

На правах рукописи

БОТВЕНКО Денис Вячеславович

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА И ЛОКАЛИЗАЦИИ
ВЗРЫВНОГО ГОРЕНИЯ РУДНИЧНЫХ ГАЗОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ
ГОРНЫХ ПОРОД НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

**Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(горная промышленность)**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Кемерово – 2020

Работа выполнена в акционерном обществе «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» (АО «НЦ ВостНИИ»)

Научный консультант: **Казанцев Владимир Георгиевич,**
доктор технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Фрянов Виктор Николаевич,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехнологии Института горного дела и геосистем ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Громов Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Инжинирингового центра быстрого промышленного прототипирования высокой сложности ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита состоится 16 октября 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 520.063.03 при АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» по адресу: 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» по адресу: 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, д. 3, и на сайте института: <http://www.nc-vostnii.ru/napravleniya-deyatelnosti/nauchno-obrazovatel'naya-deyatelnost/soiskateli.php>.

Автореферат разослан « » июля 2020 г.

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 520.063.03
доктор технических наук, профессор



С. А. Прокопенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что в настоящее время продолжающаяся тенденция к увеличению интенсификации ведения горных работ в своей динамике существенно опережает решение проблем оценки техногенных факторов, вызывающих несчастные случаи и аварии с возрастающим числом человеческих жертв. Устранение или минимизация их последствий представляет собой одно из важнейших направлений в обеспечении промышленной безопасности предприятий угольной промышленности.

С точки зрения техногенных катастроф, определяющими факторами при зарождении и развитии неуправляемых аварийных ситуаций являются чередующиеся друг за другом переходные геомеханические процессы, провоцирующие наиболее тяжелые аварийные последствия – вспышки и взрывы рудничных газов. В этой связи для предприятий, ведущих добычу полезных ископаемых подземным способом, повышение безопасности горного производства непосредственно связано с необходимостью выявления, изучения и учета событий, предшествующих, побуждающих и провоцирующих развитие взрывного горения пыли- и метановоздушных смесей.

Установление источников воспламенения рудничных газов, с точки зрения механического поведения массива горных пород, приводит к необходимости изучения техногенных закономерностей, возникающих в результате фрикционных динамических контактов разрушенных отдельностей массива, изучения закономерностей трибологических эффектов при обрушении горных пород, а также поиска других источников проявлений термических эффектов, вызывающих вспышки углеводородных смесей.

Таким образом, в качестве актуальной и требующей ускоренного решения устанавливается крупная научно-техническая проблема – разработка методологических основ прогноза предпосылок возникновения взрывного горения рудничных газов при разрушении горных пород, обуславливающих высокую вероятность взрывов метановоздушных смесей в горных выработках в условиях интенсификации горного производства.

Объектом исследования является углепородный массив.

Предметом исследования являются техногенные опасности, возникающие в массиве горных пород у выработок, способные вызвать вспышки и взрывное горение метановоздушных смесей.

Основная идея диссертации заключается в комплексном учете влияния трибологических и электрических проявлений, возникающих при разрушении горного массива, определяющих причины, признаки и характер воспламенений рудничных газов путем превентивного контроля фрикционной опасности

вмещающих пород, а также в разработке способов локализации взрывного горения.

Цель работы.

Разработка методологических основ прогноза и локализации вспышек и взрывного горения рудничных газов на угольных шахтах при разрушении горных пород для повышения безопасности горного производства.

Задачи исследования.

В соответствии с целью при выполнении работы решались задачи, совокупность которых определяет содержание научных результатов:

1. Провести анализ причин воспламенения рудничных газов при разрушении горных пород на угольных шахтах и положений действующих нормативных документов по контролю и предупреждению установленных опасностей.

2. Провести экспериментально-теоретические исследования условий воспламенения метановоздушных смесей при фрикционном динамическом взаимодействия частей горных пород в рамках решений связанных задач нестационарной теплопроводности и упругости.

3. Провести исследования деформирования и характера разрушения углепородного массива сложного строения в окрестности горных выработок с целью районирования взрывоопасных зон у обнажений как причин инициирования внезапного возгорания рудничных газов.

4. Разработать и обосновать физико-механическую и математическую модели деформирования и разрушения углепородного массива, обладающего сложной реологией.

