

На правах рукописи

Шишлянников Дмитрий Игоревич



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

Специальность 05.05.06 – Горные машины

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

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Габов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

Андреева Людмила Ивановна

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ООО «Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства», отдел ремонта горной техники, руководитель отдела;

Жабин Александр Борисович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тулский государственный университет», кафедра геотехнологий и строительства подземных сооружений, профессор;

Воронова Элеонора Юрьевна

доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова», кафедра «Фундаментальные инженерные дисциплины», заведующая кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится 17 февраля 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 ноября 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 разветвленными 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 за-

данном 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 резами 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 резами 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 ком-

байна *МВ 900 СМ*; 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 заглабления резца в калийный массив при использовании перекрестной схемы резания находится в диапазоне $t/h_3 = 5 \dots 7$.

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 заглупления 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 подтверждается результатами экспериментальных исследований процесса резания калийной руды одиночным полно-размерным резцом, выполненными 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.

Апробация результатов

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. Результаты диссертации в достаточной степени освещены 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 (далее – Перечень ВАК), 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 с выводами по каждой из них, заключения, изложена на 273 страницах, содержит 112 рисунков, 16 таблиц, библиографический список из 215 наименований и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности выбранной темы и дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе дана характеристика калийных пластов как объектов разрушения. Приведены основные сведения о физико-механических свойствах соляных пород, особенностях их геологического строения, технологии добычи калийных руд; выполнен анализ конструктивных особенностей и тенденций развития проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд.

В калийной отрасли России в качестве добычных машин наибольшее применение нашли проходческо-очистные комбайны «Урал» производства АО «Копейский машиностроительный завод». В настоящее время данные комбайны являются наиболее приспособленными к условиям отечественных калийных рудников, в том числе и по сравнению с добычными машинами зарубежных производителей.

Комбайны «Урал» комплектуются пространственными планетарно-дисковыми исполнительными органами бурового типа (рисунок 1), осуществляющими разрушение массива расходящимися радиально направленными резами серповидной формы.

При этом шаг резания t и толщина стружки h изменяются в зависимости от угла поворота дисков φ_i (рисунок 2) согласно зависимостям (1) и (2)

$$h = 10^3 V_{\text{п}} \sin \varphi_i / (Z_{\text{д}} n_{\text{пер}}); \quad (1)$$

$$t = 2\pi (C - r_{\text{д}} \cos \varphi_i) n_{\text{пер}} / (Z_{\text{р}} n_{\text{отн}}), \quad (2)$$

где h – глубина резания, мм; $V_{\text{п}}$ – скорость подачи комбайна на забой, м/мин; φ_i – угол поворота диска, рад; $Z_{\text{д}}$ – количество резцовых дисков на исполнительном органе, шт.; $n_{\text{пер}}$ – частота переносного вращения резцовых дисков, об/мин; $n_{\text{отн}}$ – частота переносного вращения резцовых дисков, об/мин; t – шаг резания, мм; $r_{\text{д}}$ – радиус резцового диска, мм; C – радиус водила, мм; $Z_{\text{р}}$ – количество резцов на диске, шт.

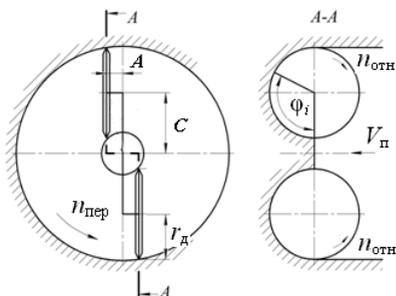


Рисунок 1 – Схема пространственного планетарно-дискового органа (A и C – конструктивные параметры)

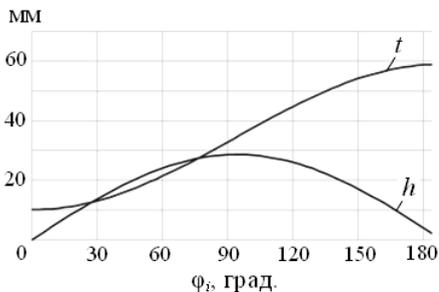


Рисунок 2 – Изменение шага резания и толщины стружки в зависимости от угла поворота диска

Существенным преимуществом пространственных планетарно-дисковых исполнительных органов является сосредоточение всей мощности приводов и напорного усилия на малом количестве резцов, попеременно находящихся в контакте с забоем, что особенно важно при разрушении крепких и вязких калийных руд. Однако изменение параметров резания в зависимости от угла поворота резцовых дисков обуславливает выход значительного количества пылевидных труднообогатимых классов крупностью менее 0,25 мм (класс «-0,25») в добываемой руде, определяет увеличение удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива.

В сравнении с угольными очистными комбайнами добычные машины калийных рудников характеризуются низкой степенью автоматизации работы приводов. Указанное обуславливает возникновение нерациональных режимов работы и сверхнормативных нагрузок. Например, анализ статистики возникновения аварийных отказов комбайнов «Урал», эксплуатирующихся на рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС), показывает, что свыше 30 % отказов при эксплуатации данных комбайнов возникают по причине перегрузок приводов исполнительных органов и нарушения технологии ведения горных работ.

В настоящее время отсутствуют научно-обоснованные методики оценки эффективности использования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников. Разработка и применение таких методик обеспечат выявление факторов, негативно влияющих на стабильность технологических процессов в очистной камере. Исследование величины и характера изменения нагрузок на приводы проходческо-очистных комбайнов в реальных условиях функционирования позволит обосновать энергоэффективные ре-

жимы работы добычных машин калийных рудников и разработать алгоритмы их автоматического управления.

Создание комбайнов с исполнительными органами нового технического уровня, характеризующимися высокой энергоэффективностью работы, может быть реализовано на основе результатов исследований процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийного массива резанием.

Во второй главе выполнен анализ основных представлений о разрушении калийных руд резанием, обоснованы рациональные параметры породоразрушающих исполнительных органов и рабочего оборудования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников, разработана методология оценки эффективности использования комбайнов калийных рудников в реальных условиях функционирования.

Разрушение калийных руд резанием является многофакторным, циклически повторяющимся случайным процессом чередования фаз контактного дробления руды и отделения крупных элементарных сколов от массива. Количественно данный процесс описывается статистическими характеристиками, определяющими изменчивость силовых параметров и энергетических показателей при заданных условиях реализации. Известно, что энергетические затраты процесса разрушения калийной руды резцом с площадками затупления складываются из следующих составляющих: диспергирование руды передней поверхностью резца при дроблении и образование ядра уплотнения – свыше 50 % энергии; диспергирование и вязкопластическое деформирование руды при трении о массив задней и боковых поверхностей резца – свыше 20 % энергии; образование магистральных трещин и отрыв элементов руды от массива – менее 1 %; упругая деформация руды и элементов добычной машины – менее 3 %. Таким образом, энергия контактного дробления и трения режущего инструмента о массив значительно превышает затраты энергии на образование магистральных трещин. Рациональным с энергетической точки зрения является процесс резания, при котором минимально отношение объема дробимой руды к объему крупных сколов.

Проанализируем основные особенности процесса формирования последовательных элементарных сколов, отделяющихся от массива при разрушении калийной руды резами с выровненной поверхности (рисунок 3). При контакте резца с разрушаемым массивом формируются две площадки: передняя, площадью $S_{\text{п}}$, которой резец дробит и скалывает породу, и задняя, площадью $S_{\text{з}}$, которой резец давит на дно реза. Площадь передней площадки резца определяется по формуле (3):

$$S_{\text{п}} = h_{\text{x,max}} b_{\text{р}} k_{\text{ф}} / \cos \gamma_{\text{р}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{x,max}}$ – высота контакта реза с породой по передней поверхности, мм; $\gamma_{\text{р}}$ – передний угол реза, град; $b_{\text{р}}$ – ширина режущей кромки, мм; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы, учитывающий влияние формы режущей кромки и передней поверхности на величину передней площадки.

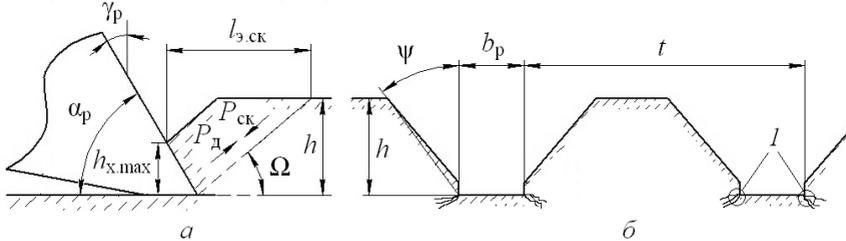


Рисунок 3 – Схема формирования элементарного скола калийной руды:
а – вид сбоку; б – фронтальный вид

Высота контакта h_{x} передней площадки реза с калийной рудой изменяется в процессе разрушения от нуля до некоторого максимального значения $h_{\text{x,max}}$, которое соответствует моменту отделения от массива крупного элементарного скола. При этом усилие $P_{\text{ск}}$, необходимое для скалывания крупного элемента, становится равным усилию дробления $P_{\text{д}}$ (4)

$$P_{\text{ск}} = P_{\text{д}}. \quad (4)$$

Чем раньше выполняется условие (4) при отделении крупных элементарных сколов от массива, тем ниже удельные затраты энергии процесса разрушения калийной руды в целом.

