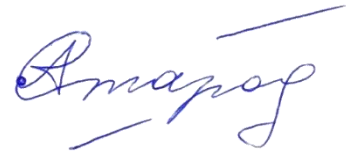


На правах рукописи



Стародубов Алексей Николаевич

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ВЫЕМКИ МОЩНЫХ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ
СРЕДСТВАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 2.8.8 – Геотехнология, горные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Кемерово 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН)

Научный консультант:

Без научного консультанта.

Официальные оппоненты:

Лукичѳв Сергей Вячеславович

Член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, Горный институт Обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН), директор.

Павлова Лариса Дмитриевна

Доктор технических наук, профессор, ФГБОУВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Кафедра прикладной математики и информатики, зав. кафедрой.

Тайлаков Олег Владимирович

Доктор технических наук, профессор, АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», генеральный директор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 29 сентября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел.: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@khfrc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfrc.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Подземный способ разработки продолжает сохранять стабильные позиции в общем объеме добычи угля на протяжении последних 10 лет. Наиболее ценные и поставляемые на экспорт марки каменного угля залегают в мощных пластах и добываются преимущественно подземным способом. Только на примере Кузбасса балансовые запасы угля, подсчитанные до глубины 600 м от поверхности по сумме категорий А+В+С1, составляют 52,45 млрд. т. Из них в пологих пластах мощностью более 5 м сосредоточено около 9 млрд. т, 30 % из которых могут быть отработаны подземным способом.

Исследования подземной разработки мощных пологих угольных пластов, на долю которой приходится 12 % всей мировой добычи, проводятся в России, Китае, Австралии, Казахстане, Польше, Индии, Турции, Словении, Вьетнаме. В СССР и во Франции были предложены технологии, получившие широкое распространение, предусматривающие разрушение угля подкровельной толщи энергией горного давления с последующим выпуском его на забойный или завальный конвейер. В настоящее время крепи такого типа в Китае (уже более 40 лет) и Австралии широко применяются на угольных пластах мощностью до 12 м и обеспечивают более высокую производительность по сравнению со слоевой отработкой. Благодаря внедрению данных технологий снижается удельный объем проведения подготовительных работ, а также затраты на оборудование очистных забоев. При этом, механизированные комплексы получили расширенные возможности, связанные с более эффективным управлением выпуска вышележащего слоя угля, что требует дополнительного изучения и обоснования.

Однако геотехнология имеет ряд недостатков. При ее реализации основными определяющими критериями являются требования к объему выпуска и автоматизации работ, а также к обеспечению безопасности и повышению эффективности работы очистного забоя. При увеличении потерь угля повышается риск его самовозгорания в обрушенном пространстве лавы. Также возможно снижение качества рядового угля за счет его смешивания при выпуске с обрушаемыми породами кровли. Решение проблемы напрямую зависит от обоснования специальных типов механизированных крепей и оптимизации режимов работы очистного комплекса с учетом результатов исследований процессов движения выпускаемого угля.

Обоснование параметров и внедрение специализированных очистных механизированных комплексов с контролируемым выпуском угля подкровельной тощи на забойный конвейер может стать решением сложившейся нерешенной проблемы эффективного управления процессом выпуска угля подкровельной толщи механизированным очистным комплексом длинностолбовой системы отработки. Оценка эффективности данной технологии также требует определения рациональных режимов работы питателей секций крепи, обеспечивающих равномерную и максимально допустимую загрузку лавного конвейера.

Развитие этого направления зависит от обоснования и разработки технических и технологических решений реализации геотехнологии, обуславливая актуальность данной работы. Высокая динамичность, нестабильность и стохастичность процесса выпуска угля затрудняет использование аналитических моделей, поэтому наиболее подходящим инструментом для исследований является использование компьютерного моделирования с применением современных программных средств. Благодаря компьютерным моделям процессов выпуска представляется возможным обоснование рациональных вариантов технологий разработки мощного угольного пласта и конструктивных решений оборудования для их реализации с учетом специфических горно-геологических условий (ГГУ).

Цель диссертационной работы заключается в обосновании технологических и технических решений, обеспечивающих эффективность и безопасность выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля подкровельной толщи.

Идея работы заключается в итеративном использовании комплекса методов компьютерного моделирования для предиктивного анализа геотехнологий, исследования и программируемого управления движением горной массы при выпуске угля на забойный конвейер с использованием специализированных очистных механизированных комплексов в различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Диссертационная работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы 2021-2023 гг.» (рег. № АААА-А21-121012290021-1); проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы 2024-2025 гг.» (рег. № 1022041500010-0-1.5.1;2.7.5); Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Разработка технологии эффективного освоения угольных месторождений роботизированным комплексом с управляемым выпуском подкровельной толщи» (Соглашение 14.604.21.0173 от 26.09.2017 г., рег.№: АААА-А17-117122560002-9); гранта (постановление Правительства Кемеровской области – Кузбасса от 19.09.2022 г. № 632) по прикладному научному исследованию «Разработка программно-методического обеспечения для цифровизации процессов проектирования горнотехнических систем для открытых и подземных горных работ», соглашение от 22.11.2022 г.

№ 1 и соответствует целям долгосрочной программы развития угольной промышленности России до 2030 года.

Объект исследований: технологический процесс выпуска угля подкровельной толщи при подземной разработке мощных пологих пластов специализированным очистным механизированным комплексом длинностолбовой системы обработки.

Предмет исследований: параметры технологического процесса выпуска угля подкровельной толщи с использованием специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса, обеспечивающие полноту извлечения, снижение потерь и разубоживания.

Для реализации идеи и достижения указанной цели решались следующие **задачи:**

1. Обосновать и разработать комплекс компьютерных моделей процесса выпуска угля, позволяющих проводить предиктивный анализ геотехнологии и исследовать во времени основные процессы и элементы технологии.

2. Исследовать и обосновать область горно-геологических и горнотехнических условий, при которых целесообразно и наиболее эффективно с точки зрения производительности и полноты выемки применение технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля на забойный конвейер с использованием специальной механизированной крепи.

3. Исследовать процессы движения горной массы в системе «питатель-защитный» специальной механизированной крепи и обосновать сочетания параметров, обеспечивающих эффективное и безопасное управление выпуском угля специализированным очистным механизированным комплексом.

4. Обосновать режимные параметры технологии выпуска угля подкровельной толщи, обеспечивающие наиболее стабильное, равномерное и полное заполнение лавного конвейера при одновременном выпуске угля из нескольких секций специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса.

5. Выявить особенности движения горной массы над выпускным окном в зависимости от продолжительности единичного выпуска между передвижками крепи и установить интервалы продолжительности единичного выпуска с наименьшей вероятностью сводообразований при наибольшей эффективности работы специализированных очистных механизированных комплексов в различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Методы исследований.

- специализированные языки компьютерной имитации GPSS и анимации Proof Animation для построения и отладки моделей взаимодействия элементов геотехнологии;

- проведение имитационных экспериментов и оценка эффективности вариантов геотехнологии на динамических моделях по интегрированному сочетанию показателей: выпущенной горной массы, процента разубоживания, потерь угля за крепью и частоты образования завесаний;

- методы теории вероятности и математической статистики для обработки результатов моделирования, а также язык программирования C#, для выбора рациональных вариантов сочетания параметров работы элементов конструкции секции крепи;

- метод дискретных элементов, для моделирования процесса управляемого выпуска раздробленной горной массы с использованием специальной механизированной крепи.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Скорость и достоверность предиктивного анализа геотехнологий, исследования и программируемого управления движением горной массы достигается при использовании разработанного комплекса компьютерных моделей в соответствии с созданным алгоритмом применения разных видов моделирования.

2. Высокая производительность и полнота выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи с использованием специальной механизированной крепи на забойный конвейер обеспечивается за счёт формирования разворота потока угля, образуемого рядом передвижек комплекса на величину, близкую к удвоенному значению малой полуоси эллипсоида выпуска, при постоянном площадном подпоре породой не менее 3 т/м^2 при выпускаемой мощности угля более 2,5 м и в отношении по массе не менее 1:1 при меньшей мощности.

3. Массовый расход угля управляется сочетанием параметров системы «питатель-заслон» специальной механизированной крепи, в которой формируются три зоны потока с различной крупностью и линейной скоростью кусков: зона ускоренного истечения преимущественно большей крупности в верхнем слое, поддерживаемая и ускоряемая возвратно-поступательным движением питателя; зона нижнего слоя с высокой концентрацией мелких кусков, сдвигаемых ступенями питателя, и средний слой, движущийся медленнее, чем нижний и верхний слои в 1,3 и 2,8 раза соответственно.

4. Управляемым волновым режимом выпуска подкровельной толщи одновременно из нескольких секций специализированного очистного механизированного комплекса, с убывающим по длине очистного забоя значением массового расхода угля, обеспечивается регулируемое равномерное и максимальное заполнение забойного конвейера.

5. Объём выпущенной горной массы имеет вид кусочно-заданной функции от длительности выпуска - прямая пропорциональность с выходом на постоянную величину, при дальнейшем квадратичном росте процента разубоживания выпускаемого угля, но снижении его потерь, описываемом полиномиальной зависимостью второй степени, сопровождающимся экспоненциальным ростом вероятности образования статических сводообразований над выпускным окном секции специальной механизированной крепи. При этом существует интервал продолжительности выпуска, на котором обеспечиваются лучшие показатели эффективности специализированных очистных механизированных комплексов.

Достоверность научных положений обеспечивается использованием фундаментальных физических законов в качестве исходных предпосылок для теоретического анализа, надежностью входных данных, полученных из разных источников, корректно разработанными математическими моделями и современными специализированными компьютерными программами, а также сходимостью полученных при моделировании результатов с основными положениями теории выпуска сыпучих материалов, в том числе удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке алгоритма использования комплекса методов математического и компьютерного моделирования: метода дискретных элементов, дискретно-событийного моделирования и алгоритмов выбора рациональных вариантов сочетания параметров, – отличающегося их комбинацией, позволяющей повысить скорость и достоверность принятия решения при предиктивном анализе геотехнологии с выпуском угля подкровельной толщи;

- обосновании области эффективного применения технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля на забойный конвейер, учитывающей соотношения мощностей угля подкровельной толщи и пород кровли, участвующей в выпуске, а также величину подвигания специализированного очистного механизированного комплекса перед выпуском;

- выявлении областей с разными скоростями движения горной массы различной крупности в системе «питатель-заслон» специальной механизированной крепи и её параметров, отличающихся эффективным и безопасным управлением процесса выпуска угля специализированным очистным механизированным комплексом;

- обосновании режимных параметров технологии выпуска угля подкровельной толщи, обеспечивающих наиболее стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера при одновременном выпуске угля из нескольких секций специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса;

- установлении параметров программируемого управления процессами выпуска угля подкровельной толщи, характеризующегося низкой вероятностью образования статических сводообразований над выпускным окном и наибольшей эффективностью геотехнологии по интегрированному сочетанию показателей: объём выпущенной горной массы, процент разубоживания и потери угля за крепью.

Научная значимость работы заключается в создании соответствующих современным условиям научных основ определения параметров технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля подкровельной и межслоевой толщи на забойный конвейер с использованием секций специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса; разработке на основе разных методов математического моделирования моделей движения горной массы во время выпуска с учётом взаимодействия во

времени и пространстве горных машин и оборудования; решении, с использованием разработанных моделей, ряда практических научных задач.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследований позволяют:

- сократить время сопоставления множества вариантов при проектировании технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля подкровельной и межслоевой толщи с использованием секций специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса, с возможностью отображения динамики взаимодействия оборудования в виртуальном пространстве и прогнозирования эффективности геотехнологии;

- обосновать рациональные размеры и расположение выпускных окон, заслонов и питателей в секциях специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса;

- способствовать внедрению механизированных комплексов с выпуском угля подкровельной толщи с использованием специальной механизированной крепи в составе специализированного очистного механизированного комплекса для разработки мощных угольных пластов.

Реализация работы.

Разработанное программное обеспечение «Расчёт массового расхода при выпуске угля подкровельной толщи» (свидетельство о регистрации 2024683561) в рамках реализации проекта по прикладному научному исследованию «Разработка программно-методического обеспечения для цифровизации процессов проектирования горнотехнических систем для открытых и подземных горных работ» передано по лицензионному договору для внедрения индустриальному партнеру ЗАО «Углеметан Сервис».

Личный вклад автора состоит в выборе, постановке задач исследования и методов их решения; формулировании всех положений диссертации; разработке компьютерных моделей для реализации разных методов математического моделирования; в обработке и анализе результатов численных и имитационных исследований по установлению закономерностей движения и управления потоком горной массы; в обосновании технологических и технических решений, обеспечивающих эффективность и безопасность выемки мощных пологих пластов.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на 12 международных, всероссийских и региональных конференциях: Международная конференция в рамках международной специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и майнинг» «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (г. Новокузнецк, 2019, 2022, 2023 гг.); Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2024» (г. Новокузнецк, 2015, 2024 гг.); III Международная научно-практическая конференция «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022)» (г. Кемерово,

2022 г.); Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД)» (г. Казань, 2013 и 2023 гг.; г. Екатеринбург, 2019 г.; г. Москва, 2015 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Цифровые технологии в горном деле» (г. Апатиты, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего» (г. Кемерово, 2023 г.).

На Техническом совещании Ассоциации «Горнопромышленники России» «Практика применения горно-геологических информационных систем на горнодобывающих предприятиях России и за рубежом» (г. Москва, 2022 г.).

На ученых советах ИУ ФИЦ УУХ СО РАН (г. Кемерово, 2020-2024 гг.).