5. Провести экспериментально-теоретические исследования условий воспламенения метановоздушных смесей вследствие электрических разрядов, возникающих при деформировании и разрушении горных пород.

6. Разработать способы и рекомендации по локализации и подавлению взрывного горения рудничных газов в горных выработках без присутствия человека.

7. Разработать методику контроля свойств материалов горных пород по параметрам пожарной и фрикционной опасности, внести предложения по этапам контроля в нормативные документы.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Методология исследования трибологических и электроразрядных напряжений основана на экспериментально-теоретическом моделировании деформирования и разрушения углепородного массива на базе разработанных численных методик решений связанных задач нестационарной

теплопроводности и упругости и на испытаниях образцов горных пород в лабораторных условиях.

2. Местоположение опасных зон, в которых возможно воспламенение метановоздушных смесей взрывчатой концентрации устанавливается в результате моделирования процессов деформирования углепородного массива у обнажений, в терминах образования одного или нескольких фронтов разрушений, развивающихся во времени.

3. Вспышки, возгорания и взрывы метановоздушных смесей в выработках угольных шахт обусловлены, в том числе, проявлениями техногенного характера при разрушении горных пород, как результат динамического фрикционного взаимодействия частей (отдельностей) пород, а также как результат возникновения разноименных электрических зарядов на берегах зарождающихся и развивающихся трещин, трещиноподобных дефектов, между поверхностями динамически взаимодействующих частей горных пород вследствие реализации пьезоэлектрического эффекта.

4. Методика оценки степени фрикционной опасности кварцесодержащих горных пород в лабораторных условиях основана на предварительном формировании пятна физического контакта между динамически взаимодействующими образцами и, как результат, на упрочнении приповерхностных слоев материала в пятне контакта за счет увеличения содержания диоксида кремния.

5. Локализация и подавление взрывного горения рудничных газов в горных выработках, в том числе при переходе аварии в неуправляемое состояние, обеспечивается направленным встречным воздействием на фронт ударной волны и пламени зарядом газопорошковой смеси с эффектами синергизма средствами динамической автономной взрывозащиты, работающими в автономном или автоматическом режиме.

6. Методика превентивного контроля горных пород по параметрам пожарной и фрикционной опасности включает в себя комплекс методов испытаний репрезентативных образцов в лабораторных условиях с выходом на критерии безопасности и классификацию опасности материала по группам как составных частей нормативных документов.

Научная новизна.

Теоретического характера:

1. Разработана методология анализа и последующего синтеза трибологических эффектов во взрывоопасных зонах горного массива как совокупность специальных методов познания, включающих: процедуры оценки геомеханического состояния пород и угля у обнажений горных выработок; процедуры термомеханического моделирования процессов в пятнах контакта

динамически взаимодействующих разрушаемых и разрушенных частей горных пород; процедуры экспериментального установления потенциальной фрикционной пожаро- и взрывоопасности вмещающих пород в лабораторных условиях.

Прикладного характера:

2. Установлено, что в результате динамического фрикционного взаимодействия частей кварцсодержащих горных пород при контактных давлениях, близких по уровню к пределу прочности, температура пятна контакта может достигать температуры плавления материала ($\sim 1300^\circ\text{C}$) за время от 0,01 до 0,1 мс при относительной скорости трения в диапазоне от 1 до 10 м/с.; что вследствие фрикционного трения кусков пород для зажигания метановоздушной смеси взрывоопасной концентрации объем прогретой смеси должен составлять не менее $9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$ при толщине слоя фазовых превращений в пятне контакта 100–200 мкм, при этом минимальная энергия воспламенения метановоздушной смеси взрывчатой концентрации соответствует величине 0,287 мДж при минимальной длительности действия прогрева, равной 110 мкс.

3. Установлено, что при динамических фрикционных взаимодействиях пород минимальная средняя температура пятна контакта, необходимая для вспышки метановоздушной смеси, составляет не менее 746°C , что для средних значений теплофизических и механических характеристик кварцитов и давлении между образцами не менее 18 % от величины предела прочности породы, при пути трения образцов, равном 0,03 м, средняя скорость взаимного смещения образцов, необходимая для воспламенения МВС, составляет не менее 7,2 м/с, при пути трения 0,06 м скорость смещения образцов составляет не менее 6,2 м/с, при пути трения 0,12 м скорость взаимного смещения составляет не менее 4,7 м/с.

