000 В	Прецизионный резистор С2-29В	0,3 % приведен.	±10В	±10В	0,5 % приведен.	±1000 В	1,1 % приведен.
ИК силы тока	±200 А	Токовые клещи АТА2504	2 % приведен.	±200 мВ	±200 мВ	0,5 % приведен.	±200 А	2,5 % приведен.
	±1000 А	Токовые клещи АТА2502	2 % приведен.	±100 мВ	±200 мВ	1,0 % приведен.	±1000 А	3,0 % приведен.
	±200 А	Шунт 75ШСМ-В 200А	0,5 % приведен.	±75 мВ	±200 мВ	1,3 % приведен.	±200 А	1,8 % приведен.
ИК линейного перемещения	0..200 м	Инкрементальный энкодер RSI 503	±1 импульс./ 1 оборот абсолютн.	2500 импульсов на 1 оборот	2500 импульсов на 1 оборот	0,5 % приведен.	0..200 м	1,0 % приведен.
ИК отклонение от вертикали	±1000мГ	Акселерометр ММА1270	3 % приведен.	2500 ± 750 мВ	2500 ±750 мВ	0,5 % приведен.	±1000 мГ	3,5 % приведен.

Таблица А.3 – Точность величин, рассчитываемых по значениям, измеренным комплексом «ВАТУР»

Наименование расчетной величины	Измерительный канал, участвующий в расчете			Диапазон расчетной величины	Погрешность
	Наименование	Диапазон измерения	Погрешность		
Эффективное значение переменного напряжения	ИК напряжения	$\pm 1000$ В	1,1 % приведен.	0..700 В	1,5 % приведен.
Эффективное значение силы переменного тока	ИК силы тока	$\pm 200$ А $\pm 1000$ А	3,0 % приведен.	0..140 А 0..700 А	3,0 % приведен.
Активная мощность трехфазной цепи	ИК напряжения	$\pm 1000$ В	1,1 % приведен.	0..300 кВт	3,5 % приведен.
	ИК силы тока	$\pm 200$ А	2,5 % приведен.		

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Форма отчета по результатам эксперимента

Дата записи замера \_\_\_\_\_ Марка комбайна \_\_\_\_\_ Номер комбайна \_\_\_\_\_

Таблица Б.1 – Горнотехнические условия работы комбайна

Наименование	Значение	Схема и геометрические параметры выработки
Рудник		
Номер участка		
Пласт		
Сопротивляемость руды резанию $A_p$ , Н/мм		
Номер выработки		
Площадь забоя, $m^2$		

Таблица Б.2 – Характеристики обследуемого комбайна

Привод	Характеристики приводного двигателя				Обозначение на схеме комбайна	Резцы		Площадь обрабатываемого участка забоя, $m^2$
	Марка двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, $мин^{-1}$	КПД		Тип	Схема расстановки	
Резцовые диски 1								
Резцовые диски 2								
Переносное вращение								
Бермовые фрезы 1								
Бермовые фрезы 2								
Отбойное устройство								

Таблица Б.3 – Параметры подключения регистрирующего комплекса «ВАТУР»

Обследуемый узел	Резцовые диски 1	Резцовые диски 2	Переносное вращение	Бермовые фрезы 1	Бермовые фрезы 2	Отбойное устройство	Напряжение, ввод № 1	Напряжение, ввод № 2	Ходовая часть
Тип датчика									
Номер канала									
Частота опроса датчика, Гц									

Таблица Б.4 – Энергетические и технические показатели работы комбайна

№ п/п	Время начала записи	$t$ , с	$L$ , м	$V$ , м/ч	$N_1$ , кВт	$N_2$ , кВт	$N_3$ , кВт	$N_4$ , кВт	$N_5$ , кВт	$N_6$ , кВт	$Q_k$ , т/мин	$H_w$ , кВт·ч/м <sup>3</sup>
1												
2												

$t$  – длительность записи, с;  $L$  – длина пройденного пути, м;  $V$  – скорость подачи комбайна на забой, м/ч;  $N_1$ – $N_6$  – средние значения мощностей, потребляемых двигателями комбайна (индекс соответствует каналу измерения), кВт;  $H_w$  – удельные энергозатраты при разрушении калийного массива резами исполнительных органов комбайна, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Таблица Б.5 – Энергетические показатели работы электродвигателей комбайна

Канал	Двигатели	Длительность записи				$\sigma_p$	$\cos\varphi$	$H_w$ , кВт·ч/м <sup>3</sup>
		$I_{cp}$ , А	$U_{cp}$ , В	$N_{cp}$ , кВт	$N_{max}$ , кВт			
1	Резцовые диски 1							
2	Резцовые диски 2							
3	Переносное вращение							
4	Бермовые фрезы 1							
5	Бермовые фрезы 2							
6	Отбойное устройство							