На Научно-технических советах при Губернаторе Кемеровской области – Кузбасса (г. Кемерово, 2023-2024 гг.).

На IV Конгрессе молодых ученых, Университет «Сириус» (г. Сочи, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 34 печатные работы, в том числе: 10 – в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ; 6 – в научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus; 4 – свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ; 1 – патент на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (287 источников), приложений (4), 172 иллюстрации, 68 таблиц, общий объём 330 страниц.

Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. Клишину В.И. за научное консультирование и постоянное внимание в процессе подготовки настоящей диссертационной работы. К.т.н., доц. Зиновьеву В.В., д.т.н., проф. РАН Майорову А.Е. за многолетнее сотрудничество и всестороннюю поддержку. За содействие в организации и проведении экспериментальных исследований автор благодарит д.т.н. Ордина А.А., Кадочигову А.Н., Каплун А.В.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния и выделены основные направления развития технологий отработки мощных угольных пластов, выполнен обзор систем выемки таких пластов на полную мощность с выпуском угля подкровельной и межслоевой толщи на забойный и завальный конвейеры.

Значительный вклад в формирование научных представлений о процессах, протекающих при ведении горных работ на мощных угольных пластах с выпуском подкровельной толщи, механизме взаимодействия механизированных крепей с вмещающими породами, в том числе на лабораторных стендах и средствами компьютерного моделирования, управлении горным давлением, а также в разработку и внедрение прогрессивных технико-технологических решений внесли В.Е. Брагин, Г.И. Грицко, Л.Н. Гапанович, Н.К. Гринько, Ю.В. Громов, П.В. Егоров, В.Е.

Зайденварг, С.И. Калинин, В.И. Клишин, С.В. Клишин, М.В. Курленя, И.С. Крашкин, Ю.Н. Малышев, В.В. Мельник, Б.К. Мышляев, В.В. Некрасов, А.А. Орлов, Л.Д. Павлова, В.А. Потапенко, А.М. Рыжов, А.Г. Саламатин, П.Ф. Савченко, А.В. Стариков, О.В. Тайлаков, И.А. Шундулиди, В.Д. Ялевский, В.Н. Фрянов и др. Учитывая колоссальный объём добычи угля из мощных угольных пластов в *Китае*, который составляет около 50 % всей добычи, многие коллективы и специалисты занимаются такими исследованиями – это Yang SL, Zhang JW, Chen Y, Song ZY, Wang JC, Yang SL, Huang GJ, Liu HH, Zheng LY, Sun H, Gao YT, Elmo D, Jin AB, Wu SC, Dorador L. В Индии – Khanal M, Adhikary D, Balusu R. В Австралии – Castro RL, Fuenzalida MA, Lund F. В США – Jamnikar S, Lazar J, Shi JQ, Durucan S, Korre A, Zaviek S. В Казахстане – А.С. Сагинов, С.С. Жетесов. В Словении – Jeromel G, Medved M, Likar J, Lenart M, Mayer J. В Чили – Melo F, Vivanco F, Fuentes C, Arablaza V. Схожим по своей природе является процесс выпуска руды из блоков в системах разработки с обрушением, значительный пласт исследований которого проведен в работах М.И. Агошкова, В.Н. Аминова, Х.А. Балхавдарова, Л.И. Барона, Ю.В. Демидова, Н.Г. Дубынина, А.А. Еременко, И.А. Ермаковой, В.Р. Именитова, С.Л. Иофина, В.В. Куликова, В.В. Лаптева, С.В. Лукичева, Г.М. Малахова, С.И. Минаева, С.А. Неверова, Р.Г. Пепелева, М.М. Протодьяконова, И.Н. Савича, С.Б. Стажевского, В.В. Шкарпетина, Р.В. Cleary, R. Kvarpil, D.H. Laubscher и мн. др.

В диссертационной работе рассматривается подход к подземной разработке мощных пологих пластов специализированным очистным механизированным комплексом длинностолбовой системы отработки, в основе которого положено использование регулируемых по скорости питателей, установленных в перекрытии специальных секций крепи, а также специальных выпускных окон в ограждающей части крепи и поворотных заслонов, с помощью которых предоставляется возможность изменять интенсивность выпуска угля на лавный скребковый конвейер (рисунок 1).

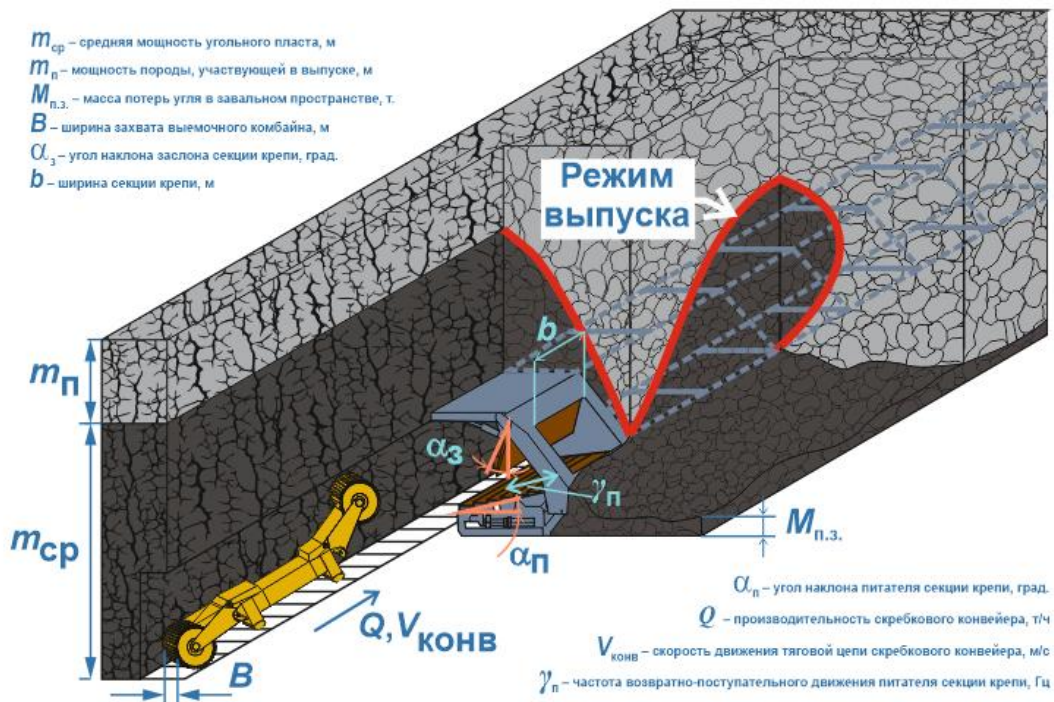


Рисунок 1 – Схема объекта исследования

Рабочие процессы осуществляются в следующем порядке. Традиционные операции: выемка угля комбайном, погрузка его на лавный конвейер и транспортирование его до штрекового перегружателя, передвижка забойного конвейера, передвижка секций крепи, концевые операции – повторяются некоторое количество раз, затем запускается процесс выпуска угля питателем через специальные выпускные окна на лавный конвейер. По достижении границы порода-уголь выпуск прекращается и снова начинается выемка угля комбайном и так далее.

С учетом изложенного была сформулирована цель диссертационной работы и задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма повышения скорости и достоверности принятия решения при проектировании геотехнологии с выпуском угля подкровельной толщи для различных горно-геологических и горнотехнических условий за счёт итеративного использования комплекса методов математического моделирования.

Определение рациональных вариантов реализации технологии для определенных ГГУ является сложной n -мерной многовариантной задачей ввиду большого числа взаимовлияющих факторов (рисунок 2а).

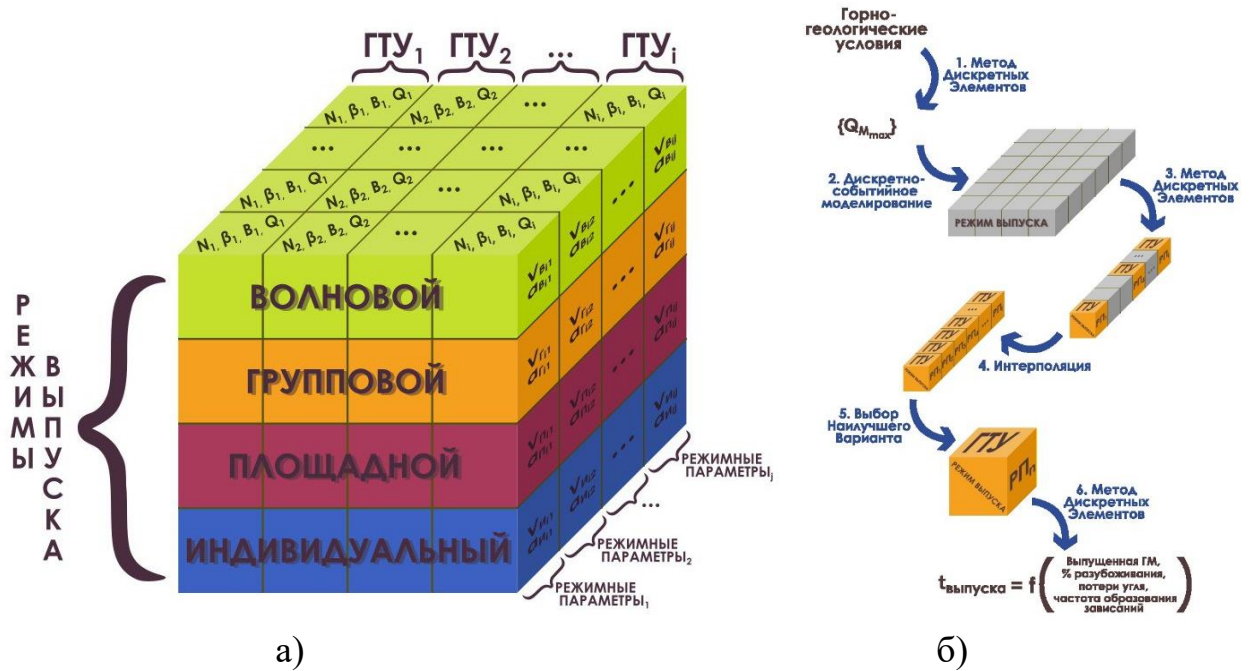


Рисунок 2 – Графическое представление а) массива вариантов реализации технологии и б) алгоритма поиска рациональных параметров геотехнологии

Простым перебором вариантов на основе метода дискретных элементов решить её невозможно: каждый вариант требует от нескольких часов до недель машинного времени, либо существенного сокращения точности за счет введения до-

пущений. Существенно сократить временные и машинные ресурсы возможно путем комплексного использования разных методов математического моделирования в следующем сочетании (рисунок 2б):

- метод дискретных элементов для первоначального предварительного расчета при определенных ГГУ предельных значений массового расхода при выпуске угля;
- дискретно-событийное моделирование для разработки моделей оценки эффективности возможных режимов функционирования технологии;
- метод дискретных элементов для оценки найденного на предыдущем этапе режима и получения массива крайних и ряда промежуточных значений параметров с учётом взаимовлияющих ГГУ и ГТУ для конкретного месторождения;
- методы интерполяции для заполнения нерассчитанных значений массива возможных параметров;
- метод перебора для выбора наилучшего варианта;
- метод дискретных элементов для уточнения времени единичного выпуска с точки зрения интегрированного сочетания показателей: выпущенной горной массы, процента разубоживания, потерь угля за крепью и частоты образования зависаний.

Для имитационного моделирования в качестве средства программной реализации модели механизированного комплекса применена среда имитационного моделирования GPSS World, основанная на теории очередей и позволяющая моделировать процессы, случайно изменяющиеся во времени и пространстве. Язык GPSS и его версии является одним из самых эффективных и распространенных программных средств моделирования сложных дискретных систем, успешность такого применения подтверждается работами В.В. Девяткова и др., в том числе для моделирования горных работ. Основными объектами в GPSS-модели являются транзакты и блоки. Транзактами в модели представлены дискретные объёмы угля. Перемещаясь от блока к блоку, транзакты имитируют выпуск угля и его движение по конвейеру. Блоки, отображающие питатели и участки конвейера, задают логику функционирования модели системы и определяют пути движения транзактов по ней.

С учетом высоких требований к вычислительным ресурсам на этапе выбора наилучшего варианта сочетания параметров системы «питатель-заслон» нецелесообразно производить расчет всего массива данных. В работе предложен и реализован подход, при котором производится расчет крайних и промежуточных значений с последующей интерполяцией недостающих данных. Опытным путем установлено, что расчет с помощью уравнения линии тренда по углу наклона заслона более предпочтителен ввиду его точности: среднее отклонение составило 8 %, в то время как расчет по частоте питателя приведет к 26 % погрешности.

На следующем этапе с использованием разработанной на языке программирования C# системы «Расчёт массового расхода при выпуске угля подкровельной толщи» (Свидетельство № 2024683561) (рисунок 3) методами математического

программирования вычисляются оптимальные и субоптимальные параметры выпуска угля подкровельной толщи во время ведения очистных работ при добыче угля подземным способом с учетом ограничений на частоту работы питателя и угол наклона заслона, что позволяет не перегружать лавный конвейер и осуществлять плавный выпуск.