Отделение крупного скола от калийного массива осуществляется по трём плоскостям скалывания: двум боковым и нижней. Направление данных плоскостей определяется углом скола Ω и углами бокового развала ψ . Значение угла скола Ω коррелирует с углом резания используемого режущего инструмента и определяется по формуле (5)

$$\Omega = 97,8 - \mu(24,3 + 0,175\alpha_{\text{р}}) - 0,61\alpha_{\text{р}}, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{р}}$ – угол резания, град; μ – коэффициент трения калийной руды по передней поверхности реза, $\mu = 0,41 \dots 0,46$.

Величина угла бокового развала ψ определяется, прежде всего, вязко-пластичными свойствами руды и рассчитывается по формуле (6)

$$\psi = 90 - \psi_0 - 9h^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

где ψ_0 – величина, характеризующая вязкость руды, $\psi_0 = 25 \dots 30^\circ$.

При разрушении вязких калийных руд резцом с прямоугольной режущей кромкой борозды развала образуются не на всю глубину резцов (см. рисунок 3, б). Боковые поверхности резцов имеют выраженный изгиб и пересекаются с дном резцов под прямым углом. В местах пересечения боковых и нижних поверхностей резцов образуются зоны локализации наведенных трещин (см. рисунок 3, б, поз. 1), имеющих длину 5...10 мм и расположенных под углом 10...30° к плоскости резания, а на дне реза формируется слой нарушенной породы толщиной 1...2 мм.

Известно, что каждой глубине реза h соответствует такой диапазон значений шага резания t , при котором выход труднообогатимых классов руды и удельные энергозатраты процесса разрушения массива H_w имеют наименьшие значения. При использовании традиционных схем резания (последовательной и шахматной) значение рационального шага резания определяются выражением (7)

$$t_{\text{рац}} = b_p + (1,8...2,8)htg\psi \approx (2...4)h, \quad (7)$$

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

В технической литературе диапазон рациональных значений параметров резания калийного массива принято задавать отношением шага резания к толщине стружки t/h . Исходя из выражения (7), рациональное отношение $t/h=2...4$. Нестабильность параметров элементарных сколов обусловливает излишнее дробление руды, образование большого количества пылевидных классов и увеличение удельных затрат энергии процесса разрушения калийного массива.

Следует учитывать, что работа планетарно-дисковых исполнительных органов характеризуется переменным шагом резания t и толщиной стружки h по всей траектории резцов. В зависимости от угла поворота резцового диска φ_i будет изменяться и отношение t/h (рисунок 4, а). Поэтому обоснование рациональных параметров разрушения калийного массива планетарно-дисковыми исполнительными органами осуществляют по средним значениям шага резания и толщины стружки, то есть рациональное $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 2...4$.

Отметим, что при работе наиболее современных отечественных комбайнов «Урал-20Р-11/12» с номинальной производительностью 8 т/мин большая часть резцов осуществляется породоразрушающим инструментом резцовых дисков при мгновенных значениях t/h , находящихся вне диапазона рациональных величин (рисунок 4, а, позиция 1). Соответственно, при указанной производительности вне диапазона рациональных значений находится и отношение

средних параметров резания t_{cp}/h_{cp} (рисунок 4, б, поз. 1), что снижает эффективность использования рассматриваемых комбайнов.

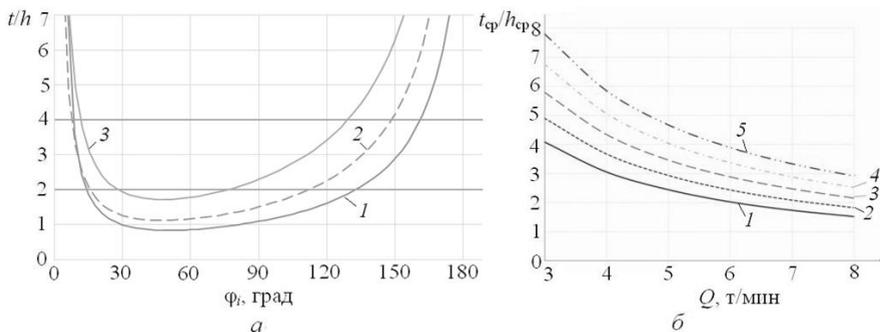


Рисунок 4 – Изменение параметров резания при работе дисков комбайна «Урал-20Р-11/12»: а – изменение отношения шага резания к толщине стружки t/h в зависимости от угла поворота резцового диска комбайна при заданной производительности Q комбайна: 1 – $Q=8$ т/мин; 2 – $Q=6$ т/мин; 3 – $Q=4$ т/мин; б – изменение отношения среднего шага резания к средней толщине стружки t_{cp}/h_{cp} в зависимости от производительности Q комбайна и частоты переносного вращения $n_{пер}$: 1 – $n_{пер}=4,2$ мин⁻¹; 2 – $n_{пер}=4,6$ мин⁻¹; 3 – $n_{пер}=5,0$ мин⁻¹; 4 – $n_{пер}=5,4$ мин⁻¹; 5 – $n_{пер}=5,8$ мин⁻¹

Достоинством планетарно-дисковых исполнительных органов горных комбайнов является возможность создания на поверхности разрушаемого забоя сетки пересекающихся резов. Таким образом реализуется перспективная перекрестная схема резания. Сотрудниками Пермского государственного технического университета Л. И. Старковым и Н. А. Харламовой выполнены сравнительные исследования по оценке эффективности шахматной, последовательной и перекрестной схем резания. Результаты экспериментальных исследований показали, что при реализации перекрёстного резания, по сравнению с шахматной схемой резания, на 30 % снижаются удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива и в 3...4 раза уменьшается выход мелких труднообогатимых классов руды.

Суть перекрестного резания заключается в следующем. Калийный массив послойно разрушается взаимно перпендикулярными резами (рисунок 5), направленными вдоль осей OX и OZ , с шагом резания t . Резы каждого обрабатываемого слоя заглублены относительно поперечных резов на заданную величину h_3 . Отделяемая от массива стружка (рисунок 5, а, позиция 2) имеет переменное сечение. Максимальная толщина среза h определяется выражением (8):

$$h = h_3 + h_b, \quad (8)$$

где h_3 – величина заглубления перекрёстных резов относительно дна резов отработанного слоя породы, мм; h_b – высота выступа, мм.

В сравнении с традиционными схемами резания при перекрёстной схеме механизм образования элементарных сколов, составляющих срез, имеет существенную отличительную особенность: резы каждого отработанного слоя формируют на забое поверхность сложной геометрической формы, характеризующуюся наличием регулярных устойчивых выступов, контуры которых образованы ранее реализованными резами. Геометрические параметры сформированной поверхности S_{ϕ} определяются шагом резания t величиной заглубления h_3 пересекающихся резов, шириной режущей кромки используемого резца b_p , в общем виде определяются выражением (9)

$$S_{\phi} = f(t, h_3, b_p). \quad (9)$$

Создание поверхности калийного массива, характеризующейся наличием концентраторов напряжений (рисунок 5, а) и областей ослаблений и трещиноватостей техногенного происхождения, обуславливает формирование на поверхности забоя участков руды, отделение которых от массива осуществляется единичными крупными сколами с устойчивыми значениями геометрических параметров как в продольном, так и в поперечном направлениях. Формирование регулярных сколов заданной формы и крупности, составляющих существенную часть добываемой руды, обуславливает уменьшение количества мелких труднообогатимых фракций в продуктах отбойки и снижение удельных энергозатрат процесса резания.

Сравнительная оценка эффективности использования комбайнов калийных рудников с исполнительными органами, реализующими различные схемы резания, возможна посредством соотнесения величин базовых (номинальных) и фактических энергетических показателей, характеризующих их работу.

Базовое значение удельных затрат энергии на разрушение массива резами проходческо-очистных комбайнов определяется по формуле (10)

$$H_{нб} = \Sigma N_{р.и.о.} / 60Q, \quad (10)$$

где $H_{нб}$ – базовое значение удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива резами комбайна, кВт·ч/т; $\Sigma N_{р.и.о.}$ – расчетная мощность приводных электродвигателей исполнительных органов, кВт; Q – техническая производительность комбайна, т/мин.

По результатам проведенного анализа для наиболее современных комбайнов «Урал-20Р-11/12» при производительности $Q = 8$ т/мин и сопро-

тивляемости резанию руды $A_p = 450$ Н/мм базовое значение удельных затрат энергии процесса разрушения массива составляет $H_{ис} = 1,16$ кВт·ч/т.

Фактические значения удельных затрат энергии для отдельного временного интервала работы комбайна находятся по формуле (11) на основании данных о расходе электрической энергии и массы руды, добытой за контролируемый период

$$H_{wф} = T \sum N_{ф.и.о.} / G, \quad (11)$$

где $H_{wф}$ – фактическая величина удельных затрат энергии процессов отбойки и погрузки калийной руды при работе проходческо-очистного комбайна в заданный период времени, кВт·ч/т; $\sum N_{ф.и.о.}$ – сумма средних за контролируемый период T значений мощностей приводов комбайна, кВт; G – масса добытой руды, т.