4. Установлено, что при разрушении образцов кварцсодержащих горных пород одним из источников возникновения разноименных электрических зарядов на берегах зарождающихся и развивающихся трещин является пьезоэлектрический эффект. При этом энергия, потраченная на искровой разряд, может достигать $8,2 \cdot 10^{-2} \text{ мДж}$ при длине канала плазмы $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, диаметре искры $5,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ и времени существования пробоя 10^{-5} мкс .

5. Разработано устройство импульсного действия для флегматизации пространства атмосферы горных выработок газопорошковой смесью (устройство динамической автономной взрывозащиты) как один из исполнительных элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт. Экспериментально установлено, что для обеспечения локализации взрывного горения рудничных газов необходимо сосредоточение

концентрации огнегасящего порошка по площади не менее чем $0,82 \text{ кг/м}^2$ и не менее $2,1 \text{ кг/м}^3$ при объемном горении смеси.

6. Разработаны методы испытаний и лабораторная установка роторного типа по определению фрикционной опасности горных пород и режущего инструмента.

Теоретическая и практическая значимость научных результатов исследования заключается в разработке методической базы для анализа механического поведения углепородного массива, служащей основой прогноза опасных техногенных проявлений – вспышек и взрывного горения рудничного газа на угольных шахтах.

1. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для расчета горного давления на ЭВМ, учитывающие реальные механические свойства углепородного массива, могут быть использованы непосредственно на практике:

- при сопровождении горных работ для оценки околокритических и критических состояний конструктивных элементов шахтных выработок;
- для адресной оценки местоположения фронта разрушения (трещинообразования) в массиве пород с целью установления вероятных мест инициирования вспышек и взрывного горения рудничного газа на угольных шахтах;

2. Предложена методика, позволяющая уточнить классификацию фрикционной опасности горных пород, в основу которого положены физико-механические и физико-химические свойства массива.

3. На основе проведенных исследований разработана «Методика оценки степени фрикционной опасности кварцесодержащих горных пород», позволяющая установить степень опасности фрикционного воспламенения пыле- и метановоздушных смесей при разрушении горных пород для качественного производственного контроля степени фрикционной опасности.

4. Практическая ценность подтверждается тем, что на основе проведенных исследований разработаны и внесены предложения для качественного производственного контроля степени фрикционной опасности горных пород в следующие нормативные документы:

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 550 от 19 ноября 2013 года;

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах», утверждена Федеральной

службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 462 от 14 октября 2014 года;

– «Методические рекомендации по проведению экспертных работ при расследовании технических причин аварий в угольных шахтах», утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 743 от 20 декабря 2012 года.

Методология и методы исследований.

1. Численные и аналитические методы математического моделирования механических процессов, происходящих в массиве горных пород у обнажений, с использованием высокопроизводительных ЭВМ в двумерной и трехмерной постановках связанных задач теории нестационарной теплопроводности, упругости, пластичности и ползучести.

2. Численные и лабораторные экспериментальные методы исследований фрикционного воспламенения метановоздушных смесей при динамических взаимодействиях образцов горных пород с различным минеральным составом.

3. Численные и лабораторные экспериментальные методы исследований пьезоэлектрических эффектов горных пород как источников воспламенения метановоздушных смесей при динамических разрушениях горных пород с различным минеральным составом.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждаются:

1. Сопоставлением результатов прогноза воспламенения метановоздушных смесей с результатами лабораторных испытаний образцов горных пород на фрикционное трение по методу ротационного взаимодействия образцов по специально разработанной методике (рассогласование до 15 %).

2. Объективностью качественных результатов прогноза геомеханического состояния и первичных обрушений углепородного массива нависающей кровли у очистного забоя шахты «Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс», в сопоставлении с шахтными наблюдениями – протяженностью нависающей кровли перед ее обрушением при отработке пласта Бреевского, очистной забой № 1735 (рассогласование до 20 %).

3. Сопоставлением решений тестовых задач с использованием расчетных схем, приближенных к реальным условиям деформирования массива горных пород, с численными и аналитическими решениями соответствующих задач, выполненных отечественными и зарубежными авторами (расхождение не более 5 %).

4. Результатами практического применения разработанной классификации степени фрикционной опасности горных пород на угольных шахтах России, в рамках договорных работ шахт и объединений с Научным центром ВостНИИ.