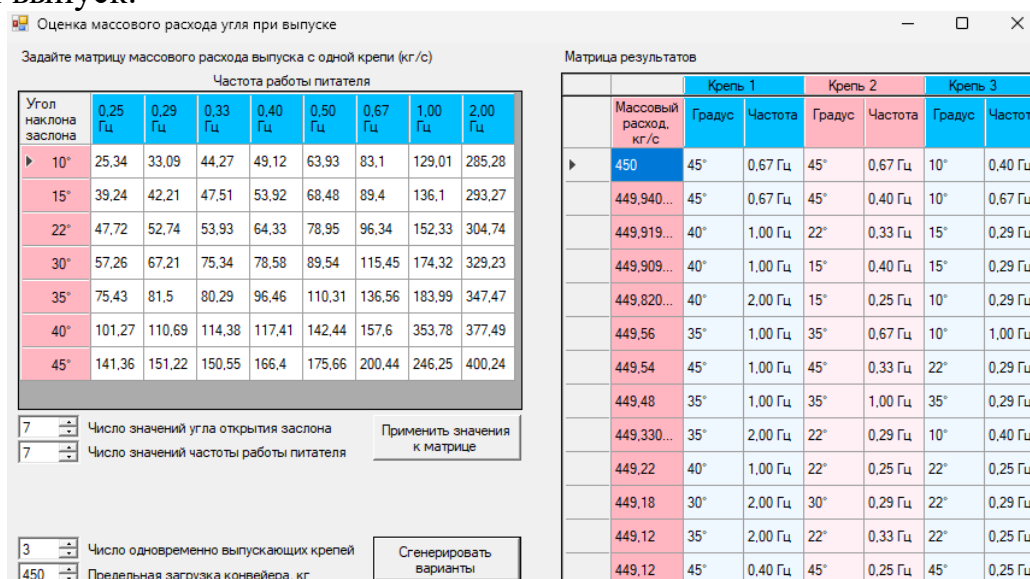
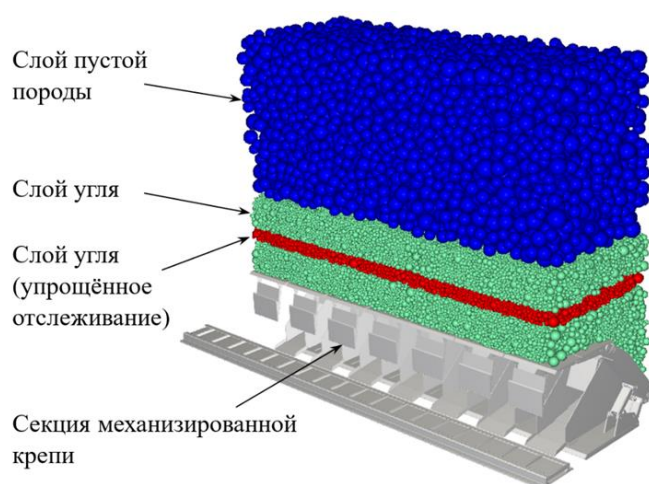


Рисунок 3 – Интерфейс программной системы «Расчёт массового расхода при выпуске угля подкровельной толщи»

Из полученной матрицы результатов генерируется Excel-файл с параметрами, на основе которых создаётся и настраивается модель выпуска в среде численного 3D-моделирования Rocky DEM, позволяющая оценить время выпуска угля в зависимости от объёма выпущенной ГМ, процента разубоживания, величины потерь угля и частоты образования завесаний.

В третьей главе проведено обоснование области горно-геологических и горнотехнических условий, при которых целесообразно и наиболее эффективно с точки зрения производительности и полноты выемки применение технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля на забойный конвейер с использованием специальной механизированной крепи. Разработанные имитационные дискретно-стохастические модели не учитывают физических характеристик горной массы, а также не содержат в себе математической базы расчета взаимодействия частиц. Для преодоления изложенных недостатков предложена новая модель, построенная в среде имитационного моделирования Rocky DEM. Программное обеспечение позволяет анализировать движения частиц с помощью метода дискретных элементов (DEM). В основе данного метода лежит идея о том, что частицы в некоторой гранулированной среде, обладая определённым положением относительно друг друга в пространстве и начальной скоростью, взаимодействуют за счет контактных сил трения и тяготения. С помощью DEM представляется возможным описывать траекторию движения частиц, учитывая при этом физические свойства их материала.

При разработке численной модели выбраны встроенные математические модели: для нормальной составляющей контактной силы выбрана модель вязкоупругого взаимодействия на основе закона Герца; для тангенциальных сил – модель Миндлина и Дересевича; Модель сил сопротивления качения - Type C: Linear Spring Rolling Limit.



На рисунке 4 представлена трёхмерная численная модель комплекса с семью секциями крепи. Она позволяет изменять конструктивные и режимные параметры комплекса и, как следствие, добиваться максимально возможной производительности выпуска при равномерном и полном заполнении конвейера.

Рисунок 4 – 3D-вид численной модели комплекса с управляемым выпуском

В таблице 1 представлены основные параметры частиц, изображенных на рисунке 4 - верхний слой (обозначенный синим цветом) обладает свойствами породного массива, ниже (зелёный и красный) изображен слой, обладающий свойствами угольного пласта. Красным цветом выделен произвольный объём угля, служащий контрольной линией для повышения визуализации движения массива частиц. Геометрические параметры частиц должны подбираться из условий разрабатываемых месторождений и не влияют на сущность предлагаемого подхода, однако для повышения адекватности были сформулированы на основе работ китайских, индийских и американских авторов (Wang Jiachen, Wei Weijie, Zhang Jinwang, Mishra, Brijes).

Таблица 1 - Физические параметры материалов в модели

	Уголь	Порода	Сталь
Физические параметры частиц			
Модуль Юнга (упругости), ГПа	2,40	13,58	190
Коэффициент Пуассона	0,16	0,21	0,3
Плотность, кг/м ³	1300	2000	7800
Геометрические параметры частиц			
Диаметр частиц, м	Соотношение, %		
0 – 0,09	13,83	–	–
0,09 – 0,18	46,31	–	–
0,18 – 0,27	20,34	–	–
0,27 – 0,36	19,52	13,83	–
0,36 – 0,45	–	46,31	–
0,45 – 0,54	–	20,34	–

0,54–0,63	–	19,52	–
Параметры контактов между частицами			
Коэффициент качению	сопротивления	0,2	0,2
			–

Созданы модели (рисунок 5) с заполнением моделируемого объёма частицами разной формы.

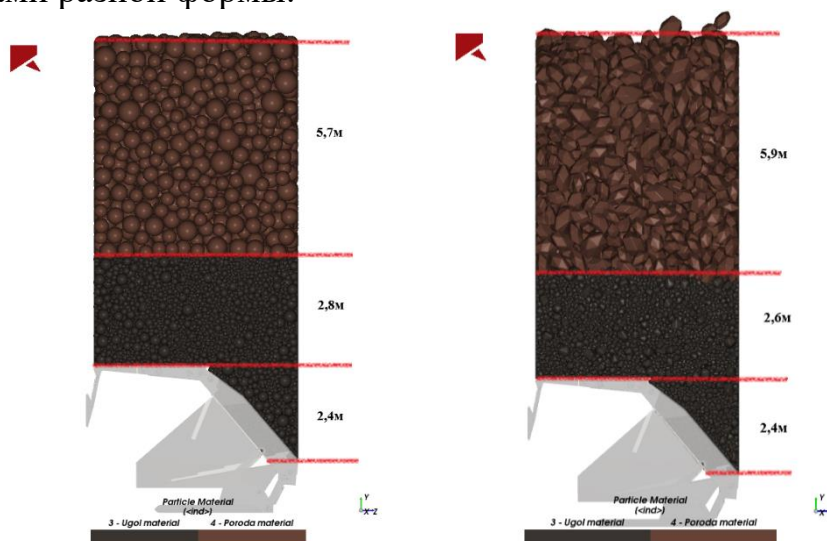


Рисунок 5 – Заполнение моделируемого объёма частицами разной формы

Многогранные частицы имеют схожее сферам распределение по размерам, представленным в таблице 1, но с характерными дополнительными параметрами (таблица 2).

Таблица 2 - Параметры формы многогранных частиц:

	Уголь	Порода
Соотношение сторон по вертикали	1,25	1,5
Соотношение сторон по горизонтали	0,7	0,75
Сглаживание	1	0,25
Количество углов	11	15
Суперквадратичная степень	6,2	2

Выпуск угля через секцию крепи осуществляется питателем, совершающим выполняя возвратно-поступательные движения и установленным в перекрытии механизированной крепи. Ранее было установлено, что наибольшей производительностью обладает ступенчатый питатель, у которого рабочая поверхность направлена вдоль плоскости движения, ориентированной под углом к горизонту. Параметры питателя, используемые в модели: длина ступени $l_s = 0,7$ м; её ширина $h_s = 0,05$ м; угол наклона $\alpha = 12^\circ$; частота возвратно-поступательного движения $\nu = 0,5$ Гц; амплитуда движения $A = 0,15$ м. Ширина одной секции – два метра, окна питателя – один метр. Параметры лавного конвейера аналогичны модели «Анжера-30»: производительность 1000 т/ч, скорость движения тягового органа 1,0 м/с.

Проведенные эксперименты позволили установить значения параметров (таблица 3) и применяемых моделей взаимодействия частиц (коэффициенты статического и динамического трения, коэффициент восстановления), требуемые для сохранения подобия поведения частиц сферической формы многогранникам (рисунок 6). По характеру траекторий движения частиц модели соответствуют представлениям, описанным в ранее известных работах.

Таблица 3 - Параметры моделей, обеспечивающие подобие поведения частиц сферической формы многогранным частицам

Параметры модели	со сферическими частицами	с многогранными частицами
Модель нормальной силы	Hertzian Spring Dashpot	Hysteretic linear Spring
Модель касательной силы	Mindlin-Deresiewicz	Linear Spring Coulomb Limit
Коэффициент сопротивления качению	0,2	0,1
Тип засыпки	Volume Fill	Continuous Injection
Заполнение породой	196 558 кг	194 624 кг
Заполнение углем	81 851 кг	80 862 кг

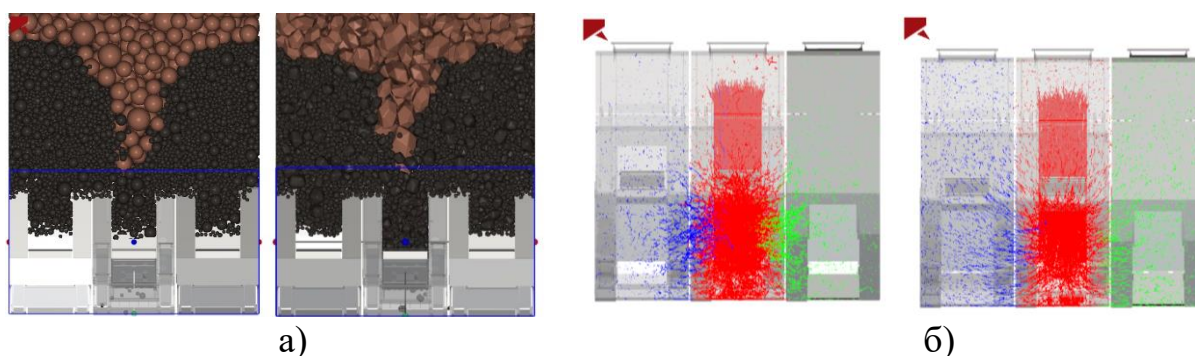


Рисунок 6 – Сравнение результатов моделирования при найденных параметрах частиц разной формы: а) частицы вид сзади, б) траектории частиц по сектору над каждой крепью, вид сверху

Исследования показали, что расчёт модели с многогранными частицами требует до 26 раз больше физического времени по сравнению с моделью со сферическими частицами (таблица 4), поэтому в дальнейших расчётах будут использоваться модели со сферическими частицами.

Таблица 4 - Время моделирования при использовании разных форм частиц

	Сферические частицы, мин	Многогранные частицы, мин
Генерация частиц (2 с / 6 с)	5	121
Выпуск (113 с / 179 с)	307 (~5 ч)	13 086 (~9 дней)
Равное модельное время (100 с / 100 с)	272 (~4,5 ч)	7 422 (~5 дней)

Физическое время достижения одинакового результата (272 с /309 с)	312 (~5 ч)	13 347 (~9 дней)
---	------------	------------------

Проверка адекватности разработанных моделей осуществлена сравнением модельных данных с результатами аналогичных исследований других авторов, лабораторными исследованиями на физической установке (рисунок 7а), а также по соответствию угла естественного откоса модельных частиц реальным значениям (рисунок 7б). Результаты оценки показали высокий уровень сходимости результатов (погрешность менее 8 %).