Путем отношения базовой величины удельных затрат энергии к фактической определяется коэффициент энергоэффективности использования комбайна $k_{э.эф.}$ (12):

$$k_{э.эф.} = H_{ис} / H_{wф}. \quad (12)$$

Удельные затраты энергии на разрушение калийного массива резами комбайнов определяются совокупностью влияющих факторов, индивидуальной для конкретных условий функционирования. Коэффициент энергоэффективности $k_{э.эф.}$ показывает, насколько текущее значение энергозатрат близко к базовой величине, а сравнительная оценка значений коэффициентов $k_{э.эф.}$ позволяет обосновать энергоэффективные режимы работы комбайна.

Уровень организации работ в очистной камере может быть оценен комплексным показателем сохранения эффективности – коэффициентом производительной работы $k_{п.р.}$, который рассчитывается по формуле (13) как отношение времени производительной работы комбайна к времени пребывания комбайна в работоспособном состоянии:

$$k_{п.р.} = \sum T_{п.р.} / (\sum T_{п.р.} + \sum T_{в.о.} + \sum T_{п.т.}) = \sum T_{п.р.} / (T_{э.к.} - \sum T_{р.п.} - \sum T_{р.а.}), \quad (13)$$

где $T_{э.к.}$ – время эксплуатации комбайна на руднике, ч; $\sum T_{п.р.}$ – суммарное время производительной работы комбайна, ч; $\sum T_{в.о.}$ – суммарное время выполнения вспомогательных операций при работе комбайна, ч; $\sum T_{п.т.}$ – суммарное время технологических перерывов, ч; $\sum T_{р.п.}$ – суммарное время плановых ремонтов, ч; $\sum T_{р.а.}$ – суммарное время ремонтных работ, вызванных аварийными отказами, ч.

Для всестороннего исследования многофакторного процесса разрушения калийного массива резами проходческо-очистных комбайнов и

подтверждения правильности выводов теоретических исследований необходимо провести экспериментальные исследования реального процесса резания калийной руды на лабораторном стенде и при работе комбайнов в реальных условиях функционирования.

В третьей главе приведено теоретическое описание процесса разрушения калийных руд перекрестными резами. Изложена методика и описан порядок проведения экспериментальных исследований процесса разрушения калийной руды одиночным резцом на лабораторном стенде. Выполнены анализ и сопоставление полученных результатов с результатами известных аналогичных исследований.

Известно, что процесс развития магистральных трещин, осуществляющих отделение крупных элементарных сколов от калийного массива, является случайным, многофакторным, локальным, структурно-чувствительным и определяется, прежде всего, процессами впереди и вблизи её вершины. Создание зон несплошностей или концентрации напряжений вблизи очага образования трещины влияет на процесс её дальнейшего развития. Рациональное расположение зон концентрации напряжений позволяет формировать траекторию движения трещины и осуществлять направленное разрушение калийного массива. На практике реализация данного положения возможна посредством создания рациональной формы поверхности разрушаемого массива (с наличием регулярных чередующихся выступов и областей ослаблений) при использовании перекрестной схемы резания.

Рассмотрим формирование последовательных элементарных сколов, составляющих срез, при разрушении калийного массива перекрестными резами (рисунок 6). Используемый инструмент – резец с плоской передней гранью и прямоугольной кромкой шириной b_p , угол резания α_p .

Резец движется со скоростью V_p в плоскости резания Z поперёк резов отработанного слоя руды, заглублен относительно них на величину h_3 . Резы ранее отработанного слоя массива создают на забое пересекающиеся зоны локализации наведенных трещин и концентрации напряжений. Рациональное расположение данных областей определяется шагом резания $t_{p.п.}$ сонаправленных и поперечных резов, образованных при отработке предыдущего слоя калийного массива.

При разрушении калийного массива перекрестными резами с шагом резания меньше или равным рациональному шагу перекрестных резов ($t \leq t_{p.п.}$) в области напряжённого состояния, формируемой резцом, создаются условия для встречного развития уже имеющихся в массиве «стартовых» трещин (трещины поперечного сдвига), локализованных по контуру основания каж-

дого сформированного выступа. Образование поверхностей элементарных сколов по уже имеющимся в массиве наведенным трещинам и областям концентрации напряжений обуславливает более раннее выполнение условия (4). По сравнению с традиционными схемами резания, при тех же значениях t и h , для отделения от массива крупного скола при перекрестном резании необходимо меньшее усилие, уменьшаются размеры зоны дробления и неупругого деформирования руды.

Рациональный шаг перекрестных резов определяется по формуле (14)

$$t_{\text{р.п.}} = l_{\text{э.ск}} + b_{\text{р}} = h_3 \cdot (tg\Omega + tg\alpha_{\text{р}}) + b_{\text{р}} \approx (5...7)h_3, \quad (14)$$

где h_3 – величина заглубления реза в калийный массив относительно резов предыдущего слоя, мм; $l_{\text{э.ск}}$ – максимальная длина элементарного скола в срезе при заданной толщине стружки и шаге перекрестных резов, мм; Ω – угол скола крупного элемента, имеющего длину $l_{\text{э.ск}}$, град; $\alpha_{\text{р}}$ – угол резания, град; $b_{\text{р}}$ – ширина режущей кромки реза, мм.

При перемещении реза на расстояние, равное шагу резания $t \leq t_{\text{р.п.}}$ неминуемо произойдет отделение от массива одного крупного скола (см. рисунок 6, а, б, поз. 1), то есть частота реализации крупных сколов устойчивой формы f_1 (Гц) при постоянной скорости движения реза $V_{\text{р}}$ рассчитывается по формуле (15):

$$f_1 = 1/T_1 = V_{\text{р}} / t, \quad (15)$$

где T_1 – время перемещения реза на расстояние, равное t , с.

Разрушение участков массива, расположенных между регулярными выступами, сформированными перекрестными резами, осуществляется промежуточными сколами (см. рисунок 6, б, поз. 2, 3, 4). Таких сколов может быть три или четыре. Количество промежуточных сколов, приходящихся на один крупный скол, определяется шириной режущей кромки $b_{\text{р}}$ и величиной заглубления h_3 реза в массив. Геометрические параметры промежуточных сколов случайны, формирование сопровождается дроблением и пластическим деформированием руды. Частота реализации промежуточных сколов f_2 (Гц) рассчитывается по формуле (16):

$$f_2 = 1/T_2 = V_{\text{р}} b_{\text{р}} / 3b_{\text{р}} h_3 = V_{\text{р}} / 3h_3, \quad (16)$$

где T_2 – время реализации промежуточных сколов, с.

Анализ результатов теоретического исследования процесса разрушения калийной руды перекрестными резами позволяет сформулировать гипотезу: *разрушение калийного массива перекрестными резами с реализацией наведенных трещин обуславливает снижение силовых параметров процесса*

резания за счет снижения удельных затрат энергии на образование и ветвление микротрещин и уменьшение дробления и пластического деформирования руды в предрезцовом пространстве.

Проверка гипотезы выполнена в ходе исследований процесса разрушения калийной руды одиночным резцом на лабораторном стенде.

Спроектированная автором стендовая установка (рисунок 7) состоит из сварной рамы 4, установленной на основании 8. На раме 4 жёстко закреплён силовой гидроцилиндр 5, соединенный с измерительным гидроцилиндром 3, на котором установлен резец 11. Подача рабочей жидкости в полости гидроцилиндра 5 осуществляется насосной станцией 1. Для обеспечения прямолинейного движения резца 11 в конструкции стенда предусмотрены три направляющих 6, по которым перемещаются роликоопоры 7 измерительного гидроцилиндра 3. Блок калийной руды 10 устанавливается на основании 8 и фиксируется в неподвижном положении зажимами 2 и 9. Шаг и глубина резания устанавливаются посредством перемещения блока 10. К измерительному цилиндру 3, давление в котором пропорционально силе резания $P_{\text{р}}$, подсоединен датчик давления. Скорость подачи резца 11 контролируется датчиком перемещения – энкодером. Информация с измерительных датчиков регистрируется и преобразуется многоканальным устройством-регистратором АЦП/ЦАП и обрабатывается на персональном компьютере посредством специализированного программного обеспечения с использованием известных методов математической статистики и спектрального анализа.

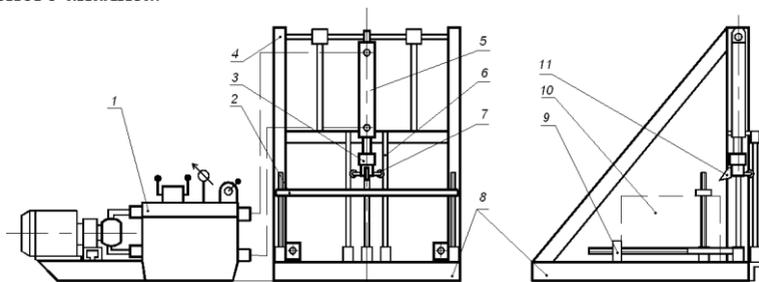


Рисунок 7 – Стенд для исследования процесса разрушения калийной руды одиночным резцом

Экспериментальные исследования проводились на блоках калийной руды размером 600×300×300 мм, взятых из пласта «Красный-П» ВМКМС, рудник БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий», сопротивляемость резанию

$A_p = 400 \dots 430$ Н/мм. Породоразрушающий инструмент – резец с плоской передней гранью и прямоугольной режущей кромкой. Ширина режущей кромки $b_p = 10$ мм, угол резания $\alpha_p = 50^\circ$, задний угол $\beta_p = 5^\circ$. Гидравлический привод резца обеспечивает среднюю скорость движения $V_p = 0,1$ м/с. Типы резов: с выровненной поверхности, шахматный и перекрёстный.