$I_{cp}$  – ток, потребляемый соответствующим двигателем, А;  $U_{cp}$  – напряжение в питающей сети, В;  $N_{cp}$  – средняя мощность, потребляемая соответствующим двигателем, кВт;  $N_{max}$  – максимальное значение мощности, потребляемой соответствующим приводом, кВт;  $\sigma_p$  – среднее квадратичное отклонение мощности, потребляемой соответствующим двигателем;  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности соответствующего двигателя

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Форма журнала экспериментального исследования

Таблица В.1 – Исходные данные

	Наименование параметра	Значение
1.	Номер пробы	
2.	Номер замера (испытания)	
3.	Пласт	
4.	Угол падения выработки, град	
5.	Площадь забоя, м <sup>2</sup>	
6.	Марка комбайна	
7.	Тип используемых на комбайне резцов	
8.	Марка бункера-перегрузателя	
9.	Марка самоходного вагона	
10.	Время прохождения комбайном контрольного участка пути, с	
11.	Длина контрольного участка пути комбайна, м	
12.	Скорость подачи комбайна на забой во время отбора пробы, м/мин	

Таблица В.2 – Результаты ситового анализа в шахтных условиях

	Масса, кг					Масса сокращенной пробы, кг
	Исходная масса пробы ( $m$ )	Класс руды «+40 мм» ( $m_{+40}$ )	Класс руды «-40+20 мм» ( $m_{-40+20}$ )	Класс руды «-20+10 мм» ( $m_{-20+10}$ )	Класс руды «-10 мм» ( $m_{-10}$ )	
Емкость 1						
Емкость 2						
Емкость 3						
Емкость 4						
Емкость 5						
Сумма $\sum m_i$						



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Акт о внедрении результатов диссертации ООО «ЕвроХим-Проект»

УТВЕРЖДАЮ  
 Руководитель Обособленного  
 подразделения в г. Пермь  
 ООО «ЕвроХим-Проект»  
 А.С. Мальцев  
 \_\_\_\_\_ 2021 г.  
 М.П.



## АКТ

использования результатов диссертационной работы  
 Шишлянникова Дмитрия Игоревича «Совершенствование оборудования и  
 режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников, как  
 энергоэффективных объектов функционирования»

Диссертационная работа Д.И. Шишлянникова передана в ООО «ЕвроХим-Проект».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования гранулометрического состава калийной руды при добыче проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р» представляют интерес для специалистов, задействованных в проектировании калийных рудников.

Полученные зависимости изменения гранулометрического состава калийной руды от конструктивных особенностей и режимных параметров работы проходческо-очистных комбайнов используются для разработки мероприятий, направленных на снижение пылеобразования при работе выемочных машин и повышение количества обогатимых классов в добываемой руде.

Предложенные Д. И. Шишлянниковым технические решения по совершенствованию породоразрушающих исполнительных органов, резцового инструмента и погрузочного оборудования комбайнов калийных рудников используются при формировании технических заданий на разработку новых конструкций проходческо-очистных комбайнов.

ООО «ЕвроХим-Проект»

Начальник отдела горного проектирования



А.В. Сенькин

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Акт о внедрении результатов диссертации ФГБУН «Горный институт УрО РАН»



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН «Горный институт УрО РАН»,  
докт. техн. наук, профессор  
И. А. Санфиоров  
» сентябрь 2021 г.

#### АКТ

использования результатов диссертационной работы  
Шишлянникова Дмитрия Игоревича «Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников, как энергоэффективных объектов функционирования»

Диссертационная работа Д. И. Шишлянникова передана в ФГБУН «Горный институт УрО РАН» и рассмотрена на заседании ученого совета.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийной руды резанием представляют научный интерес и могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих исполнительных органов комбайнов калийных рудников. Доказана перспективность применения схемы перекрестного резания при разрушении калийного массива.

Автором исследован процесс формирования нагрузок на приводах проходческо-очистных комбайнов при работе в условиях калийных рудников полным сечением исполнительных органов и при выполнении подрубки пласта. Получены зависимости изменения удельных затрат энергии и количества пылевидных труднообогатимых классов в добываемой калийной руде от режимных параметров работы комбайнов. Шишлянниковым Д.И. предложены методологические основы по оценке эффективности использования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников.

Разработанные автором решения по совершенствованию породоразрушающих исполнительных органов, резцового инструмента и погрузочного оборудования проходческо-очистных комбайнов могут быть использованы при создании перспективных добычных машин для калийной отрасли.