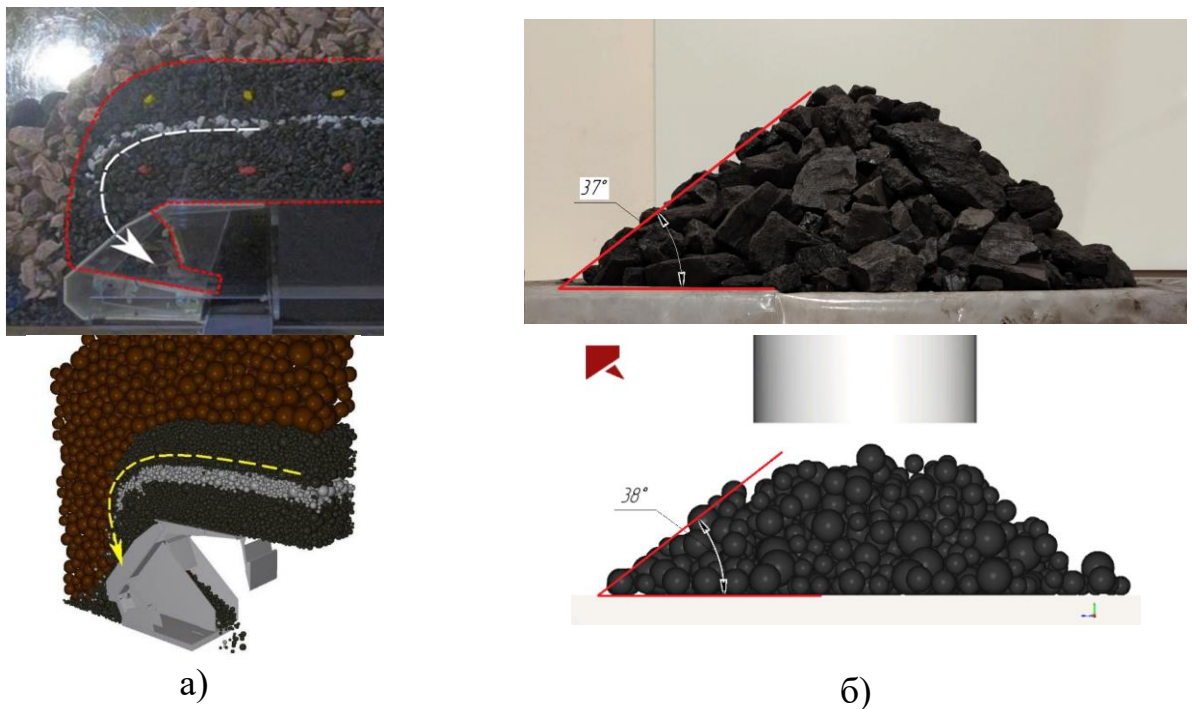


Рисунок 7 – Оценка адекватности моделей а) сравнением с результатами физического моделирования в ИУ ФИЦ УУХ СО РАН и б) через определение угла естественного откоса

На разработанных моделях проведена серия экспериментов по исследованию и обоснованию области ГТУ (мощность подкровельной толщи, влияние основной кровли) и ГТУ (ширина выпускного окна, угол наклона питателя, количество передвижек для одного выпуска, износостойкость элементов конструкции), при которых целесообразно и наиболее эффективно с точки зрения производительности и полноты выемки применение технологии.

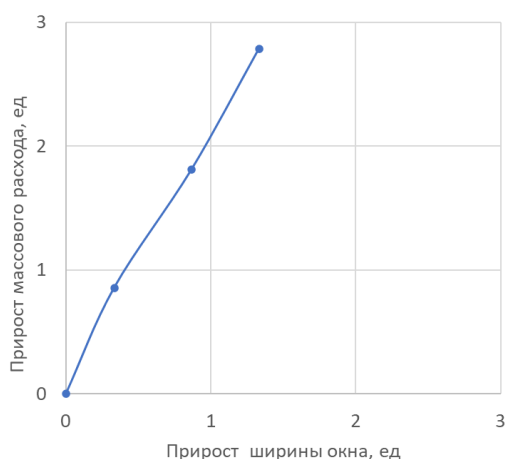


Рисунок 8 – График зависимости массового расхода угля от ширины выпускного окна

Установлено влияние ширины выпускного окна на значение массового расхода угля для механизированных крепей шириной 1,75 м, 2 м, 2,4 м и 2,75 м. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что влияние рассматриваемого фактора составляет 0,715. Увеличение выпускного окна на 40% и 75% привело к росту массового расхода угля на 51,3% и 104% соответственно, а его уменьшение на 25% снизило массовый расход угля на 46,2%. Таким образом установлено, что однократный прирост значения ширины выпускного окна приводит к увеличению значения массового расхода при выпуске в 2,1 раза (рисунок 8).

Установлено, что применение технологии отработки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной и межслоевой толщи на забойный конвейер с применением механизированной крепи позволяет обеспечить высокую производительность и полноту выемки за счёт формирования разворота потока угля. Использование разработанных моделей позволило установить диапазон параметров геотехнологии, при которых происходит это явление, а также уточнить их значение, оказывающие наилучшее влияние на показатели эффективности.

Согласно теории выпуска сыпучих материалов (Р. Квапил, Г.М. Малахов, В.В. Куликов, В.В. Мельник) форма всех фигур выпуска довольно близка к эллиптической. В рассматриваемой в работе технологии за счёт нескольких этапов передвижки и подпора угля сверху и со стороны завального пространства пустой породой, имеющий большой объёмный вес, форма фигуры выпуска угля искажается в направлении подвигания забоя (рисунок 9). Для обеспечения полноты выпуска и минимизации потерь угля в завальном пространстве необходимо обеспечить передвижку на расстояние, обеспечивающее геометрическое совпадение линии, ограничивающей фигуру выпуска с линией разворота угольного массива. Исходя из принципа равенства объёмов искаженного эллипсоида идеальному, удвоенное значение размера малой полуоси – есть требуемое значение передвижки крепи. Ввиду того, шаг передвижки крепи дискретен и кратен ширине захвата выемочного комбайна, обеспечить полное указанное соответствие не представляется возможным. Этим объясняются потери угля, вышедшего за пределы теоретического эллипсоида выпуска (зона между черной и красной пунктирными линиями на рисунке 9) и минимальное значение разубоживания кусками породы, находящихся внутри него (зона между красной пунктирной и синей линиями на рисунке 9), без учёта проникновения более тяжелых частиц породы ввиду их больших скоростей движения.

По Г.М. Малахову большая a и малая b полуоси могут быть определены через конкретные эмпирические коэффициенты: $a = 0,512 h$, $b = 0,07 h + 0,5 d$, где d – ширина выпускного отверстия, м; h – высота эллипсоида, м. Так, например,

$$] h_{\kappa} = 4 \wedge h_{\text{в}} = 2,8 \wedge d_{\text{п}} = 2 \rightarrow a = 2,65 \wedge b = 1,35 \rightarrow 2 * b = 2,7 \approx 3 * B = 2,4$$

Таким образом для указанных условий рациональным будет 3 передвижки.

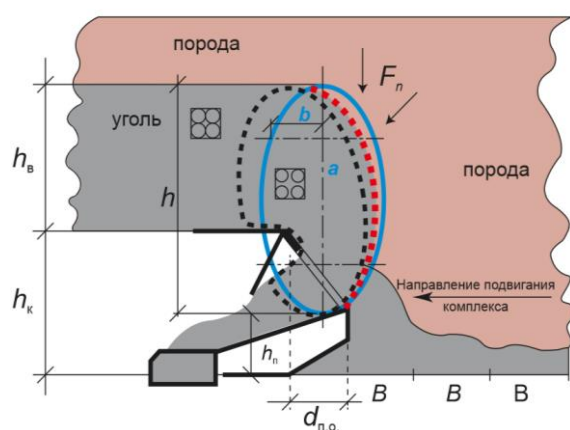


Рисунок 9 – Схема развития фигуры выпуска сыпучего материала через окно в поддерживающей части крепи после передвижки a – большая, b – малая полуоси, h – высота эллипсоида выпуска; $h_{п}$ – высота питателя; $h_{к}$ – высота подсечного слоя; $h_{в}$ – мощность выпускаемого слоя угля; B – шаг передвижки комплекса; $d_{п.о.}$ – ширина выпускного окна (проекция на горизонтальную плоскость); $F_{п}$ – направление сил воздействия пустой породы на угольный пласт при передвижке.

В таблице 5 для тех же условий показана форма разворота угля после передвижки секции перед выпуском, уровень потерь угля в завальном пространстве и скорость подвигания забоя без учёта времени выемки комбайном при двух-, трёх- и четырёхкратной передвижке крепи между последовательными актами выпуска, полученные по результатам численного моделирования.

Таблица 5 - Результаты исследования влияния количества передвижек секций между последовательными актами выпуска

Две передвижки	Три передвижки	Четыре передвижки
Скорость подвигания забоя без учёта выемки комбайном, м/с		
0,016	0,02	0,024
Приведенные к 1 метру подвигания забоя потери, т		
1,47	1,36	1,97

При двух передвижках величины подвигания недостаточно для полноценного разворота угольного массива, а при четырёх – наблюдается явление вклинивания потока пустой породы и выдавливания угля в завальное пространство во время выпуска (рисунок 10).

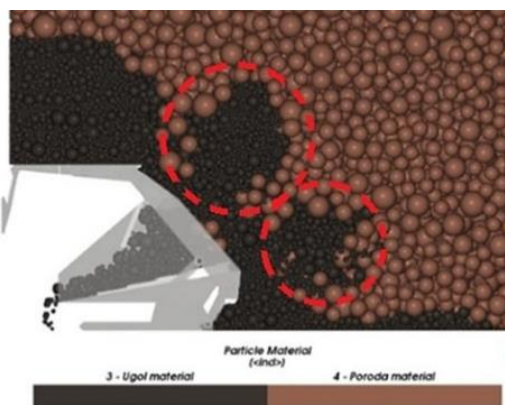
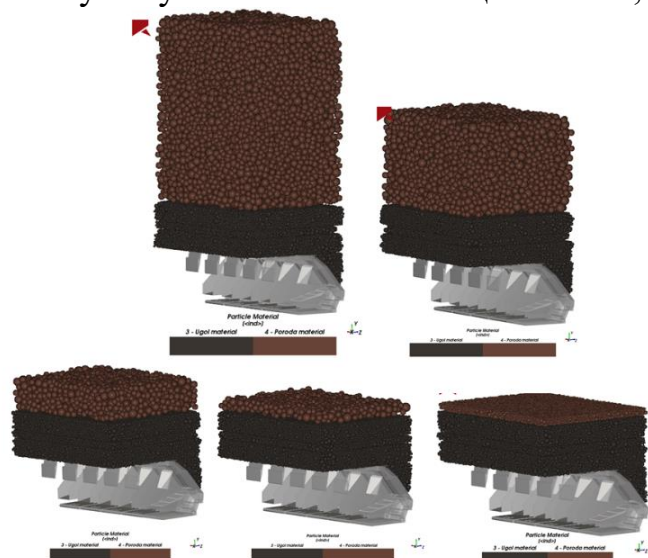


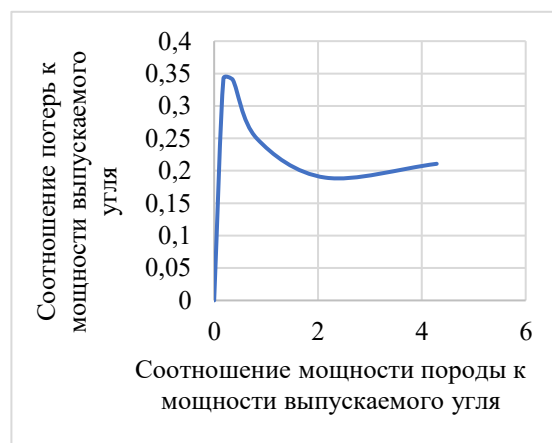
Рисунок 10 – Явление вклинивания пустой породы и выдавливания угля при четырёх передвижках

Таким образом, аналитически и численным моделированием установлено, что для рассматриваемых условий высокую производительность и полноту выемки за счёт формирования разворота потока угля можно обеспечить при трёхкратной передвижке крепи, а в общем случае: при длине передвижки, близкой к удвоенному значению малой полуоси идеального эллипсоида выпуска.

Экспериментами определено влияние мощности предварительно разупрочнённого массива породы кровли на процесс выпуска угля в широком диапазоне взаимных сочетаний мощности выпускаемой угольной пачки и предварительно разупрочненной кровли. На рисунке 11 а представлен пример моделей пяти вариантов выпуска угольной пачки мощностью 2,8 м.



а)



б)

Рисунок 11 – Модели выпуска с толщиной породного массива 12 м, 6 м, 2,3 м, 1 м (а) и величина потерь угля на 1 м подвигания забоя в зависимости от мощности породы, участвующей в выпуске

Серией экспериментов показано, что применение технологии эффективно при наличии постоянного площадного подпора пустой породой не менее 3 т/м^2 , если выпускаемая мощность угля более 2,5 м. При меньшей его мощности эффективным будут варианты в отношении по массе не менее 1:1 (рисунок 11 б).

При меньшей величине соотношения наблюдается эффект, аналогичный варианту при четырех передвижках – выталкивание пустой породой угольного массива в забойное пространство (рисунок 12 а), а при значительном превышении мощности угольной пачки происходит неконтролируемая диффузия пустой породы в массив угля – разубоживание (рисунок 12 б).

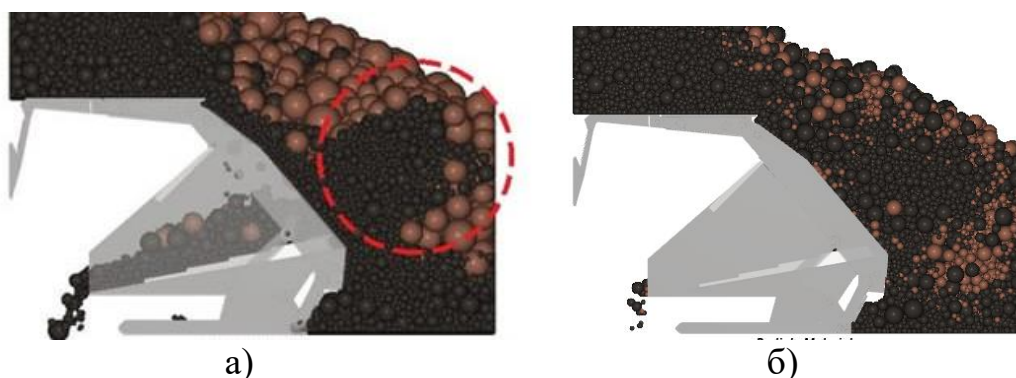


Рисунок 12 – Снижение показателей эффективности геотехнологии при незначительной мощности разупрочненной кровли

Таким образом установлено, что минимальное значение потерь угля при выпуске подкровельной толщи возможно при соблюдении следующего условия:

$$Q_{\text{пот}} \rightarrow \min \begin{cases} \begin{cases} m_y \geq 2,5 \\ M_{\text{п}} \geq 3 \end{cases} & m_y \in (0; +\infty) \\ \begin{cases} m_y < 2,5 \\ \frac{m_{\text{п}}}{m_y} \geq 1 \end{cases} & \text{при этом } m_{\text{п}} \in (0; +\infty), \\ & M_{\text{п}} \neq +\infty \end{cases}$$

где $Q_{\text{пот}}$ – потери угля в завальном пространстве, т; m_y , $m_{\text{п}}$ – мощность угля подкровельной толщи и разупрочненных пород кровли, м; $M_{\text{п}}$ – масса пород кровли, приходящихся на 1 м² площади угля подкровельной толщи.