Анализ силовых параметров процесса разрушения калийной руды резами с выровненной поверхности выполнялся по трём осциллограммам (рисунок 8, а), полученным при $h = 10$ мм, $t/h > 7,2$.

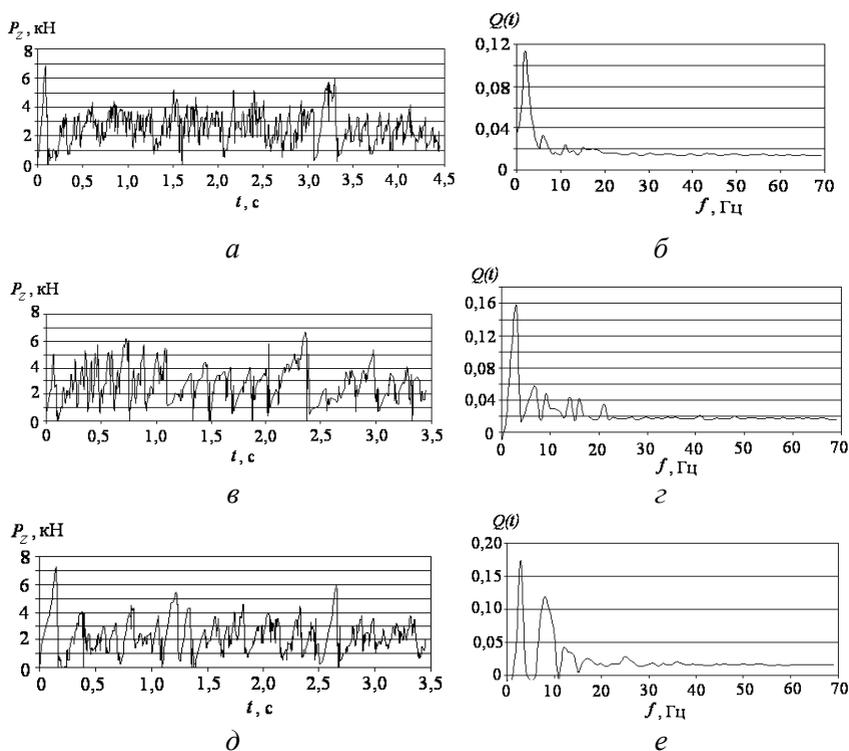


Рисунок 8 – Изменение силы резания P_z (а, в, д) и приведенной спектральной плотности $Q(t)$ силы резания (б, г, е) при разрушении блока калийной руды одиночным резцом: а, б – резы с выровненной поверхности; в, г – шахматные резы; д, е – перекрёстные резы

Среднее значение силы резания составило $m_{Pz} = 2400$ Н, что позволило, используя зависимость (17), определить сопротивляемость резания A_p испытуемого блока калийной руды

$$A_p = \frac{m_{pB}}{hk_b} = \frac{m_{pB}}{h(0,16 + 0,042b_p)} = \frac{2400}{10(0,16 + 0,042 \cdot 10)} = 414 \text{ Н/мм}, \quad (17)$$

где k_b – коэффициент влияния ширины режущей кромки резца.

Сравнение значения сопротивляемости резания A_p , полученного экспериментальным путем, с известными значениями, определёнными сотрудниками отраслевого института «ВНИИ Галургии» для сильвинита рудника БКПРУ-4, позволило говорить о высокой достоверности результатов эксперимента. Спектральная плотность позволяет судить о распределении силы резания по частотам. В рассматриваемом процессе спектр (рисунок 8, б) явно выделялся на частоте 2 Гц, что характеризует частоту образования крупных сколов в срезе.

Методикой исследований предусматривалось определение гранулометрического состава продуктов разрушения калийной руды резами с выровненной поверхности (таблица 1) и расчёт удельных энергозатрат процесса резания. Значение среднего квадратичного отклонения силы резания при разрушении образца калийной руды резами с выровненной поверхности при $h = 10$ мм составило $\sigma_{pB} = 1045,8$ Н. Удельные затраты энергии процесса разрушения калийной руды резами с выровненной поверхности $H_{ив} = 3,6$ кВт·ч/м³, что в целом соответствует результатам ранее выполненных аналогичных исследований.

Таблица 1 – Гранулометрический состав калийной руды, отделенной от образца при проведении стендовых испытаний

Граничные размеры частиц, мм	Массовое содержание фракций					
	Резы с выровненной поверхности		Шахматные резы		Перекрестные резы	
	грамм	%	грамм	%	грамм	%
≥ 5	56,46	71,91	124,0	75,99	99,40	72,92
3...5	3,20	4,07	5,60	3,43	6,30	4,81
1...3	9,60	12,22	14,55	8,92	12,80	9,78
0,5...1	3,60	4,58	8,40	5,15	6,07	4,64
0,25...0,5	2,77	3,53	5,82	3,57	4,13	3,15
≤ 0,25	2,90	3,69	4,80	2,94	2,23	1,70
Сумма	78,53	100	163,17	100	130,93	100

Исследование процесса разрушения калийной руды шахматными резами осуществлялось при $t = 35$ мм и величине заглупления реза в массив относительно резов отработанного слоя $h_3 = 5$ мм, то есть полная толщина стружки составляла $h = 10$ мм. Отчётные резы выполнялись с поверхности (предварительно сформированной), характерной для шахматной схемы резания. Анализ параметров процесса разрушения калийной руды шахматными резами проводился по трём осциллограммам, полученным при одинаковых условиях (рисунок 8, в). Среднее значение силы резания $m_{рн} = 2564,8$ Н, удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива шахматными резами $H_{вн} = 1,72$ кВт·ч/м³, что соответствует результатам известных аналогичных исследований.

Спектр силы резания (рисунок 8, з) выделяется на частоте 3 Гц и характеризует частоту образования крупных сколов в срезе. Значение среднего квадратичного отклонения силы резания при разрушении калийного массива шахматными резами с полной толщиной стружки $h = 10$ мм составило $\sigma_{рн} = 1300,3$ Н.

Результаты анализа гранулометрического состава калийной руды, отделённой от разрушаемого блока шахматными резами (таблица 1) показывают, 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 %.

Разрушение блока руды перекрёстными резами осуществлялось при $t = 35$ мм и величине заглупления реза в массив относительно поперечных резов $h_3 = 5$ мм. Полная толщина стружки $h = 10$ мм. Отчётные резы выполнялись с предварительно сформированной поверхности, характерной для перекрёстной схемы резания.

Анализ силовых параметров процесса разрушения калийной руды перекрёстными резами выполнялся по трём осциллограммам, полученным при одинаковых условиях (рисунок 8, д). Значение средней силы резания $m_{рн} = 1910$ Н, среднее квадратичное отклонение силы резания $\sigma_{рн} = 1093,2$ Н, удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива перекрёстными резами $H_{вн} = 1,46$ кВт·ч/м³.

Спектр силы резания (рисунок 8, е) при разрушении блока руды перекрёстными резами выделяется на частотах 3 и 7 Гц. Первый пик соответствует частоте образования крупных сколов устойчивой формы, второй – частоте формирования мелких промежуточных сколов. Гранулометрический состав продуктов разрушения блока руды перекрёстными резами приведен в табли-

це 1. Таким образом, при использовании перекрёстной 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 (18):

$$(1 - H_{\text{вп}} / H_{\text{вш}}) \cdot 100 \% = (1 - 1,46 / 1,72) \cdot 100 \% = 15 \%, \quad (18)$$

где $H_{\text{вп}}$ – удельные затраты энергии процесса разрушения калийного массива перекрёстными резами, кВт·ч/м³; $H_{\text{вш}}$ – удельные затраты энергии процесса разрушения массива шахматными резами, кВт·ч/м³.

Уменьшение массовой доли труднообогатимых классов крупностью «-0,25 мм» при реализации перекрёстной схемы по сравнению с шахматной составило (19):

$$(1 - M_{-0,25\text{п}} / M_{-0,25\text{ш}}) \cdot 100 \% = (1 - 1,70 / 2,94) \cdot 100 \% = 42 \%, \quad (19)$$

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 полученных результатов 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 последовательных элементарных 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 $t/h_3 = 5 \dots 7$.

Таким образом, *первое положение, выносимое на защиту, доказано.*

Снижение средних нагрузок на резец при использовании перекрёстной схемы резания по сравнению с шахматной схемой составило (20):

$$(1 - m_{\text{п}} / m_{\text{ш}}) \cdot 100 \% = (1 - 1910,0 / 2564,8) \cdot 100 \% = 34 \%, \quad (20)$$

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

Уменьшение среднего квадратичного отклонения силы резания по сравнению с шахматной схемой составило (21):

$$(1 - \sigma_{P_{II}} / \sigma_{P_{III}}) \cdot 100 \% = (1 - 1093,2 / 1300,3) \cdot 100 \% = 16 \%, \quad (21)$$

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

В соответствии с выражениями (15) и (16) частоты формирования крупных устойчивых (22) и мелких промежуточных (23) сколов составляют

$$f_1 = V_p / t = 0,1 / 0,035 = 2,86 \text{ Гц}; \quad (22)$$

$$f_2 = V_p / 3h_3 = 0,1 / 0,015 = 6,67 \text{ Гц}. \quad (23)$$

Рассчитанные значения частот близки к величинам, определённым экспериментально (см. рисунок 8, е), которые составили 3 и 7 Гц.