Личный вклад автора состоит:

1. В проведении статистического анализа фрикционной опасности угольных шахт при ведении горных работ, причин вспышек метановоздушных смесей, анализе существующей нормативной правовой базы и методик по контролю обеспечения фрикционной безопасности.

2. В разработке математических моделей и программного обеспечения для решений задач о проявлениях горного давления на ЭВМ в двумерной и трехмерной постановках задач нелинейной теории упругости и вязкоупругости, определяющих адресность возникновения и развития фронтов разрушения (трещинообразования).

3. В разработке математических моделей и программного обеспечения для решений задач о проявлениях трибологических эффектов в горных породах на ЭВМ в одномерной и двумерной постановках задач нестационарной теплопроводности в результате динамических контактов разрушаемых частей горных пород.

4. В разработке методики и экспериментально-теоретическом обосновании пьезоэлектрического эффекта кварцесодержащих горных пород как источника возникновения разноименных электрических зарядов на берегах зарождающихся и развивающихся трещин, являющегося одной из причин вспышек метановоздушной смеси в результате реализации разрядного напряжения.

5. В обосновании и разработке обязательных требований изложенных в пунктах: Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правил безопасности в угольных шахтах», утвержденных Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 550 от 19 ноября 2013 г.; Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкции по борьбе с пылью в угольных шахтах», утвержденных Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 462 от 14 октября 2014 г.; «Методических рекомендаций по проведению экспертных работ при расследовании технических причин аварий в угольных шахтах», утвержденных Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 743 от 20 декабря 2012 г.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение научной общественности на Международных конференциях по физической мезомеханике (г. Томск, Россия, ИФПМ СО РАН, август 2003 г. и 2004 г.); V Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (г. Кемерово, 16–19 сентября

2003 г.); Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимой в рамках специализированной выставки технологий горных разработок «Уголь России и Майнинг» (г. Новокузнецк, 2017 г.); на Международной научной конференции «Научные разработки: евразийский регион» (5 мая 2019 г.); техсоветах и семинарах Южно-Сибирского управления Ростехнадзора (2012–2018 гг.); научно-технических семинарах АО «НЦ ВостНИИ» (2009–2019 гг.).

Результаты диссертационной работы использованы:

1. При выполнении технических аудитов НЦ ВостНИИ по вопросам промышленной безопасности угольных шахт России (НИР № 494-НЦ-630ЮК/09 от 21.05.2009, НИР № 1070-НЦ от 15.06.2010, НИР № 1842-НЦ от 27.10.2011, НИР № 13111-НЦ от 16.5.2018, НИР № 13435-НЦ от 04.07.2018, НИР № 14534-НЦ от 15.01.2019 и другие).

2. При выполнении сопровождения горных работ на выемочных и проходческих участках с использованием высокопроизводительных горных машин (договор № 12/Р-НЦ от 15.02.2012 с АО «СУЭК-Кузбасс»), а также по проведению научно-технического эксперимента (договор № 14506-НЦ от 28.02.2019 с ООО «Шахта «Усковская» ООО «РУК»).

3. Для установления уровня фрикционной опасности горных пород в угольных шахтах Кузбасса (НИР № 05-12 от 11.01.2012, НИР № 3747-НЦ от 20.11.2013, НИР № 3838 от 11.12.2013, НИР № 5482-НЦ от 01.12.2014, НИР № 7391-НЦ от 01.12.2015, НИР № 9121-НЦ от 21.09.2016, НИР № 12161-НЦ от 26.12.2017, НИР № 13231-НЦ от 04.06.2018, НИР № 17431-НЦ от 09.12.2019, НИР № 17251-НЦ от 24.12.2019, НИР № 17391-НЦ от 22.01.2020 и другие).

4. При выполнении научно-исследовательских работ по следующим государственным контрактам: № 105-ГК/2011 от 11.07.2011 – «Разработка проектов Правил безопасности в угольных шахтах и инструкций к ним»; № 106-ГК/2011 от 11.07.2011 – «Разработка проектов «Инструкции по борьбе с пылью в угольных шахтах» и «Инструкции по пылевзрывозащите угольных шахт»; № 138-ГК/2011 от 19.10.2011 – «Разработка Инструкции по проведению экспертных работ при расследовании технических причин аварий в угольных шахтах» в рамках реализации федеральной целевой программы «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 г.».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 23 печатных работы, в том числе 22 в журналах ВАК, получено 3 патента на изобретения, выпущено 3 нормативных документа.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка сокращений и терминов, списка использованных

источников из 223-х наименований, изложенных на 415 страницах машинописного текста, включая 104 рисунка, 31 таблицу.