В четвертой главе представлено изучение параметров системы «питатель-заслон», влияющих на массовый расход угля при разных сочетаниях угла наклона заслона, частоты возвратно-поступательного движения питателя и угла его наклона. Конструктивно увеличение угла наклона питателя приводит к существенному снижению площади выпускного окна. В исследовании изучено 32 варианта взаимного сочетания угла наклона питателя 7 и 12 градусов, частоты его движения 0,25, 0,33, 0,5 и 1 Гц, угла наклона заслона 10, 22, 35, 45 градусов. Установлено, что при минимальных значениях частоты возвратно-поступательного движения питателя при прочих равных условиях большую эффективность даёт больший угол наклона, вплоть до 26 %. Разница нивелируется в интервале 0,5÷0,75 Гц. При работе питателя на более высоких скоростях большую эффективность вплоть до 17 % показывает питатель, расположенный под меньшим углом. На рисунке 13 приведена сводная диаграмма результатов моделирования.

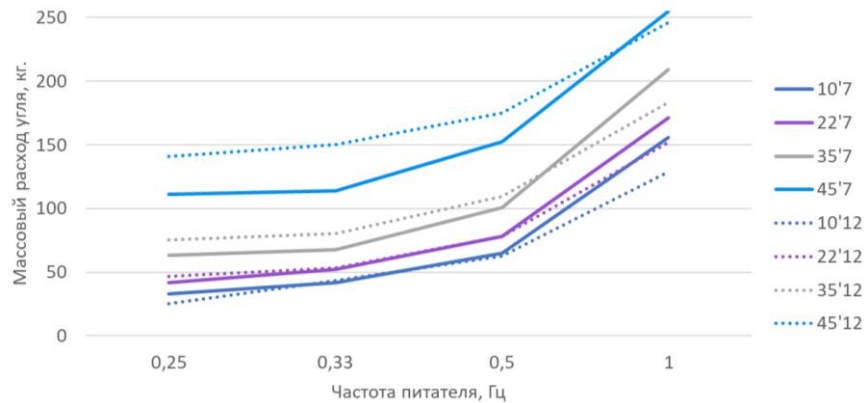


Рисунок 13 – Массовый расход угля при разных сочетаниях угла наклона заслона, частоты возвратно-поступательного движения питателя и угла его наклона

Питатель секции, совершающий возвратно-поступательные движения с высокой частотой в мелкодисперсной среде, ограниченной боковыми стенками, подвержен наибольшему и при этом интенсивному износу по сравнению с остальными элементами секции крепи (рисунок 14). Материал, из которого может быть изготовлен питатель должен быть износостойким и, для снижения нагрузки на приводную систему и уплотнители гидроцилиндров, иметь небольшую массу. Рассмотрено 5 марок сталей (14ХГ2САФД, 50Г2, 70, 40ХС, 75). Сталь 14ХГ2САФД, обладающая наибольшей износостойкостью (на 11 % выше среднего значения), дороже среднего на 21,7 % и масса питателя на 6,4 кг выше среднего. Самый дешевый вариант, Сталь 75 (на 17,5 % дешевле среднего), обладает наихудшей износостойкостью (на 6,7 % ниже среднего) при сравнительно большом весе. Наименьшей массой (на 10,6 кг легче среднего) при повышенном показателе износостойкости на 3,6% обладает Сталь 50Г2, стоимостью на 9 % выше среднего.

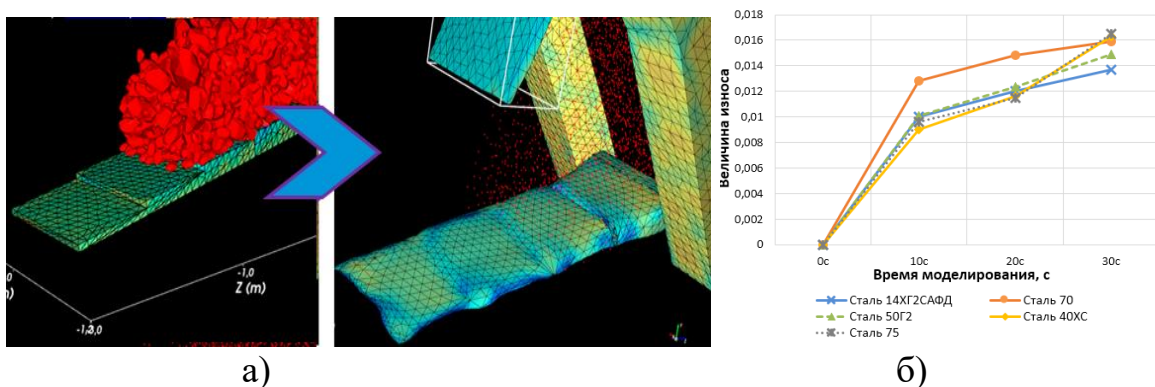


Рисунок 14 – Визуализация износа питателя а) и сравнение вариантов материалов для его изготовления б)

Проведена серия экспериментов по исследованию потока ГМ в системе «питатель-заслон». Первый эксперимент предполагал выпуск ГМ с помощью питателя, совершающего возвратно-поступательные движения со скоростью 0,5 Гц, а затем – резкую остановку. В модели с углом наклона заслона 22 градуса после остановки питателя вышло 70,4 кг в течение 2 секунд, после чего поток ГМ достиг состояния

равновесия и остановился. В модели с углом наклона заслона 45 градусов до достижения состояния равновесия потока было выпущено 4,12 тонны в течение 36,5 секунд, что превышает результат предыдущего эксперимента в 58 раз.

Во втором эксперименте выпускное окно было закрыто до момента, пока частицы, составляющие массив ГМ над крепью, не достигли состояния покоя. Затем выпускное окно было открыто и частицы начали проходить сквозь него под действием силы тяжести и давления со стороны других частиц, при этом питатель оставался неподвижным. В модели с углом наклона заслона 22 градуса после открытия окна вышло 253 кг за 5 секунд, и затем поток достиг состояния покоя. В модели с углом наклона заслона 45 градусов до достижения состояния равновесия потока было выпущено 2,79 тонн в течение 35 секунд, что превышает результаты при 22 градусах в 11 раз.

Из полученных данных видно, что при угле наклона заслона в 45 градусов поток ГМ истекает неконтролируемо за счет того, что заслон не ограничивает его, а угол между склоном стекающей ГМ и горизонтальной плоскостью превышает угол естественного откоса и составляет 42 градуса. При этом было замечено, что верхний слой потока движется быстрее, чем тот, который находится непосредственно на питателе, т.е. наблюдается зона ускоренного истечения ГМ в верхнем слое.

Расчетное теоретическое значение массового расхода ГМ при угле наклона заслона 45 градусов и частоте движение питателя 1 Гц составляет 164 кг/с. Однако в имитационной модели данное значение составляет 250 кг/с. Разница в 1,5 раза объясняется вышеописанными экспериментами, в которых была выявлена зона повышенного истечения в верхнем слое потока. Таким образом, возвратно-поступательное движение питателя и перемещение им нижнего слоя угля не только поддерживает процесс самоистечения, но и ускоряет его до значения + 86 кг/с.

Наличие в верхнем слое потока зоны ускоренного истечения при максимально возможных параметрах работы крепи визуализировано на рисунке 15, который получен с помощью фильтрации частиц по абсолютной поступательной скорости (Absolute Translational Velocity) и с помощью встроеной эйлеровой статистики в Rocky DEM. На рисунке видно, что при движении питателя в крайнее левое положение (вперед), нижний поток, лежащий непосредственно на питателе, сдвигается по направлению движения питателя, при этом верхний поток движется с явно большей скоростью. При движении питателя в крайнюю правую точку (назад) ускорение верхнего слоя сохраняется в то время, как нижний слой потока практически не перемещается.

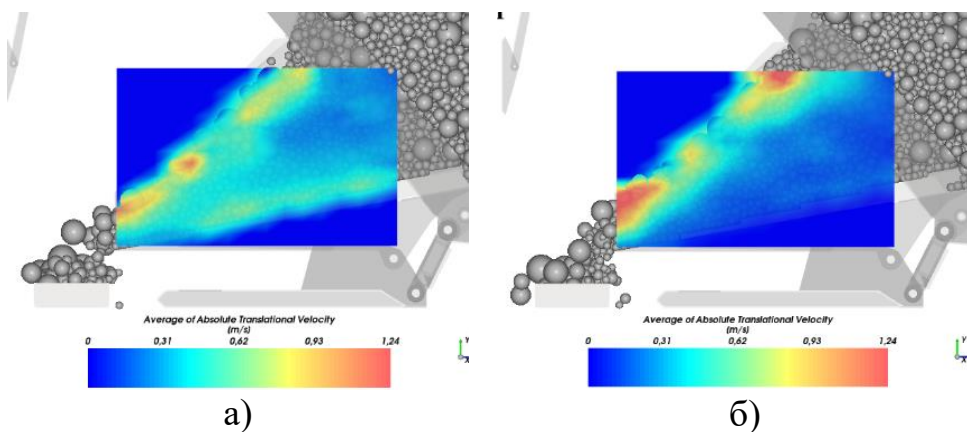


Рисунок 15 – Визуализация средней скорости движения потока при сдвиге питателя (при 45 градусов и 1 Гц) а) влево и б) вправо

При неподвижном питателе также наблюдается самоистечение верхнего слоя. Как видно из рисунка 16 нижний слой находится в покое, т.к. на него не воздействует питатель. Средняя скорость верхнего потока в данном случае составила 0,83 м/с.)

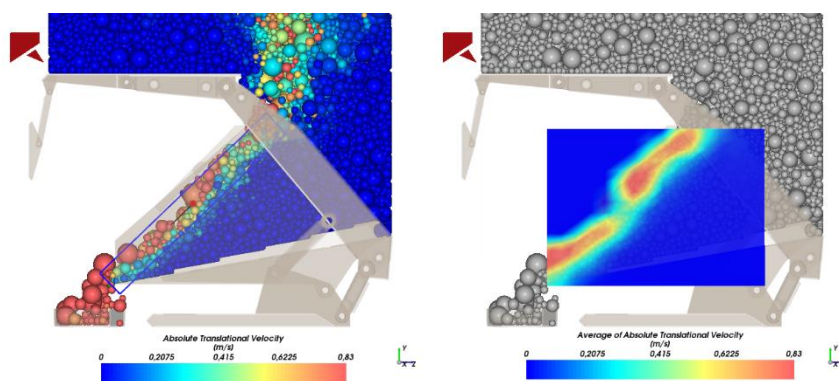


Рисунок 16 – Движение потока при неподвижном питателе (45 градусов)

Скорость перемещения верхнего слоя в модели с подвижным питателем больше скорости в модели с неподвижным питателем в 1,23 раза.

При ограничении потока ГМ заслоном пропадает его четкое разделение на слои, т.е. частицы в потоке движутся за счет перемещения питателя, а увеличение угла наклона заслона повышает пропускную способность потока не только за счет расширения его поперечного сечения, но и за счет появления зоны ускоренного истечения, в которой частицы движутся быстрее.

В ходе проведения экспериментов с потоком при угле наклона заслона 45 градусов и частотой работы питателя 1 Гц было замечено, что помимо нижнего слоя, движущегося за счет работы питателя, и верхнего слоя, также наблюдается средний слой, находящийся между двумя вышеописанными слоями (рисунок 17). Такой слой движется медленнее, чем нижней и верхний слои, и его скорость составляет 0,45 м/с, что меньше скорости нижнего и верхнего слоев в 1,3 и 2,8 раза соответственно.

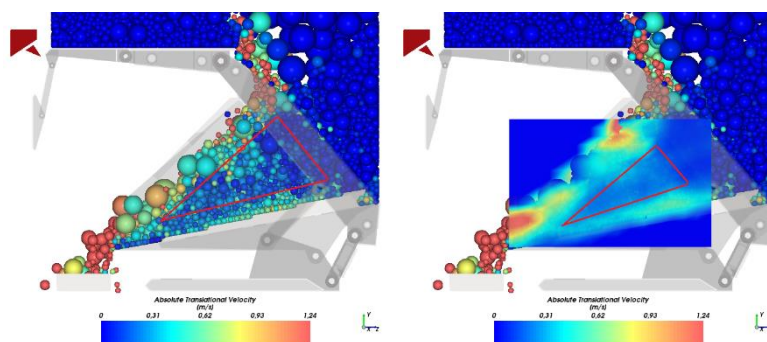


Рисунок 17 – Выделение среднего слоя потока

Установлено, что крупные частицы располагаются в основном в верхнем слое, в то время как в нижнем слое находятся частицы малого размера (рисунок 18).