Полученные результаты показывают, что использование перекрестной схемы резания калийного массива обеспечивает снижение средних значений и средних квадратичных отклонений нагрузок на резцы на 34 и 16 %, соответственно, по сравнению с шахматной схемой резания. При разрушении калийного массива перекрестными резами реализуется устойчивая чередующаяся регулярность образования крупных сколов заданной формы и промежуточных сколов со случайными значениями геометрических параметров. Таким образом, *второе положение, выносимое на защиту, доказано.*

В четвертой главе изложена методика и приведены результаты исследования процесса формирования нагрузок приводов проходческо-очистных комбайнов при работе в условиях калийных рудников ВМКМС. Определено влияние параметров работы исполнительных органов на процесс формирования крупных сколов и пылевидных труднообогащаемых классов в добываемой руде. Выполнена оценка эффективности использования комбайнов «Урал-20Р-11» в реальных условиях эксплуатации.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием переносного программно-регистрирующего комплекса «ВАТУР» (рисунок 9) производства ООО «РКЦ» (г. Пермь). Комплекс «ВАТУР» имеет блочное исполнение, устанавливается на период измерений во взрывозащищенную магнитную станцию комбайна и регистрирует электрические параметры работы приводных двигателей по двум вводам напряжения. Для измерения активной мощности в трехфазной цепи применяется метод одного ваттметра с искусственным нулем. Прибор осуществляет 100 измерений в течение одного периода колебания напряжения питающей сети. В процессе первичной обработки данных вычислительным блоком прибора определяются эффек-

тивные значения тока и фазного напряжения, активная и полная мощности, коэффициент мощности, скорость подачи комбайна. Полученные значения регистрируются в энергонезависимой памяти. Анализ зарегистрированных данных проводился на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения «PC-BATUR».

Экспериментальные исследования процесса формирования нагрузок приводов проходческо-очистных комбайнов при отработке забоя полным сечением и при подрубке пласта проводились на комбайне «Урал-20Р-11» одного из рудников ВМКМС. Комбайн вел разработку пласта «Красный-П», угол наклона проводимой выработки составлял $+1^\circ$. В ходе выполнения измерений машинист задавал различные скорости подачи комбайна. На рисунке 10 представлены графики энергетических параметров работы приводных двигателей комбайна «Урал-20Р-11», соответствующие постоянной скорости подачи $V_{п} = 0,14$ м/мин.

По данным измерений определены средние значения активных мощностей приводов комбайна, средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации сигналов активных мощностей (таблица 2).

Таблица 2 – Средние значения активных мощностей двигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением

Обследуемые двигатели	Среднее значение активной мощности, кВт при скорости подачи:			Коэффициенты 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	$V_{п1}=0,10$ м/мин	$V_{п2}=0,12$ м/мин	$V_{п3}=0,14$ м/мин
Относительное вращение 1	85,1	101,0	126,3	0,11	0,10	0,16
Относительное вращение 2	83,7	98,0	123,5	0,08	0,09	0,15
Бермовый орган	83,4	110,5	147,3	0,18	0,15	0,14
Отбойное устройство	15,2	18,3	21,9	0,09	0,10	0,09
Переносное вращение	11,8	13,5	20,9	0,08	0,10	0,19
Конвейер	21,9	22,0	25,3	0,11	0,17	0,20

Функции изменения нагрузок на приводы породоразрушающих исполнительных органов проходческо-очистного комбайна «Урал-20Р-11» носят экспоненциальный характер (рисунок 11). Наиболее нагруженными

являются двигатели бермовых исполнительных органов. Разрушение калийного массива резами бермовых и шнековых исполнительных органов реализуется резами с малой толщиной стружки. Большая часть активной мощности двигателей бермовых фрез расходуется на погрузку и переизмельчение руды шнеками. Уровень динамических нагрузок, характеризуемый значением коэффициента вариации, для приводов бермовых исполнительных органов также является самым высоким по сравнению с остальными приводами комбайна. Данное явление обусловлено конструктивными особенностями шнековых грузчиков.

При скорости подачи $V_{п} = 0,14$ м/мин двигатели относительного вращения резовых дисков планетарных исполнительных органов загружены соответственно на 74 и 72 %. Разность значений величин мощности указанных приводов при работе комбайна «Урал-20Р» полным сечением может достигать 10 %, что обуславливается, как правило, их техническим состоянием.

Двигатели отбойного устройства, переносного вращения и конвейера при подаче комбайна на забой со скоростью $V_{п} = 0,14$ м/мин загружены соответственно на 44,2, 25,6 и 51,0 %. Значительное недоиспользование активной мощности двигателей определяет увеличение реактивной составляющей мощности, негативно влияющей на характеристики шахтной сети.

Исследование работы комбайна неполным сечением исполнительного органа проводилось при работе на подрубке пласта «Красный-II», угол наклона выработки составлял $+2^{\circ}$, площадь забоя $5,5 \text{ м}^2$. Графики изменения активных мощностей приводных двигателей комбайна «Урал-20Р-11» представлены на рисунке 12. Средняя скорость подачи составляла 0,40 м/мин. Машинист ограничивал скорость подачи, ориентируясь на показания токовых индикаторов нагрузки двигателей.

Анализ полученных результатов показывает, что активная мощность двигателей бермовых фрез превышает номинальное значение. Наиболее существенное увеличение уровня вариативности нагрузок наблюдается на приводах относительного и переносного вращения резовых дисков планетарных исполнительных органов. Значения средних квадратичных отклонений мощностей указанных приводов увеличились в 2,3...2,5 раза по сравнению с режимом обработки забоя сплошным сечением (таблица 3). Скорость подачи комбайна превышала допустимое значение по критерию максимально допустимой толщины стружки.

Штатные системы управления и индикации комбайна не позволяют контролировать величину динамических составляющих нагрузок на приводы и наличие локальных перегрузок, что зачастую приводит к ускорен-

ному расходу ресурса и возникновению аварийных отказов комбайнов при работе неполным сечением исполнительных органов.

Таблица 3 – Средние значения активных мощностей двигателей комбайна «Урал-20Р-11» при обработке забоя неполным сечением

Обследуемые двигатели	Среднее значение активной мощности N_a (кВт)	Среднее квадратичное отклонение σ_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

По фактическим данным, полученным путем регистрации параметров работы приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р-11», определены слагаемые общего времени эксплуатации добычной машины. Длительность рассмотренного интервала – 26 суток. Анализ данных непрерывной регистрации нагрузок приводов комбайна позволил определить общее время работы комбайна, время его производительной работы, интервалы выполнения отдельных технологических операций.

Путем соотнесения полученных значений с календарным временем в соответствии с выражением (13) определены коэффициенты производительной работы за каждые сутки рассмотренного периода (рисунок 13).

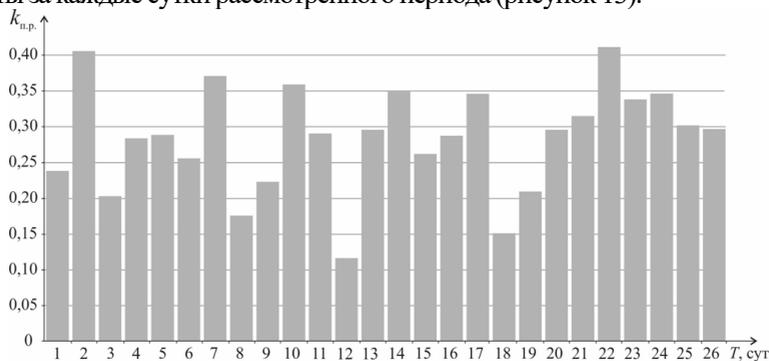


Рисунок 13 – Значения коэффициента производительной работы комбайна «Урал-20Р-11»

Значение коэффициента производительной работы за весь рассматриваемый период $k_{пр.} = 0,29$.

Фактические значения удельных энергозатрат процесса разрушения калийного массива исполнительными органами комбайна «Урал-20Р» для отдельного временного интервала его работы находятся на основании данных о расходе электрической энергии и массы отбитой за этот период калийной руды. В соответствии с выражениями (11) и (12) определяется коэффициент энергоэффективности использования проходческо-очистного комбайна $k_{э.эф.}$ (таблица 4).

Таблица 4 – Значения коэффициентов энергоэффективности при работе комбайна в различных горнотехнических условиях

Работа комбайна в ходе замера	Площадь сечения забоя, м ²	Производительность, т/мин	Удельные затраты эл. энергии, кВт·ч/т	Коэфф. эн.эффekt., $k_{э.эф.}$
Отработка камеры глухим забоем	15,5	5,9	1,33	0,87
Отработка камеры глухим забоем	15,5	6,8	1,20	0,97
Отработка камеры вторым ходом (подрубка пласта)	6,2	3,4	1,78	0,65
Отработка камеры глухим забоем	15,5	4,5	1,49	0,78

Из изложенного следует, что предложенные методика и программно-регистрающее оборудование позволяют определить количественные значения комплексных показателей эффективности функционирования проходческо-очистных комбайнов, характеризующих технический и технологический уровень их использования в условиях калийных рудников.