Автор выражает глубокую признательность коллективу инженерно-технических и научных сотрудников АО «НЦ ВостНИИ» за продуктивное обсуждение диссертационной работы на всех этапах ее написания, за ценные предложения и конструктивные замечания, позволившие повысить качественный уровень исследования.

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук С.И. Голоскокову за внимательное отношение к исследованию, а также коллективу лаборатории борьбы с пылью и пылевзрывозащиты АО «НЦ ВостНИИ» за помощь в проведении экспериментов.

Особую признательность и благодарность автор выражает инженерно-техническим работникам угольных компаний и отдельных шахт АО «СУЭК-Кузбасс» и ООО «Шахта «Усковская» за оказанную практическую помощь при выполнении научных исследований и внедрении результатов работы в производство.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Содержание автореферата представляет собой аккумулирующие результаты диссертационной работы, состоящие из аналитического анализа состояния проблемы и степени ее разработанности, изложения и доказательства защищаемых научных положений.

Во введении обосновывается актуальность проблемы возгораний и взрывного горения рудничных газов на угольных шахтах вследствие разрушения массива горных пород у выработок, формулируются цель работы, задачи, практическая значимость и научная новизна.

Первая глава «Научные подходы к эффективной оценке негативных видов техногенных проявлений на угольных шахтах» посвящена рассмотрению и обоснованию концепции безопасности при ведении горных работ на угольных шахтах Российской Федерации, опасных по газу. При этом изучены, установлены и рассмотрены проблемные вопросы развития аварийных ситуаций, связанные с возгораниями и взрывами пыле- и метановоздушных смесей, источником которых являются преимущественно техногенные факторы.

Крупные аварии, имеющие причиной фрикционный и иные источники воспламенения, происходили на шахтах Кузбасса, Караганды, Воркуты, в том числе: шахта «Капитальная» ПО «Южкузбассуголь» – 1976 г.; шахта «Бирюлинская» ПО «Кузбассуголь» – 1979 г.; шахта «Юр-Шор» ПО «Воркутауголь» – 1980 г.; шахта «Воркутинская» ПО «Воркутауголь» – 1995 г., 2002 г.; шахта «Комсомольская» ОАО «Воркутауголь» – 1998 г.,

2007 г.; шахта «Северная» ОАО «Воркутауголь» – 2004 г.; шахта «Антоновская», г. Новокузнецк – 2002 г.; шахта им. Ленина, г. Караганда – 2008 г.; шахта «Абайская», г. Караганда – 2008 г.; шахта ЗАО «Распадская-Коксовая», г. Междуреченск – 2011 г., шахта «Краснолиманская», г. Роднинское, Донецкая область – 2015 г. и другие.

Недостаточная изученность механизмов инициирования вспышек и возгорания рудничных газов при ведении горных работ является следствием того, что методические проработки данных вопросов находятся в начальной стадии и требуют дальнейшего развития.

Анализ российской нормативно-методической базы по контролю и предупреждению газодинамических явлений как фактора, инициирующего воспламенения рудничных газов на угольных шахтах, показал, что основным недостатком руководящих материалов является, по сути, общий рекомендательный характер требований по фрикционной безопасности, не зависящий от различия состояния и структуры массива вмещающих пород у различных выработок.

Доработка существующих руководящих материалов или разработка новых нормативов для установления возможного инициирования воспламенения рудничных газов при ведении горных работ вызвана:

1. Отсутствием единой методологии оценки фрикционной опасности при взаимодействии горных пород.
2. Несовершенством теоретических представлений о процессе воспламенения метановоздушной смеси в результате трения разрушаемых частей горных пород.
3. Отсутствием методологии оценки влияния горного давления на трещинообразование и накопление повреждений в массиве пород, установления адресности событий докритического, предкритического, критического и запредельного деформирования массива как источников искрения при обрушениях и потерях устойчивости гетерогенных систем.
4. Наличием проблемных вопросов относительно природы накопления электрических зарядов на берегах вновь образующихся и развивающихся трещиноподобных дефектов.