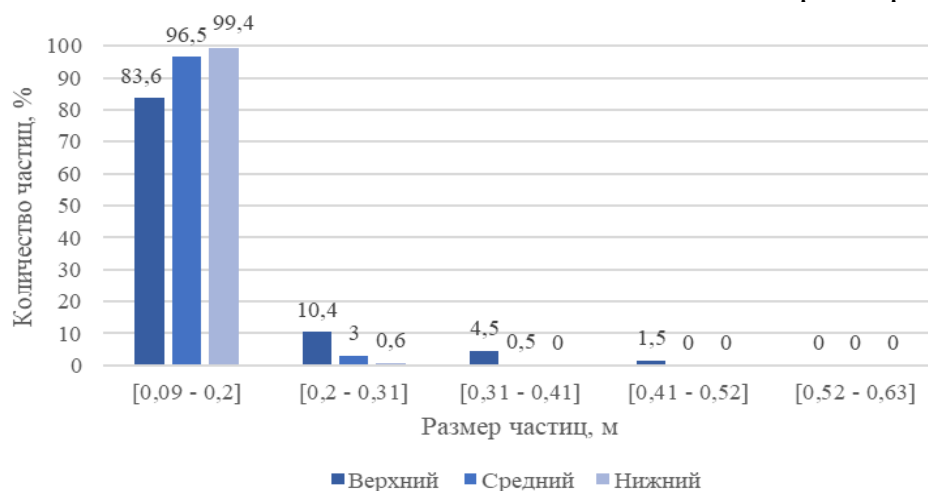


Рисунок 18 – Распределение размеров частиц по слоям с разной скоростью

Отличительными особенностями технологии эффективного освоения угольных месторождений комплексом с управляемым выпуском подкровельной толщи является наличие двух специфических источников пылеобразования. Часть пыли будет поступать из зоны погрузки при падении угля ввиду большой мощности пласта. Дополнительными источниками пыли являются процессы разрушения и выпуска угля подкровельной толщи, сопровождающиеся раскалыванием и раздавливанием кусков угля, трением кусков угля друг о друга и по металлической поверхности крепи и транспортирующей арматуры. Разработан способ пылеподавления (патент на изобретение № 2745908), заключающийся в установке на очистное оборудование дополнительных элементов: на комбайн - коллектор тумана для создания туманообразующих завес, осаждающих мелкую пыль фракцией менее 50 мкм; на заслон питателя секции крепи - дополнительные элементы в виде жесткого веерообразного распылителя высокого давления для орошения потока угля (рисунок 19).

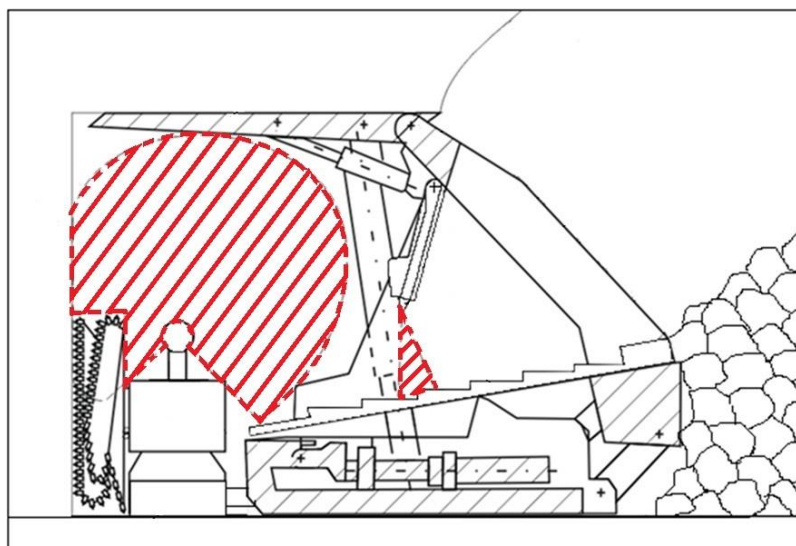


Рисунок 19 – Способ пылеподавления в технологии с выпуском угля подкровельной толщи

Применение дополнительных элементов орошения позволит обеспечить рациональную схему пылеподавления с учетом условий её применения, обеспечив возможность управлять пылевым потоком, снизить запыленность воздуха в шахте и исключить вероятность возникновения взрывов с участием угольной пыли.

В **пятой главе** проведено обоснование режимных параметров технологии выпуска угля подкровельной толщи, обеспечивающих наиболее стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера при одновременном выпуске угля из нескольких секций. Для оценки загруженности участка конвейера по массе и производительности выпуска секции крепи используются созданные в среде моделирования Rocky DEM объекты – пользовательские процессы, предназначенные для сбора статистики по входящим и выходящим за рамки определенного диапазона частицам, а также по фактической заполненности данного диапазона в реальном времени.

Рассмотрены 4 режима выпуска: индивидуальный, волновой, групповой и площадной (рисунок 20). В индивидуальном режиме питатели включаются поочередно на каждой крепи после того, как на предыдущей секции будет достигнута граница порода-уголь. При волновом режиме питатели включаются последовательно на каждой секции с некоторой временной задержкой. При групповом режиме питатели начинают работу поочередно в группах из нескольких секций. Площадной режим предполагает одновременную работу всех питателей с одинаковой скоростью выпуска. Возможен и любой другой произвольный режим.

Для определения зависимости между режимными параметрами выпуска угля подкровельной толщи и объёмом перемещаемой горной массы был изучен процесс выпуска подкровельной толщи во времени при различных режимах работы секций. При всех вариантах, кроме площадного выпуска, наблюдаются сильные всплески. Они возникают в момент окончания выпуска одной секцией крепи и начала выпуска другой.

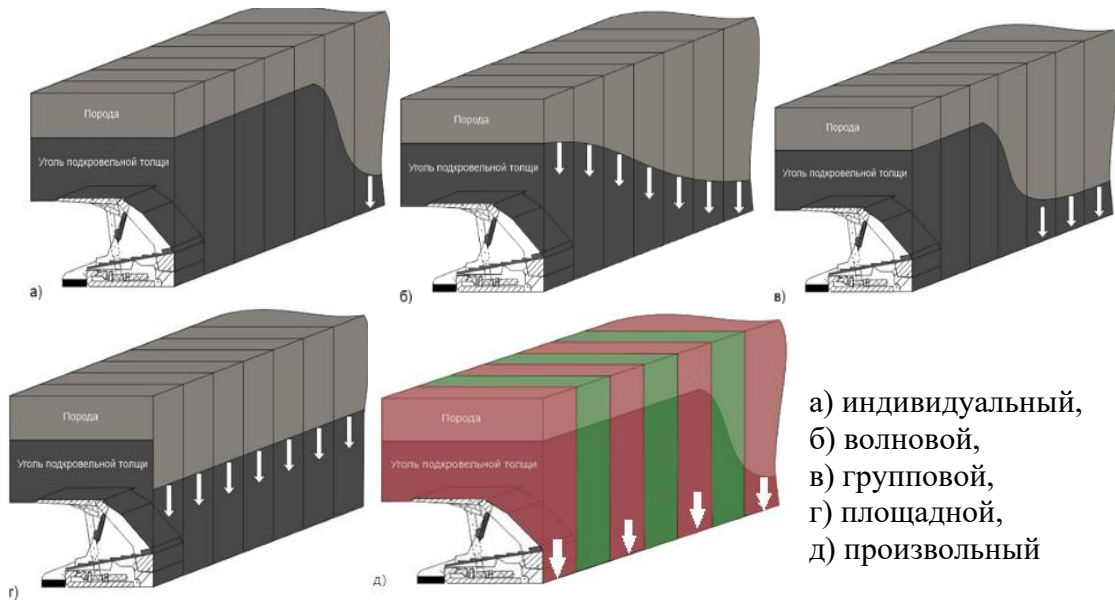


Рисунок 20 – Возможные режимы выпуска угля подкровельной толщи

Кроме этого, существенный прирост по массе получается на конвейере, когда на него начинает поступать порода. Проведен анализ процесса выпуска с позиции взаимного сочетания угла наклона заслона и скорости возвратно-поступательного движения питателя. На рисунке 21 приведены сводные данные по массе угля, перемещаемого двухметровым участком скребкового конвейера при исследуемых режимах выпуска.

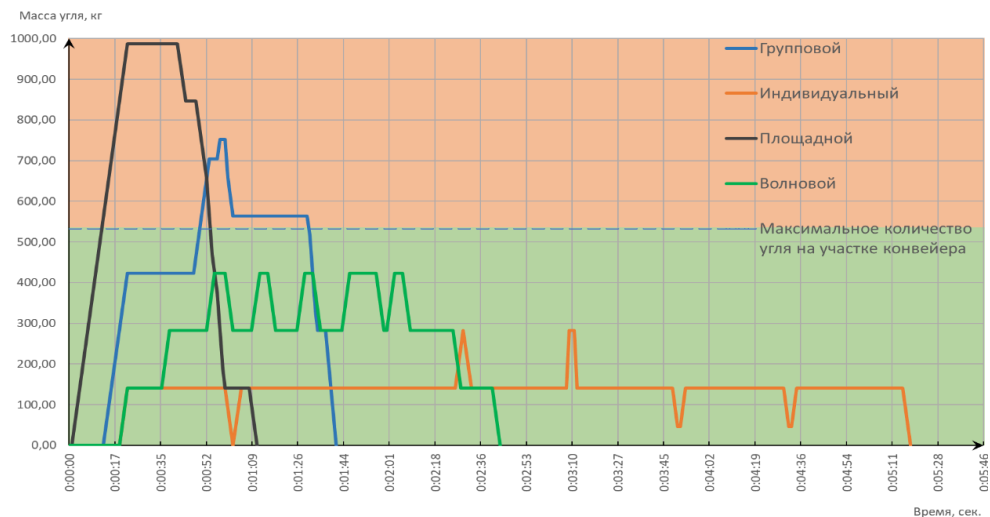


Рисунок 21 – Масса угля на двухметровом участке скребкового конвейера при разных режимах выпуска

Установлено, что для промышленной реализации более стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера при одновременном выпуске угля из нескольких секций по сравнению с другими режимами обеспечивает волновой режим выпуска угля, который не позволяет обеспечить максимальную производительность выпуска на локальных участках в сравнении с более 1,5-кратной величиной при площадном режиме, но его реализация не приводит к появлению динамических

нагрузок на приводную систему скребкового конвейера вследствие значительного переполнения (либо недогруза) в моменты переключения работы между секциями при других режимах выпуска.

Для условных ГГУ и ГТУ для волнового режима взаимные сочетания угла наклона заслона и частоты работы питателя для достижения оптимальной скорости выпуска угля в графическом виде представлены на рисунке 22.

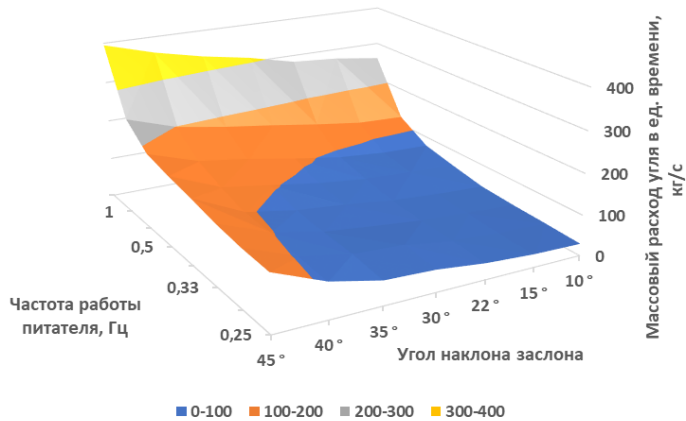


Рисунок 22 – График средней скорости выпуска угля при возможных сочетаниях угла наклона заслона и частоты работы питателя при обеспечении постоянного расстояния от заслона до питателя

Для реализации технологии при рассматриваемых ГГУ для максимально возможной загрузки конвейера при волновом выпуске необходимо обеспечить следующий массовый расход угля (таблица 6).

Таблица 6 - Значения массового расхода угля на семи секциях при волновом режиме

Секция Этап	Массовый расход угля на секции, кг/с														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	...
1	60	60	60	40	30	24	20								
2				60	60	60	40	30	24	20					
3					60	60	60	40	30	24	20				
4						60	60	60	40	30	24	20			
...							

Для 1, 2 и 3 секции – 60 кг/с, 4 секция – 40, 5 – 30, 6 – 24 и 7 – 20 кг/с. После того, как на первых трёх секциях будет достигнута граница порода-уголь, выпуск на них нужно прекратить и запустить 8, 9 и 10, при этом обеспечить изменение скорости выпуска в соответствии с установленным распределением скоростей по секциям. Начиная с третьего этапа такое смещение нужно проводить на одну секцию. Таким образом схемы запуска питателей N управляемых секций крепи и скорость выпуска угля на каждой из них в общем случае следующая:

1. Произвести запуск питателей N управляемых секций крепи с расчётными V_i .

2. По достижению на первой из N секции требуемого уровня разубоживания, выпуск на ней прекратить, произвести запуск питателя $N+1$ секции.
3. V_i на каждой из N секций изменить по схеме: $V_{(i+1)} = V_i$. Т.е. на второй секции V_2 поднимается до скорости V_1 , на третьей V_3 – до V_2 и т.д.
4. Повторять пп. 2 и 3 до достижения последней секции механизированного комплекса.

В **шестой главе** на примере реальных ГГУ и ГТУ проведено обоснование параметров технологии с выпуском угля подкровельной толщи, позволяющие обеспечить наибольшую её эффективность с точки зрения интегрированного сочетания показателей: выпущенной горной массы, процента разубоживания, потерь угля за крепью и частоты образования завесаний.