Таким образом, *третье положение, выносимое на защиту, доказано.*

Результаты определения гранулометрического состава проб калийной руды, отобранных в ходе проведения экспериментальных исследований, позволили установить зависимости содержания труднообогатимых классов «<0,25 мм» $M_{0,25}$ от производительности Q комбайна «Урал-20Р-11» (рисунок 14, а). Минимальные значения $M_{0,25}$ достигаются при $Q = 6,0 \dots 6,5$ т/мин ($V_{II} = 0,18 \dots 0,20$ м/мин). Повышение производительности комбайна свыше 7 т/мин сопровождается увеличением массовой доли труднообогатимых классов «<0,25 мм» в добываемой руде.

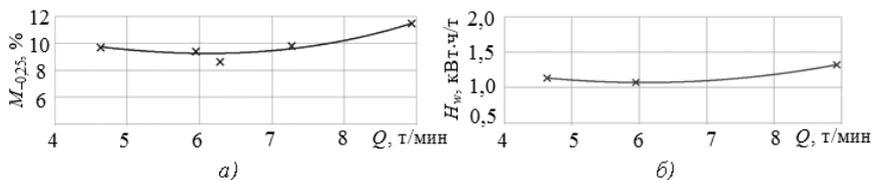


Рисунок 14 – Зависимости содержания труднообогатимых классов частиц $M_{0,25}$ в руде (а) и удельных энергозатрат разрушения калийного массива H_w (б) от производительности комбайна Q

Как указывалось выше, на гранулометрический состав калийной руды при разрушении массива резанием оказывает влияние глубина реза h , каждому значению которой соответствует рациональный шаг резания t . Рациональные параметры резания определяются отношением $t_{cp}/h_{cp} = 2 \dots 4$. Согласно графику 1, представленному на рисунке 4, б, указанному диапазону рациональных значений отношения t_{cp}/h_{cp} планетарно-дискового органа соответствует область значений производительности комбайна $Q=3 \dots 6$ т/мин. Повышение технической производительности Q комбайна обуславливает смещение отношения t_{cp}/h_{cp} к нижней границе диапазона рациональных значений и за его пределы. Существенная часть забоя (40...50 %) при производительности комбайнов «Урал-20Р-11» $Q > 6$ т/мин разрушается при отношении шага к глубине резания планетарно-дискового органа $t/h < 2$. При этом режцовые диски разрушают забой с практически выровненной поверхности, что обуславливает уменьшение сечения стружки, увеличение количества мелких промежуточных сколов и повышение выхода труднообогатимых классов руды крупностью «-0,25 мм».

По результатам замеров, выполненных с использованием программно-регистрающего комплекса «ВАТУР», определены удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива резами комбайнов «Урал-20Р-11» (рисунок 14, б). Анализ полученных результатов показывает существование корреляции между количеством труднообогатимых классов в калийной руде и величиной удельных энергозатрат процесса разрушения массива резами комбайнов «Урал-20Р-11»: минимальному количеству пылевидных классов $M_{-0,25}$ соответствует минимум удельных затрат энергии H_w .

В пятой главе на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований обоснованы энергоэффективные режимы работы комбайнов «Урал-20Р-11», разработан алгоритм управления приводами комбайнов с планетарно-дисковыми исполнительными органами,

предложена конструкция пространственного планетарно-дискового исполнительного органа, реализующего перекрестную схему резания.

Как указывалось выше, минимальные энергозатраты процесса разрушения калийного массива резами проходческо-очистных комбайнов «Урал» и наименьший выход труднообогатимых мелких классов руды обеспечиваются в диапазоне параметров резания $t/h=2\dots4$. При этом шаг резания t и толщина стружки h (для планетарно-дисковых исполнительных органов их средние значения $t_{\text{ср}}$ и $h_{\text{ср}}$, соответственно) являются основными режимными параметрами породоразрушающих исполнительных органов. Указанное подтверждается сопоставлением результатов расчетов и экспериментальных исследований, приведенных на рисунках 4 и 14.

Анализ выражений (1) и (2), а также данных о нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р-11» показывает, что изменение шага резания t и толщины стружки h , а также их средних значений в процессе работы планетарно-дисковых исполнительных органов возможно посредством регулирования частоты переносного вращения $n_{\text{пер}}$ резовых дисков. На рисунке 4 представлены графики изменения отношения средних значений шага резания и толщины стружки $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}}$ для планетарно-дискового исполнительного органа комбайна «Урал-20Р-11» при производительности комбайна $Q=3\dots8$ т/мин и частотах переносного вращения резовых дисков $n_{\text{пер}}=4,2\dots5,8$ мин⁻¹.

Под руководством автора разработан алгоритм управлениями приводами планетарно-дисковых исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р», принцип которого заключается в следующем. При работе комбайна с заданной производительностью при постоянном значении частоты относительного вращения резовых дисков $n_{\text{отн}} = \text{const}$ регулируется частота переносного вращения резовых дисков $n_{\text{пер}} = \text{var}$, что изменяет параметры резания $t_{\text{ср}}$ и $h_{\text{ср}}$. Искомая частота $n_{\text{пер}}$ определяется рациональным значением отношения шага резания к толщине стружки $t_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 2\dots4$ (см. рисунок 4, б, поз. 2–5), при этом обеспечиваются близкие к минимальным удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива. Определение искомой частоты переносного вращения резовых дисков $n_{\text{пер}}$ осуществляется последовательным сравнением средних значений (за период переносного вращения) активных мощностей приводов резовых дисков при различных частотах переносного вращения. Оценка и регулирование параметров резания осуществляются при постоянной скорости подачи и установившемся режиме работы комбайна.

Таким образом, четвертое положение, выносимое на защиту, доказано.

Реализация перспективной перекрестной схемы резания возможна посредством использования планетарно-дисковых исполнительных органов с разнонаправленным вращением резцовых дисков (рисунок 15).

Исполнительный орган, разработанный при участии автора, состоит из дисков 1 и 3, вращающихся в противоположные стороны и установленных под углом к плоскости симметрии 2, образованной продольной осью органа разрушения и прямой, проведенной через центры резцовых дисков. Резцы диска 1 реализуют тангенциально-радиальные резы от периферии к центру забоя. Резцы поворотного диска 3 разрушают массив последовательными радиально-тангенциальными резами, направленными от центра к периферии забоя. Вращающий момент на диски 1 и 3 с резами 7 передается раздаточным редуктором 4 и поворотными редукторами 5. Центральная часть забоя обрабатывается забурником 6. Разнонаправленное относительное вращение и переносное движение наклонно установленных дисков обеспечивают создание на поверхности калийного массива сетки пересекающихся резов (рисунок 16).

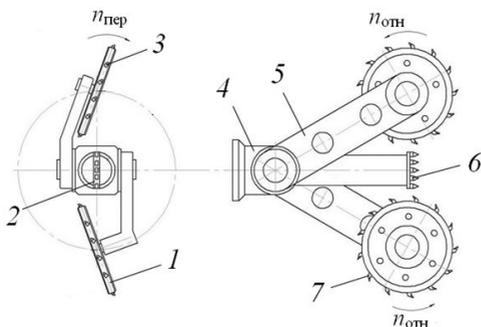


Рисунок 15 – Пространственный планетарно-дисковый исполнительный орган, реализующий перекрестную схему резания

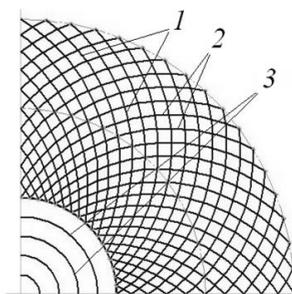


Рисунок 16 – Схема резания планетарно-дискового исполнительного органа с разнонаправленным вращением дисков: 1, 2 – резы дисков; 3 – резы забурника

Внедрение в производство предлагаемого исполнительного органа обусловит создание проходческо-очистных комбайнов нового поколения, обеспечивающих снижение удельного расхода энергии и минимизацию выхода мелких труднообогатимых классов «<0,25» при добыче калийной руды. Существенным достоинством предложенного технического решения являются минимальные конструктивные отличия от исполнительных

органов комбайнов, серийно выпускаемых отечественными предприятиями горного машиностроения.

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 $t/h = 5...7$ 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 заглупления резца в массив относительно поперечных резов.

4. Экспериментально определены величины и характер изменения нагрузок приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» при отра-

ботке 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 подачи 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 $t_{cp}/h_{cp} = 2 \dots 4$, и производительности комбайна $Q = 6,0 \dots 6,5$ т/мин.

8. Разработана методология выбора энергоэффективных режимов работы и совершенствования оборудования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников с учетом установленных закономерностей процесса от-

деления 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 резовых дисков устанавливать частоту переносного вращения резовых дисков по критерию обеспечения минимума удельных затрат энергии и осуществлять поддержание рационального отношения среднего шага резания к средней толщине стружки в диапазоне $t_{cp}/h_{cp} = 2 \dots 4$. 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Шишлятников, Д. И.** Стенд для исследования процесса формирования последовательных элементарных сколов при разрушении калийных солей перекрестными резами / Д. И. Шишлятников // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 88–91.