Большая заслуга в формулировке и обосновании гипотез и предположений, упрощающих модели механического поведения углепородного массива, и вместе с тем отражающих состояние горных пород, близкое к реальному, принадлежит советским и российским ученым, внесшим значимый вклад в изучение механики горных массивов, таким как С.Г. Авершин, Б.И. Бокий, Ф.П. Бублик, А.А. Борисов, Г.И. Грицко, Е.С. Ержанов, Г.А. Катков, А.М. Линьков, В.И. Мурашев, И.М. Петухов,

М.М. Протодяконов, К.В. Руппенейт, В.Д. Слесарев, В.Ф. Трумбачев, П.М. Цимбаревич, Е.Ж. Шемякин, И.Л. Черняк и многим другим.

В отечественной и зарубежной науке решением прикладных задач нелинейной теории упругости, вязкоупругости и механики горных пород, в том числе на основе численно-аналитических методов анализа, занимались исследователи из КузНИУИ, ИГД им. А.А. Скочинского, МГГУ, КузПИ и других институтов, такие как А.В. Александров, Б.З. Амусин, С.Н. Комиссаров, Ю.М. Либерман, Г.И. Марчук, Л.Д. Павлова, В.А. Постнов, Л.А. Розин, А.Б. Фадеев, В.Н. Фрянов, К.Я. Хархурим, Н.В. Черданцев, Н.Н. Шапошников, а также Д. Аргирис, Р. Клаф, Д.Ж. Оден, С. Сегерлинд, И. Чанг, О. Зенкевич и другие.

В диссертационной работе при разработке методологии структурного анализа и теоретических предпосылок установления закономерностей механического поведения и разрушения углепородного массива предпочтение отдается методу конечных элементов (МКЭ).

Таким образом, в главе решена первая из задач исследований.

Вторая глава диссертации «Моделирование фрикционного воспламенения рудничных газов в горных выработках угольных шахт» посвящена представлению моделей фрикционного взаимодействия частей горных пород в одномерной и двумерной постановках нестационарной задачи теплопроводности.

Аналитическое решение задачи об изменении температуры в зоне фрикционного контакта частей горных пород в одномерной постановке нестационарной задачи теплопроводности рассмотрено в предположении предельного случая деформирования контактных пар, когда наибольшие градиенты температур проявляются при реализации в области контакта зоны прандтлева трения.

Построение математической модели и ее решение в одномерной постановке нестационарной задачи теплопроводности рассматривается для случая реализации двух источников тепла:

- 1) w – за счет растрескивания поверхностного слоя;
- 2) q – в результате работы сил трения.

В этом случае нестационарное уравнение теплопроводности с соответствующими граничными и начальными условиями примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{w}{c\rho}, & 0 < x < \infty, \quad t > 0, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, \quad T_{t=0} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где T – температура; t – время; $k \equiv \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость; ρ – плотность; w – мощность тепловыделения; q – плотность теплового потока.

Источник тепла $\frac{w}{c\rho}$ представляется в виде $\frac{w}{c\rho} = Ae^{-\alpha y}$, $y = 0$, поскольку работает в тонком слое $\approx (10 \div 100)$ мкм.

Более строго распределение температуры по поверхности контакта оценивается из решения 2D (3D) задач теплопроводности и упругости.

В диссертационной работе математическая модель теплопереноса в двумерной постановке задачи не рассматривает классические дифференциальные уравнения теплопереноса, и, следовательно, не решает их. Математическая модель строится на базе функционала энергии, который для двумерных нестационарных задач теплопроводности приводится к виду:

$$\Phi = \int_V \frac{1}{2} \left[K_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2(q - c \frac{\partial T}{\partial t})T \right] dv + \int_{S_1} qT ds + \int_{S_2} \frac{\alpha_s}{2} (T^2 - 2Tv_s + v_s^2) ds, \quad (2)$$

где K_i , ($i = x, y$) – осевые составляющие коэффициентов теплопроводности; α_s – коэффициент теплоотдачи; S_1, S_2 – поверхности с граничными условиями 2-го и 3-го рода соответственно; v_s – значение полевой функции на поверхности массива S_2 ; c – коэффициент скорости изменения температуры, T – постоянная материала.