Исходные данные для моделирования:

- Прототип: пласт 21 шахты «Ольжерасская-Новая» Ольжерасского месторождения Кузбасса, мощность выпускаемого угля – 2,8 м, мощность предварительно разупрочненных пород кровли – 6 м.
- Режим выпуска: волновой, количество управляемых секций – до семи.
- Величина подвигания забоя 14,6 м включает шесть последовательных выпусков угля после трёхкратных передвижек.
- Параметры системы «питатель-заслон»: угол наклона питателя – 12 градусов, частота возвратно-поступательного движения [0,2;2] Гц, угол наклона заслона [0;45].
- Параметры модели: Физические и геометрические параметры частиц – таблица 2, численные модели – таблица 4.
- Параметры скребкового конвейера: производительность **16 т/мин**, скорость движения тягового органа **1,0 м/с**. [«Анжера-30» (ОАО «Анжеромаш»)].
- Масса угля на 1 м длины конвейера: **266,6 кг/м** рассчитана из часовой теоретической производительности конвейера при равномерной загрузке угля и постоянной скорости движения тяговой цепи конвейера.

В результате разработана модель, представленная на рисунке 23. Во всех экспериментах исключались из рассмотрения временные интервалы, соответствующие первому выпуску и следующей за ним передвижке. Ввиду больших требований к вычислительным ресурсам и большого объёма экспериментов в каждой серии в модели принято допущение, что моделируется работа одной секции крепи.

В таком случае моделируется массив с параметрами, соответствующими реальным физическим характеристикам ГМ (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность), с общим числом шарообразных частиц 56 929 штук различного диаметра, засыпанных случайным образом. В этом случае фигура выпуска в поперечном направлении урезается с обеих сторон, сохраняя свою форму в продольном сечении, что имеет принципиальное значение в условиях данного эксперимента. Задачей являлась оценка поведения массива при нескольких передвижках секции, проходящих именно в продольном сечении и вносящих существенные изменения

в траекториях движения частиц. При этом для поперечного сечения условия одинаковы по всему объёму. Кроме того, для повышения адекватности модели и исключения влияния геометрии, ограничивающей массив модельных частиц, для стенок заданы свойства окружающей ГМ.

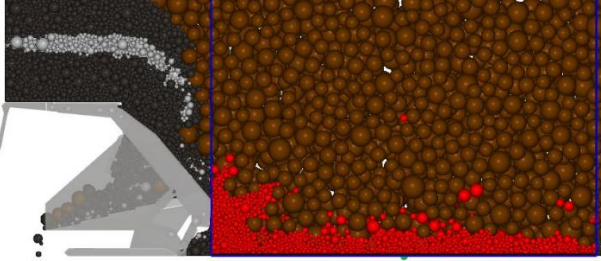


Рисунок 23 – Визуализация результата расчета модели оценки влияния продолжительности единичного выпуска на уровень потерь угля

В каждой серии экспериментов исследовался процесс выпуска при прочих равных параметрах, но разной продолжительностью единичного выпуска между передвижками крепи в интервале от 14 до 182 секунд для оценки полноты выемки угля и величины его разубоживания.

Определено, что зависимость среднего объёма выпуска угля от продолжительности выпуска имеет практически линейных характер с выходом на «полку» после определенного времени. Например, при мощности пласта 6,8 метров прирост объёма выпускаемого угля прекращается после 140 секунд (рисунок 24). Это обусловлено достижением выпускного окна породой. Дальнейшее увеличение времени выпуска приведет к большему разубоживанию выпускаемого угля без роста его объёма по квадратичной зависимости $y = 0,02x^2 + 0,02x - 0,12$ с коэффициентом $R^2 = 0,88$. Порода будет достигать выпускного окна в диапазоне 28-42 секунды, а при продолжительности выпуска 154 секунды составит 24 % от массы выпущенного угля.

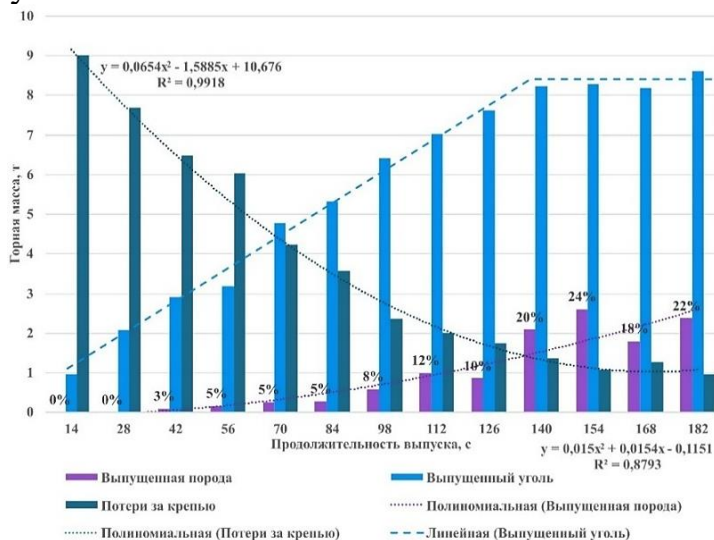


Рисунок 24 – Зависимость массы выпущенного угля, пустой породы и потерь от продолжительности единичного выпуска

С другой стороны увеличение продолжительности выпуска приводит к сокращению потерь угля, оставшегося в завальном пространстве по квадратичной зависимости $y = 0,07x^2 - 1,59x + 10,68$ с коэффициентом $R^2 = 0,99$. На интервале продолжительности выпуска с 14 до 154 секунд произойдет девятикратное снижение потерь угля с 9 до 1 тонны для одной секции крепи после однократного выпуска.

При проведении экспериментов по исследованию режимов выпуска угля под кровельной тощи было замечено, что часто при длительном времени выпуска образуется плотное скопление ГМ, перекрывающее выпускное окно, в виде арок зависания. Установлено, что доля зависаний, устранившихся по причине самообрушения, составила менее 5 % от общего числа проведенных экспериментов.

Полученные результаты (рисунок 25) свидетельствуют о том, что с увеличением продолжительности времени единичного выпуска увеличивается и вероятность образования статических сводообразований, препятствующих выпуску ГМ. При минимальных значениях времени единичного выпуска угля вероятность их возникновения близка к нулю, но при увеличении продолжительности количество зависаний значительно возрастает. Так при времени единичного выпуска выше 154 секунд повышается риск образования числа случайных статических сводообразований (69 % от модельного времени для 168 сек и 74 % для 182 сек соответственно).



Рисунок 25 – График зависимости процента длительности зависаний от продолжительности единичного выпуска

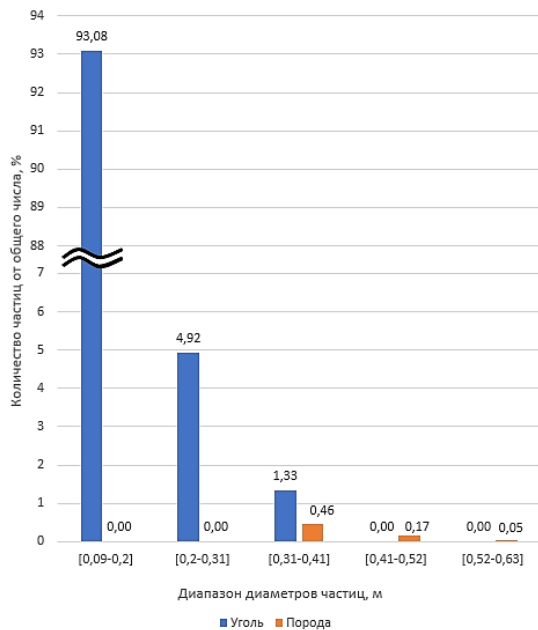


Рисунок 26 – Гистограмма распределения размеров частиц ГМ в области зависаний

Установлено, что 25 % зависаний состояли преимущественно из крупных частиц породы (до 0,63 метров и до 166 кг), 25 % – включали в себя средние частицы угля и породы до 0,49 метров и весом до 90кг, 25 % – состояли из малых частиц угля размером до 0,35 метров и весом до 63 кг и оставшиеся 25 % включали в себя смесь больших и малых частиц как угля, так и породы. Анализ гранулометрического состава в зоне зависаний был проведен на основе 13 численных моделей с разной продолжительностью выпуска ГМ. Результаты сведены в виде гистограммы распределения размеров частиц в зонах зависаний (рисунок 26).

Рассмотрено перемещение частиц, образующих зависание, из их начального местоположения. В модели после образования арки зависания были выбраны и окрашены в яркие цвета 8 частиц, формирующих свод, а затем имитационная модель была возвращена к начальному моменту для отслеживания траектории перемещения и первоначального положения помеченных частиц (рисунок 27).

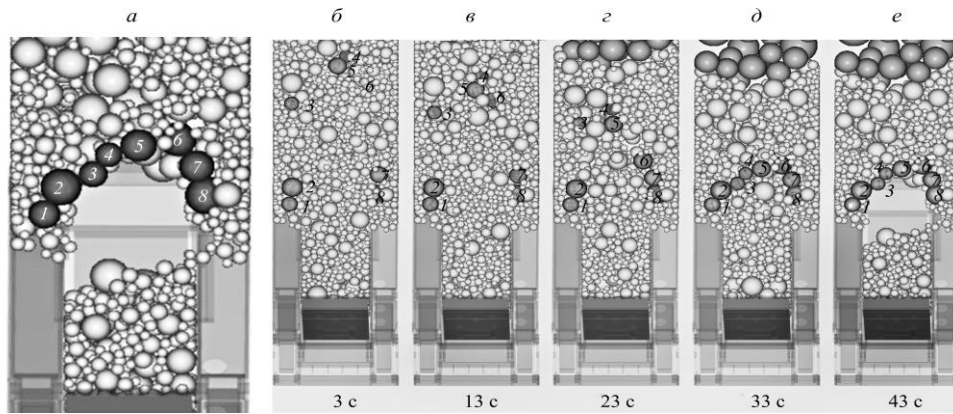


Рисунок 27 – Маркирование частиц, образующих арку зависания (а), и их перемещение в модели во время выпуска: б – 3 с; в – 13 с; г – 23 с; д – 33 с; е – 43 с

Замечено, что в начальном положении частицы образуют фигуру, близкую к перевернутой параболе, и, чем ближе частицы к выпускному окну, тем парабола становится более сжатой по вертикали. Данный пример является «идеальным», т.к. здесь частицы, формирующие дугу зависания, являются относительно крупными и располагаются примерно в одной плоскости (слое). Нельзя с уверенностью сказать, что все зависания формируются подобным образом (недостаточно экспериментальных данных), однако полученный результат подтверждается физическим опытом, описанным в работах J. Tang, и R. P. Behringer, доказывая адекватность разработанных моделей.

В работе приведено исследование зависаний, образующихся в непосредственной близости от выпускного окна, однако с некоторой частотой над выпускным окном в момент движения потока ГМ наблюдалось образование арки (дуги), именуемой в иностранной литературе как *free fall arch*. Над аркой частицы подвергаются контактному напряжению, которое за счет сил трения не дает частицам перемещаться, а под аркой образуется область свободного падения, в которой частицы ведут себя как рыхлый материал и перемещаются только под действием силы тяжести (рисунок 28).

Полученные результаты согласуются с известными исследованиями образования в сужающейся зоне потока сыпучего материала свода, купола, препятствующего движению кусков руды в технологиях с выпуском либо зерна в силосах. В них установлены режимные и конструктивные параметры, обеспечивающие стабильные и безаварийные выпуски, объединенные общей идеей получения единого потока за счёт рассредоточения выпускных отверстий по площади и расположения их на расстоянии, не большем, чем размер зоны потока над каждым из них. При использовании технологии с выпуском угля подкровельной толщи не представляется возможным обеспечить указанные режимы. Это обусловлено тем, что секции крепи невозможно расположить иначе, чем в линию, а производительность выпуска ограничена возможностью забойного скребкового конвейера, на который идет площадный выпуск, при чем в таких режимах, при которых будет обеспечено стабильное и полное его заполнение.

Проведенные исследования показывают, что в некоторых редких случаях возникает явление одновременного образования нескольких сводов (рисунок 29). Условия их возникновения и возможные последствия для рассматриваемой технологии в рамках данной работы не изучены.

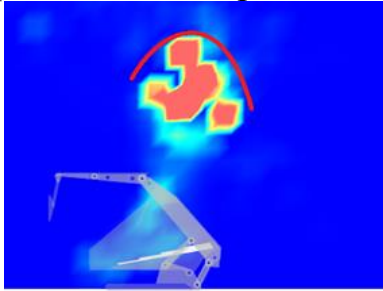


Рисунок 28 – Диссипация энергии в области под аркой свободного падения

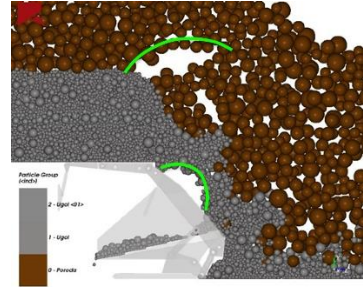


Рисунок 29 – Одновременное образование двух арок зависания

Также было замечено, что свод, опирающийся на перекладины выпускного окна, формируется из частиц угля мелкой фракции. При зависании видно, что большая концентрация таких частиц находится на элементах поддерживающей части крепи вокруг выпускного окна.

Установлена высокая степень сходимости полученных данных с результатами определения оптимального сочетания массы выпущенного угля, процента разубоживания и потерь за крепью (рисунок 30). Так для рассматриваемых входных данных «граничным» с точки зрения процента времени зависаний угля является интервал времени выпуска до 85 секунд, после которого наблюдается значительный рост времени зависания – с 20 до 60 % от общего времени выпуска.