2. **Шишлятников, Д. И.** Совершенствование органов разрушения проходческо-очистных комбайнов типа «Урал» / Д. И. Шишлятников // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – № 2. – С. 71–74.

3. **Шишлятников, Д. И.** Развитие средств механизированной добычи калийных руд / Д. И. Шишлятников, А. Б. Максимов // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 15–21.

4. **Шишлятников, Д. И.** Повышение эффективности работы проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд на основе информации о нагруженности их приводов / Д. И. Шишлятников, М. Г. Трифанов, А. К. Муравский, А. Ю. Микрюков, А. Е. Суханов // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 97–105.

5. **Шишлятников, Д. И.** Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров / Д. И. Шишлятников, Н. В. Чекмасов, М. Г. Трифанов, В. В. Габов, С. Л. Иванов, С. А. Асонов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 3–10.

6. **Шишлятников, Д. И.** Использование регистраторов параметров работы проходческо-очистных комбайнов при прогнозировании газодинамических явлений на калийных рудниках / Д. И. Шишлятников // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 1. – С. 106–111.

7. **Шишлятников, Д. И.** Исполнительный орган агрегата для проходческих и очистных работ / Д. И. Шишлятников, А. Б. Максимов // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 13–19.

8. **Шишлятников, Д. И.** Выбор технически обоснованных режимов работы комбайнов «Урал» на основе оценки нагруженности их приводов в реальных условиях эксплуатации / Д. И. Шишлятников, М. Г. Трифанов, Н. В. Чекмасов, С. Л. Иванов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 7. – С. 3–8.

9. **Шишлятников, 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.

10. **Шишляников, Д. И.** Обеспечение надежной работы и эффективного сервиса проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд / Д. И. Шишляников // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 7. – С. 103–109.

11. 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.

12. 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.

13. Чекмасов, Н. В. Оценка эффективности процесса разрушения калийного массива резами исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» / Н. В. Чекмасов, **Д. И. Шишляников**, М. Г. Трифанов // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 103–107.

14. 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.

15. Старков, Л. И. Устройство для крепления реза на исполнительном органе горного комбайна / Л. И. Старков, **Д. И. Шишляников**, А. Б. Максимов // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 3. – С. 60–64.

16. 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.

17. 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.

18. Максимов, А. Б. Повышение качества гранулометрического состава калийной руды, добываемой проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р» / А. Б. Максимов, **Д. И. Шишляников** // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4. – С. 4–11.

19. Максимов, А. Б. Определение рациональных параметров шнековых грузчиков проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» / А. Б. Максимов,

Д. И. Шишляников, Н. В. Чекмасов // Известия УГГУ. – 2019. – № 2. – С. 97–101.

20. 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. Шишляников** // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 8. – С. 42–43.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

21. **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. – 2019. – 1384. – 012046 (Scopus).

22. **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. – 2019. – 378. – 012028 (Scopus).

23. **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. – 2019. – 378. – 012029 (Scopus).

24. **Shishlyannikov, D. I.** The research of forming of nonconcentratable ore grades during mining, loading and transportation operations / D. I. Shishlyannikov, A. B. Maksimov, G. D. Trifanov, N. V. Chekmasov // Proceedings Of The Tula States University-Sciences Of Earth. – 2019. – Vol.2. – P. 231–243 (Web of Science).

25. **Shishlyannikov, D. I.** Improvement of rock-breaking tools of headingand-winning machine of potash mines / D. I. Shishlyannikov, A. E. Suhanov // Ural Mining Decade 2020.E3S Web of Conferences. – 2020. – 177. – 03018 (Scopus).

26. **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. – 2019. – 1384. – 012045 (Scopus).

27. **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 (Scopus, Web of Science).

28. **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 (Scopus, Web of Science).

29. Sofina, N.N. Diagnosis of mining and transport equipment of potash mines by excitation of resonant vibrations method / N. N.Sofina, **D. I. Shishlyannikov**, V. A. Romanov, S. L. Ivanov // Proceedings Of The Tula States University - Sciences Of Earth. – 2019. – Vol.1. – P. 174–184 (Web of Science).

30. 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 (Scopus).

31. 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. – 2018. – 1118. – 012053 (Scopus).

32. 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 (Scopus).

Патенты:

33. 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. Шишлянников**, В. И. Шишлянников, А. Л. Васильев; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 10. – 12 с.

34. Патент 2720863 Российская Федерация, МПК E 21 C41/20 (2006.01). Способ разработки пологих пластов калийных солей комбайновыми комплексами: № 2019122555; заявлено 15.07.2019; опубликовано 13.05.2020 / **Д. И. Шишлянников**, В. А. Романов, М. С. Озорнин; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 14. – 7 с.

35. Патент 2672071 Российская Федерация, МПК E21C35/17 (2006.01). Самоустанавливающийся резец с устройством крепления на исполнительном органе машины: № 2018100204; заявл. 09.01.2018; опублик. 09.11.2018 / Л. И. Старков, **Д. И. Шишлянников**, А. Б. Максимов, К. В. Биринцева; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 31. – 10 с.

36. 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. Шишлянников**, А. Л. Васильев; заявитель АО «ВНИИ «Галургии». Бюл. № 26. – 14 с.

37. 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.

38. 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. Шишляников**, Н. В. Чекмасов, А. Б. Максимов, Л. А. Лоскутов; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 26. – 9 с.

39. 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.

40. 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. Шишляников**; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 19. – 7 с.

41. 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. Шишляников**; заявитель АО «Сильвинит». Бюл. № 34. – 7 с.

Учебные и методические пособия:

42. Гидропневмопривод горных машин: учебн. пособие / **Д. И. Шишляников**, В. Ю. Зверев, А. Ю. Микрюков, С. Л. Иванов, А. К. Муравский, Д. А. Шибанов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. – 183 с.

43. Горные машины и оборудование: проходческо-очистной комбайн «Урал-10А». Ч.1: Устройство и принцип действия: метод. указания к лаб. раб. / **Д. И. Шишляников**, Н. В. Чекмасов – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – 27 с.

44. Горные машины и оборудование: проходческо-очистной комбайн «Урал-10А». Ч.2: Гидросистема и гидрооборудование: метод. указания к лаб. раб. / **Д. И. Шишляников**, Н. В. Чекмасов, М. Г. Трифанов – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 19 с.

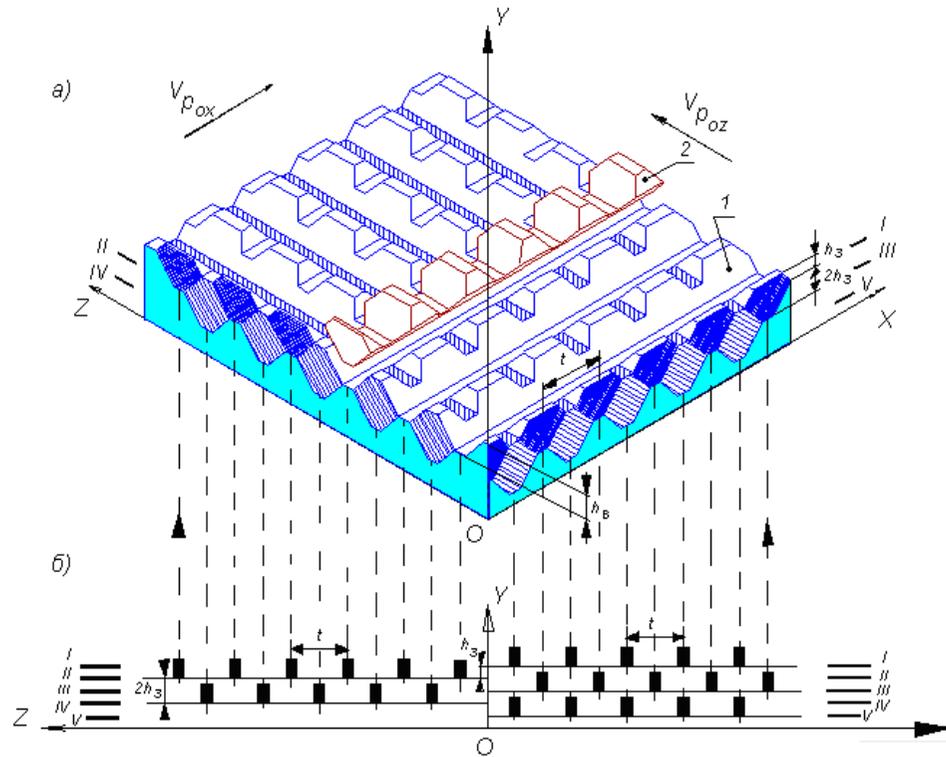


Рисунок 5 – Схема процесса разрушения калийного массива перекрёстными резами: а – структура поверхности калийного массива, разрушаемого перекрёстными резами: 1 – калийный массив; 2 – стружка переменного сечения, отделяемая от массива; $V_{p_{ox}}$ и $V_{p_{oz}}$ – скорости резания в направлениях вдоль осей OX и OZ соответственно; б – порядок отработки забоя и схема расстановки резцов добычной машины: I, II, III, IV, V – порядок расположения плоскостей резания (обрабатываемых породных слоёв); в плоскостях II и IV резцы движутся вдоль оси OZ ; в плоскостях I, III и V резцы движутся вдоль оси OX