Заместитель директора по научной работе  
ФГБУН «Горный институт УрО РАН»,  
докт. техн. наук

  
/Л. Ю. Левин/



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Акт о внедрении результатов диссертации ООО «НПП «РОС»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

**Научно-производственное предприятие «РОС»**

614000, г. Пермь, ул. Пермская, 70, офис 408  
 ИНН / КПП: 5903027242 / 590201001  
 Р/с 40702810200490028294  
 Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москва  
 К/с 30101810145250000411  
 БИК 044525411  
 Тел. /факс (342) 212-89-07  
 E-mail: [ros@perm.ru](mailto:ros@perm.ru)  
<http://www.ros-diagnostics.ru>

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
**ШИШЛЯННИКОВА Дмитрия Игоревича**  
 на тему «Совершенствование оборудования и режимов работы  
 проходческо-очистных комбайнов калийных рудников, как энергоэффективных  
 объектов функционирования», выполненной на кафедре «Горная  
 электромеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский  
 политехнический университет»

Результаты диссертационной работы Шишлянникова Д.И. представляют научный и практический интерес для сотрудников ООО «НПП «РОС» и использованы при разработке программно-регистрирующих и диагностических комплексов, осуществляющих контроль параметров работы и оценку технического состояния добычных и транспортирующих машин калийных рудников.

Предложенные и опробованные доцентом Шишлянниковым Д.И. методологические подходы и способ контроля нагруженности приводов добычных машин позволяют оценить эффективность работы проходческо-очистных комбайнов с учетом специфики их функционирования в условиях калийных рудников.

Реализация научных разработок диссертационной работы Шишлянникова Д.И. обеспечивает повышение качества проектирования и эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов в калийной отрасли.

Директор ООО «НПП «РОС»



/ Н. Н. Софьина /

30. 08. 2021

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет», профессор, д.т.н.

Н.В. Лобов

2021 г.



АКТ

**внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы  
Шишлянникова Дмитрия Игоревича  
«Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-  
очистных комбайнов калийных рудников, как энергоэффективных  
объектов функционирования»**

Результаты диссертационной работы доцента Шишлянникова Дмитрия Игоревича по совершенствованию режимов работы и конструкций исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов калийных рудников использованы при разработке рабочих программ по дисциплинам «Горные машины и оборудование», «Техническое обслуживание и ремонт горных машин подземных разработок», «Горные машины для очистных и подготовительных работ».

Основные результаты диссертации доцента Шишлянникова Д.И. использованы при составлении методических указаний к лабораторным работам «Проходческо-очистной комбайн «Урал-10А». Часть I. Устройство и принцип действия», «Проходческо-очистной комбайн «Урал-10А». Часть II. Гидросистема и гидрооборудование» (опубликованы в издательстве ПНИПУ в 2014-2015 гг.).

Доцентом Шишлянниковым Д.И. подготовлено и опубликовано учебное пособие «Гидропневмопривод горных машин» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело», специализация «Горные машины и оборудование».

Заведующий кафедрой  
«Горная электромеханика»,  
д.т.н., профессор

 / Г. Д. Трифанов /

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Письмо об использовании результатов диссертации «*T Machinery a.s.*»



**T MACHINERY**  
CZECH REPUBLIC

Проректору по науке и инновациям  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский  
политехнический университет»,  
профессору В.Н. Коротаеву

Наш номер:  
D-S-20-040

Ваше письмо от/Ваш номер:

Исполнитель:  
machacek@tmachinery.cz

Ратишковице:  
14.04.2020

### Кас: Исполнительных органов комбайна MB 900 CM

#### Уважаемый Владимир Николаевич!

Проводимые в Вашем университете доцентом Дмитрием Игоревичем Шишлянниковым работы по обоснованию рациональных параметров исполнительных органов комбайнов калийных рудников представляют интерес для компании *T Machinery a.s.* (Чешская Республика).

Предложенные доцентом Д.И. Шишлянниковым технические решения по совершенствованию породоразрушающих исполнительных органов и погрузочного оборудования опытного проходческо-очистного комбайна MB 900 CM позволили обеспечить соответствие предсерийного образца комбайна техническому заданию.

Практический интерес для *T Machinery a.s.* представляют также экспериментальные исследования по оценке нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов, выполненные доцентом Д.И. Шишлянниковым в условиях рудников ПАО «Уралкалий».

С уважением,



Petr Macháček / Петр Махачек

Руководитель сервисного отдела

«T Machinery a.s.»

**T Machinery a.s.**, Bařovka 1285, 696 02 Ratiškovice  
+420 518 391 511 / IČ: 63478773 / DIČ: CZ63478773

**WWW.TMACHINERY.CZ**