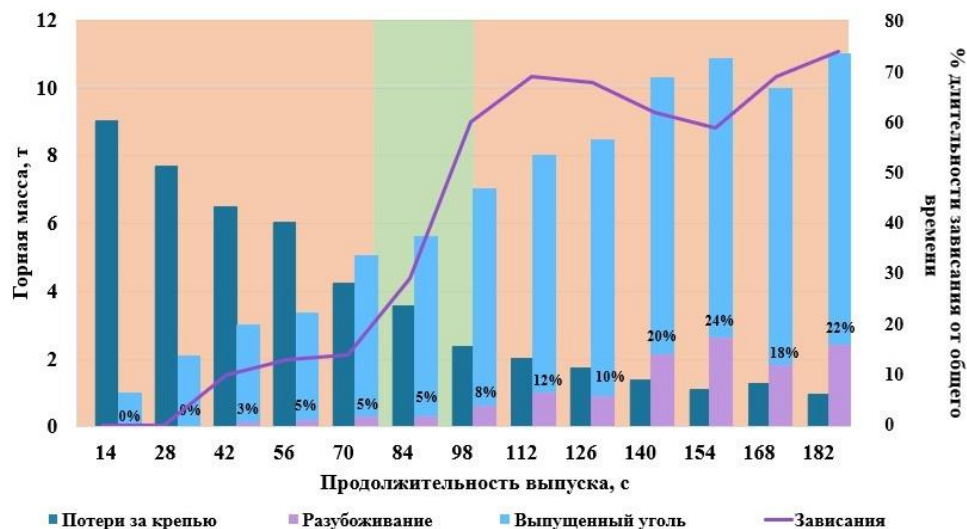


Рисунок 30 – Выделение интервала продолжительности единичного выпуска, обеспечивающего наилучшие показатели технологии

Исходя из проведенных исследований впервые установлен массив параметров управляемого выпуска угля, позволяющий обеспечить наиболее эффективные показатели технологии с точки зрения сочетания массы выпущенного угля, процента разубоживания, потерь угля за крепью и частоты образования зависаний. Так для рассматриваемых ГГУ и ГТУ на интервале времени единичного выпуска

(75;95) секунд будет выпущено 6,5-7 тонн угля со средним значением выпущенной пустой породы 8 % и потерями угля в завальном пространстве 2-2,3 тонны, что составляет 6,7 % от общей массы пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой разработаны и научно обоснованы технологические и технические решения, обеспечивающие эффективность и безопасность выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля подкровельной толщи специальной механизированной крепью в составе специализированного очистного механизированного комплекса и имеющие важное хозяйственное значение для развития угольной отрасли и экономики страны, повышая полноту выемки и снижая потери и разубоживание полезного ископаемого. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана система компьютерных моделей, позволяющая оценить параметры технологии выемки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной толщи специальной механизированной крепью, проводить предиктивный анализ технологий добычи полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях ведения работ, предсказать эффективность которых традиционными методами проектирования затруднительно ввиду наличия множества случайных факторов и отсутствия действующих прямых аналогов. В основе системы лежит последовательное использование метода дискретных элементов для первоначального единичного расчёта максимального значения массового расхода, дискретно-событийного моделирования для предварительного выбора режима технологии, метода дискретных элементов для моделирования процесса управляемого выпуска раздробленной горной массы и алгоритмов выбора рациональных вариантов сочетания параметров.

2. Численным моделированием установлено, что технология показывает высокую эффективность при выемке мощных угольных пластов, кроме наличия ложной или неустойчивой непосредственной кровли незначительной мощности (менее 3 т/м² при выпускаемой мощности угля более 2,5 м и в отношении по массе менее 1:1 при меньшей мощности) ввиду отсутствия постоянного площадного подпора на угольный пласт сверху, в результате чего поток пустой породы вклинивается в угольный пласт в направлении выпускного окна, замещая собой угольный массив, выталкиваемый в завальную часть и неподлежащий дальнейшему выпуску. При этом высокая производительность и полнота выемки обеспечивается за счёт формирования разворота потока угля, образуемого рядом передвижек очистного механизированного комплекса на величину, близкую к удвоенному значению малой полуоси эллипсоида выпуска, аналогично традиционной технологии с последующей остановкой очистного комбайна и выпуском подкровельной пачки угля специальной механизированной крепью в определенных режимах.

3. Большие размеры выпускного окна секции специальной механизированной крепи позволяют получать высокие значения массового расхода во время выпуска, при этом выявлено, что при полном открытии заслона в системе «питатель-заслон» секции крепи возникает три зоны потока, движущиеся с разными линейными скоростями: зона ускоренного истечения в верхнем слое потока, поддерживаемая и ускоряемая возвратно-поступательным движением питателя; зона нижнего слоя, сдвигаемого ступенями питателя, и средний слой, движущийся медленнее, чем нижний и верхний слои в 1,3 и 2,8 раза соответственно. При этом установлено, что частицы горной массы большей крупности перемещаются преимущественно в верхнем слое, а концентрация мелких частиц по мере приближения к поверхности питателя возрастает, обуславливая его интенсивный износ. Вместе с тем выпуск горной массы через систему «питатель-заслон» является источником дополнительного пылеобразования, снизить которое возможно установкой на заслон секции крепи жесткого веерообразного распылителя высокого давления для орошения потока угля.

4. Установлено, что более стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера при одновременном выпуске угля из нескольких секций специальной механизированной крепи по сравнению с другими режимами обеспечивает волновой режим выпуска угля. Разработана методика определения для конкретных горно-геологических условий при использовании волнового режима выпуска количества, последовательности запуска и значений массового расхода на каждой управляемой секции крепи, позволяющие в динамике поддерживать заполнение конвейера на уровне, близком к максимальному, что достигается установкой по ниспадающей значений величин возвратно-поступательного движения питателя и угла наклона заслона и по достижении требуемого уровня породы в выпускаемой горной массе на первых секциях, прекращением выпуска на них и поэтапного запуска следующих секций. При реализации технологии в волновом режиме целесообразно использовать для средней секции управляемой группы медианные значения угла наклона заслона и частоты возвратно-поступательного движения питателя: 22 градуса и 0,5 Гц соответственно – что даст возможность поддержания «волны выпуска» в непрерывном режиме по длине очистного забоя.

5. Длительность единичного выпуска секцией специальной механизированной крепи определяет показатели эффективности технологии: с её увеличением объём выпущенной горной массы имеет вид кусочно-заданной функции – прямая пропорциональность с выходом на постоянную величину после определенного времени, зависящего от горно-геологических условий, при дальнейшем квадратичном росте процента разубоживания выпускаемого угля. При этом происходит снижение потерь угля, оставшегося в завальном пространстве, описываемое полиномиальной зависимостью второй степени, но наблюдается экспоненциальный рост вероятности статических сводообразований непосредственно над выпускным окном в результате случайной комбинации кусков, удерживаемых в равновесии за счёт сил трения, препятствующих выпуску горной массы с 5 % долей завесаний, устранившихся по причине самообрушения. При практически равномерном распределении

числа зависаний по фракционному составу, большая концентрация мелких частиц (до 0,13 м – 85%) всегда находится на элементах поддерживающей части крепи вокруг выпускного окна. Выявлено, что в начальном положении куски угля, в последующем формирующие зависание, располагаются по линии, близкой к перевернутой параболе; чем ближе куски движутся к выпускному окну, тем парабола становится более сжатой по вертикали.

6. На созданных компьютерных моделях обоснованы сочетания параметров технологии с выпуском угля подкровельной толщи, позволяющие обеспечить наибольшую эффективность выпуска с точки зрения интегрированного сочетания показателей: выпущенной горной массы, процента разубоживания, потерь угля за крепью и частоты образования зависаний.

По совокупности исследований созданы предпосылки решения сложившейся проблемы эффективного программируемого управления движением горной массы при выпуске угля на забойный конвейер специальной механизированной крепью в составе специализированного очистного механизированного комплекса разработки мощных угольных пластов для повышения полноты выемки, снижения разубоживания и потерь угля в недрах.

Ключевые положения диссертационного исследования отражены в следующих основных публикациях:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Моделирование зависаний горной массы при выпуске угля из подкровельной толщи мощных пологих пластов / А. Н. Стародубов, В. И. Клишин, А. Н. Кадочигова, А. В. Каплун // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 1. – С. 109-119. – DOI 10.15372/FTPRPI20250110.

2. Исследование параметров выпуска угля из подкровельной толщи средствами имитационного моделирования / В. И. Клишин, А. Н. Стародубов, В. А. Крамаренко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 4. – С. 44-51. – DOI 10.15372/FTPRPI20230405

3. Стародубов, А. Н. Использование метода дискретных элементов для имитационного моделирования выемки угля очистным комбайном / А. Н. Стародубов, А. Н. Кадочигова, А. В. Каплун // Горная промышленность. – 2023. – № S2. – С. 150-154. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-S2-150-154.

4. Исследование технологии добычи угля в сложных горно-геологических условиях с использованием математического моделирования / А. Н. Стародубов, В. И. Клишин, А. Н. Кадочигова, А. В. Каплун // Горная промышленность. – 2023. – № S5. – С. 47-52. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-5S-47-52.

5. Стародубов, А. Н. Проблемы пылеобразования и мероприятия по обеспечению безопасности и экологичности разработки угольных месторождений / А. Н. Стародубов, В. П. Кравцов, В. В. Зиновьев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4(128). – С. 99-105. – DOI 10.26730/1999-4125-2018-4-99-104.

6. Черкасов П.В., Стародубов А.Н. Подходы к оценке излишне выпущенной горной массы в технологии выпуска угля подкровельной толщи // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 139-147. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-139-147, EDN: BRZYZD

7. Стародубов А.Н. Обоснование области применения технологии выемки мощных пологих пластов с управляемым выпуском угля средствами компьютерного моделирования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 171-181. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-171-181, EDN: YAPFAM

8. Обоснование параметров технологии с выпуском угля подкровельной толщи, обеспечивающие наибольшую её эффективность / А. Н. Стародубов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 1. – С. 122-130. – DOI 10.15372/FTPRI20250613. EDN: GTITRR.

9. Стародубов А.Н. Конструктивные параметры оборудования технологии выемки мощных пластов // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 5 (181). С. 88-96. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-88-96

10. Черкасов П.В., Баловнев Е.А., Стародубов А.Н. Разработка алгоритма интеграции потоков данных цифровой модели и физического оборудования механизированного комплекса с управляемым выпуском // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 182-190. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-182-190, EDN: ZVMTEV

Патент и свидетельства на программы для ЭВМ:

11. Патент на изобретение Способ разработки мощного пологого пласта с выпуском угля подкровельной толщи № 2745908 С2 / А. Н. Стародубов, В. П. Кравцов, В. И. Клишин; рег. 02.04.2021.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683561 Расчёт массового расхода при выпуске угля подкровельной толщи / А. Н. Стародубов, П. И. Николаев, В. В. Зиновьев [и др.]; рег. 14.10.2024.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661726 Специализированная компьютерная система оценки работы комплекса с управляемым выпуском угля подкровельной толщи / А. Н. Стародубов, В. В. Зиновьев, В. А. Крамаренко [и др.]; рег. 01.06.2023.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663614 Имитационная модель технологии эффективного освоения угольных месторождений комплексом с роботизированным управляемым выпуском подкровельной толщи / В. И. Клишин, В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов [и др.]; рег. 10.2019.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690382 Программа контроля, управления и корректировки режимов выпуска угля подкровельной толщи / П. В. Черкасов, Е. А. Баловнев, А. Н. Стародубов; рег. 06.11.2025 г.

В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science / Scopus

16. Стародубов А.Н. Связь параметров фигуры выпуска с показателями эффективности технологии отработки мощных угольных пластов // Уголь. 2025;(12):77-82. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-77-82. **(Scopus)**

17. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В. Методика повышения скорости и достоверности принятия решения при проектировании очистных работ в сложных горно-геологических условиях // Уголь. 2025;(10):99-106. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-99-106. **(Scopus)**

18. Исследование потока горной массы на питателе секции крепи при выпуске угля из подкровельной толщи мощных пологих пластов средствами имитационного моделирования / А. Н. Стародубов, В. И. Клишин, А. Н. Кадочигова, А. В. Каплун // Уголь. – 2024. – № 9(1184). – С. 53-60. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-9-53-60. – EDN EESHLA. **(Scopus)**

19. Starodubov A. et al. Review of mining equipment with controlled robotized subvel caving with specialized software //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 174. – С. 03012. 10.1051/e3sconf/202017403012. **(Web of Science)**

20. Starodubov A. N., Sinoviev V. V., Klishin V. I. Research of draw mining method modes using simulation model //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Т. 377. – №. 1. – P. 012032. – DOI 10.1088/1755-1315/377/1/012032. **(Web of Science)**

21. Starodubov, A. N. The development of simulating system of robotized technologies for thick and acute coal seams / A. N. Starodubov, V. V. Zinoviev, V. I. Klishin // Journal of Physics: Conference Series: The IX INTERNATIONAL RUSSIAN-KAZAKHSTAN SYMPOSIUM "COAL CHEMISTRY AND ECOLOGY OF KUZBASS" dedicated to the thirtieth anniversary Kemerovo Scientific Center SB RAS (IX-IRKSC-CEK 2020), Kemerovo, 11–15 октября 2020 года. Vol. 1749. – Kemerovo: IOP Publishing, 2021. – P. 012040. – DOI 10.1088/1742-6596/1749/1/012040. **(Scopus)**

Подписано к печати ... г. Формат 60×84/16

Уч.-изд. л. Тираж ... экз. Заказ _____

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а