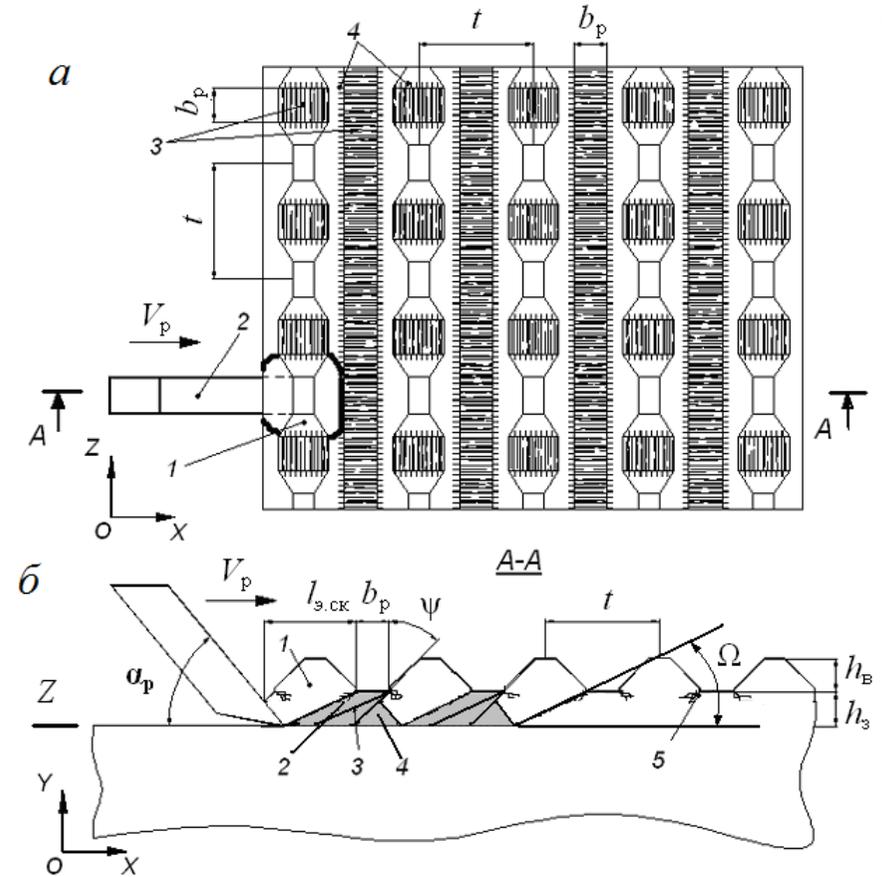
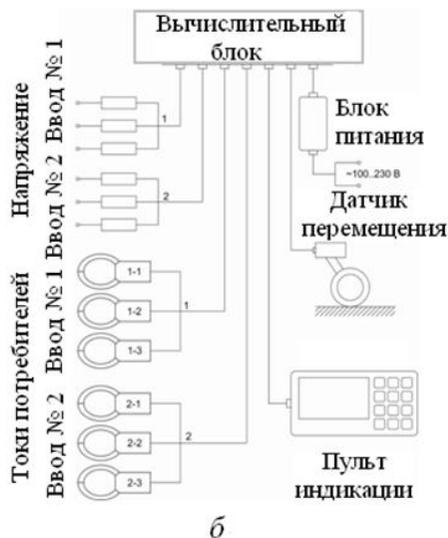


Рисунок 6 – Схема образования последовательных элементарных сколов в срезе при разрушении калийного массива перекрёстными резами: а – поверхность забоя, разрушаемая перекрёстными резами: 1 – сформированный элементарный скол с устойчивыми значениями параметров; 2 – резец; 3 – пересекающиеся резы; 4 – зоны локализации наведенных трещиноватостей; б – схема формирования элементарных сколов при движении резца поперек резов отработанного слоя калийного массива: 1 – сформированный элементарный скол с устойчивыми значениями геометрических параметров; 2, 3, 4 – скол мелкого элемента; 5 – зоны локализации наведенных трещин и концентрации напряжений



а



б

Рисунок 9 – Общий вид (а) и структурная схема (б) комплекса «ВАТУР»

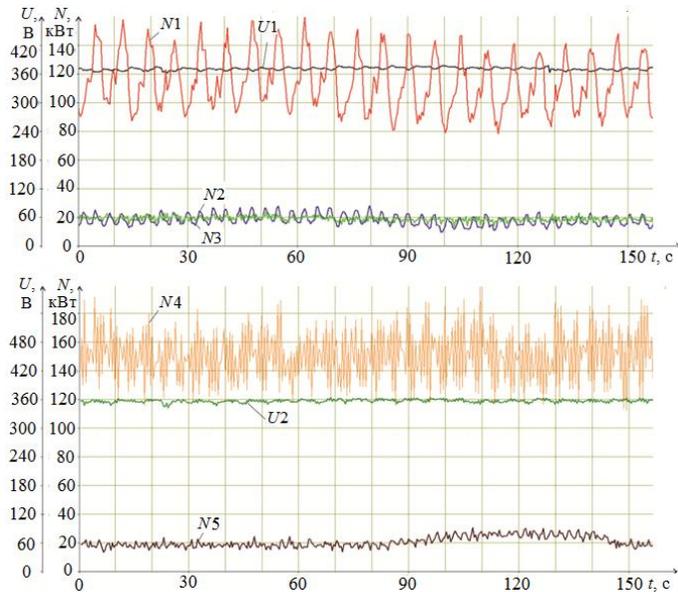


Рисунок 10 – Изменение параметров работы приводных двигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением ($V_n = 0,14$ м/мин): U_1 и U_2 – фазные напряжения на вводах № 1 и № 2, соответственно, В; N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 – активные мощности двигателей относительного вращения резцовых дисков, отбойного устройства, переносного вращения резцовых дисков, двух двигателей конвейера, соответственно, кВт

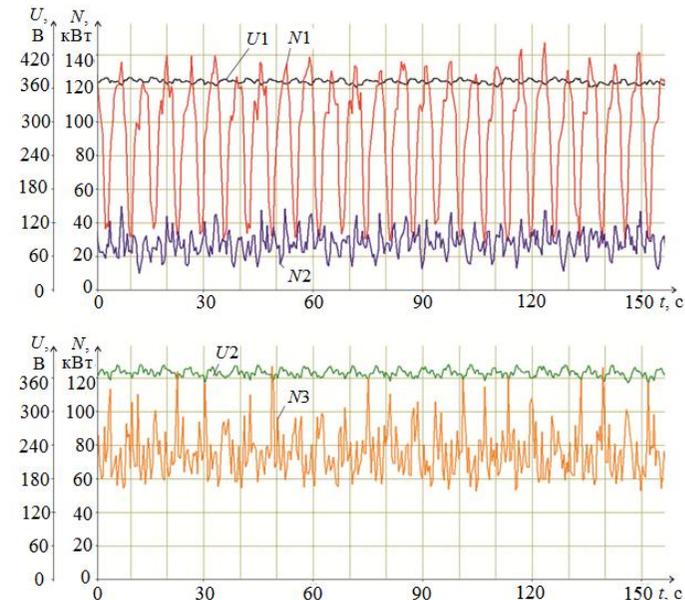
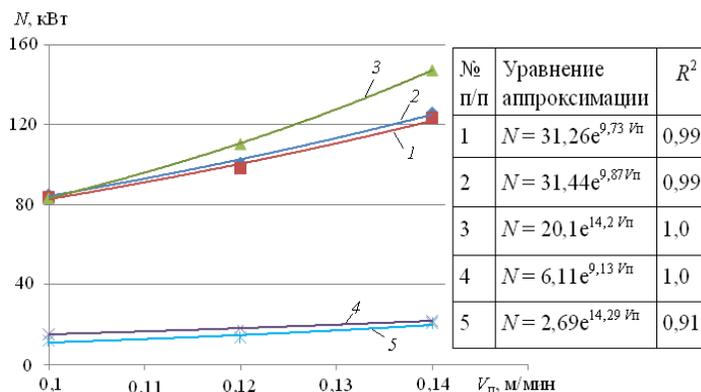


Рисунок 12 – Изменение параметров работы приводных двигателей комбайна «Урал-20Р-11» при обработке забоя неполным сечением ($V_n = 0,40$ м/мин): U_1 и U_2 – фазные напряжения на вводах № 1 и № 2, соответственно, В; N_1, N_2, N_3 – активные мощности двигателей относительного и переносного вращения резцовых дисков, двигателей бермовых фрез, соответственно, кВт

Рисунок 11 – Изменение средних значений активных мощностей двигателей комбайна «Урал-20Р-11» при отработке забоя полным сечением в зависимости от скорости подачи: 1, 2 – двигатели относительного вращения резцовых дисков; 3 – двигатели бермового органа; 4 – двигатель отбойного устройства; 5 – двигатель переносного вращения резцовых дисков; R^2 – достоверность аппроксимации