Вектор значений полевой функции температуры T , каждого из узлов конечных элементов, на которые дискретизируется расчетная схема определяется в процессе минимизации функционала (2) с использованием процедур метода конечных элементов.

Поскольку решение выше сформулированной задачи представляет собой сопряженный анализ между двумя инженерными дисциплинами «тепло – напряжение» и рассматриваются теплофизические модели скользящего контакта – контакт деформируемого тела 1 с жесткими неровностями тела 2, в диссертационной работе при решении задач о деформировании контактирующих частей горных пород используется энергетическая формулировка метода конечных элементов.

В этом случае из теоремы о минимуме потенциальной энергии следует существование и единственность решения задач теории упругости как результат поиска и нахождения минимума функционала потенциальной энергии J системы:

$$\min J(u_i), \quad u_i \in \Omega,$$

$$J(u_i) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} d\Omega - \int_{\Gamma_p} P_i u_i d\Gamma - \int_{\Omega} \varphi_i u_i d\Omega, \quad (3)$$

где Ω – трех-, двух- или одномерная область; Γ_p – часть поверхности тела, где заданы усилия; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; u_i – компоненты перемещений; P_i – заданные на границе компоненты усилий; φ_i – компоненты массовых сил.

Связующим звеном между термодинамическими (2) и механическими процессами (3) является внешний источник тепла q , вид которого следует из закона Амотона – Кулона; характеризует тепловыделение за счет трения, скорости скольжения, а также объемного деформирования частей пород вследствие изменения температуры:

$$q = k_f \cdot k(T) \cdot N \cdot V, \quad (4)$$

где N – нормальное давление в плоскости трения взаимодействующих тел; $k(T)$ – коэффициент трения, зависящий от температуры; V – скорость скольжения; k_f – доля рассеянной при трении энергии, переводимой в тепло.

Источник тепла q уточняется после решения задачи деформирования частей горных пород как результат их фрикционного взаимодействия на каждом временном шаге.

Формирование систем линейных алгебраических уравнений и их решения в задачах нестационарной теплопроводности (2) и деформирования горных пород (3) осуществлялось с использованием комплекса программ ANSYS/MECANICEL. Моделирование контактного взаимодействия между двумерными ответными поверхностями осуществлялось с использованием так называемых контактных элементов. Этот же комплекс программ использовался для визуализации полученных результатов. При проведении исследований комплекс программ ANSYS/MECANICEL адаптирован к решениям связанных задач горной механики и нестационарной теплопроводности путем разработки и встраивания в комплекс специальных дополнительных процедур (макросов), которые, в связи со спецификой задач геомеханики, отсутствуют в комплекте программ ANSYS и рассматриваются далее как составные части комплекса. Командные файлы написаны автором на языке параметрического программирования ANSYS APDL и включают в себя макросы формирования физико-механической модели массива FMP (Formation of the Mechanical Properties), восстановления диаграмм деформирования SDR (Strain Diagram Recovery); макросы кинетики накопления повреждений KAD (Kinetics of Accumulation of Damages); макросы линеаризации функционалов энергии при

решении задач по моделям теории малых упругопластических деформаций и теории старения SBM (Solution Birger Method), другие макросы.

Таким образом, в главе разработана методика решения второй и четвертой из задач исследований и пути доказательства первого из научных положений.

В третьей главе работы «Методические основы анализа деформирования углепородного массива сложного строения» предложен методический подход к обоснованию физико-механической модели материалов угля и вмещающих пород, обладающих сложной реологией, в рамках решения двумерных и трехмерных задач теории упругости и пластичности.

Эмпирический подход учета физико-механических свойств углепородного массива основан на схематизациях экспериментальных диаграмм деформирования.

Аналитический вариант определяющих соотношений основывается на исследованиях Г.А. Смирнова-Аляева и В.В. Новожилова, установивших, что связи между напряжениями и деформациями для произвольных нелинейно-упругих тел, как в пределах упругости, так и за ее пределами следует искать в виде соотношений деформационной теории пластичности. При этом зависимости между интенсивностью напряжений σ_i и интенсивностью деформаций ε_i установлены Г. Генки и развиты А.А. Ильюшиным и в диссертационной работе преобразованы к виду, совпадающему с обобщенным законом Гука.

Диаграмма деформирования используется для определения и уточнения модуля пластичности E^* , коэффициента поперечной деформации μ^* и модуля пластического сдвига G^* , которые за пределами линейной упругости больше не являются постоянными материала, а зависят от уровня реализующихся напряжений σ_i и деформаций ε_i и по этой причине оказываются различными для различных элементарных объемов материала.

В связи с нелинейностью диаграмм деформирования линеаризация функционала (3), приведенного к функционалу Лагранжа, осуществляется с использованием метода переменных параметров упругости, разработанного И.А. Биргером, являющегося развитием метода упругих решений А.А. Ильюшина, как метода, обладающего наибольшей скоростью сходимости результатов расчетов по сравнению с другими известными методами линеаризации.

Механические испытания горных пород показывают, что физико-механические свойства горного массива (диаграммы деформирования) не удовлетворяют условиям гипотезы о единой кривой деформирования теории

малых упругопластических деформаций, их вид зависит от условий нагружения образцов, и, следовательно, от уровня реализации напряженного состояния в массиве.

Поскольку заранее напряженное состояние массива неизвестно, оказывается неизвестным и вид диаграммы деформирования в каждом из его элементарных объемов, и, поскольку неизвестен вид диаграммы деформирования, оценить напряженное состояние массива становится невозможным.

Для выхода из тупика в диссертационной работе разработан алгоритм поэтапного восстановления диаграмм деформирования.

На первом этапе расчетов НДС массива диаграмма деформирования, получаемая из испытаний на одноосное сжатие образцов, принимается единой для всех объемов конечных элементов расчетной схемы.

На втором и последующих этапах расчета вид диаграммы деформирования уточняется в зависимости от сочетаний главных напряжений, реализующихся в объеме каждого из конечных элементов. При этом в процессе схематизации диаграмм координаты их реперные точки устанавливаются по огибающей Кулона – Мора, экспериментальным данным о пределе прочности массива по деформациям и данным о его пределе упругости.

Практика показывает, что пяти-шести приближений оказывается достаточно для сходимости результатов расчетов, оцениваемых по сферической норме:

$$\|\sigma\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_i^{p+1} - \sigma_i^p)^2} \leq \delta, \quad (5)$$

где σ – предел прочности массива, устанавливаемый по критерию Кулона – Мора в зависимости от сочетаний главных напряжений σ_1, σ_3 ; i – номер конечного элемента; N – число конечных элементов расчетной схемы; p – номер приближения; δ – малое, наперед заданное число.

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что время непрерывно изменяет структуру горных пород, находящихся под нагрузкой. В этой связи становится актуальным решение проблемы построения определяющих соотношений для углепородного массива с учетом и в зависимости от истории нагружения.

В диссертационной работе, опираясь на исследования Ю.Н. Работнова и Ж.С. Ержанова, принимается факт существования единой кривой ползучести для горных пород.

В этом случае определяющее соотношение можно записать в виде произведения двух функций, одна из которых является функцией лишь деформаций, а другая функцией лишь времени.

Таким образом, многочисленные решения задач ползучести горного массива (на любой интересующий момент времени) получают после корректировки диаграммы деформирования при помощи известной функции времени с последующим использованием традиционных методов решения задач деформационной теории пластичности.

Поскольку одной из первостепенных задач исследования является установление критических условий возгораний рудничного газа, в том числе из-за обрушений кровли в очистных выработках, при потере устойчивости выработок и целиков, из-за разрушения других конструктивных элементов подземных сооружений, особый интерес представляет исследование поведения углепородного массива в окрестности особой точки – его предела прочности.

В диссертационной работе показано, что при использовании критерия прочности Кулона – Мора, в соответствии с паспортом прочности, получаемого по схеме Кармана, условие прочности для рассматриваемой точки пространства примет вид

$$\sigma_i^p \leq \sigma_i^{np}, \quad (6)$$

где σ_i^p , σ_i^{np} – расчетное и предельное значения интенсивности напряжений в рассматриваемой точке соответственно.

Условие прочности (6) является связующим звеном между критерием Кулона – Мора и диаграммами деформирования. Критерий прочности (6), так же как и многие другие критерии прочности, предполагает немедленное разрушение массива, как только напряжения и/или деформации достигнут своих пределов в наиболее опасной точке массива. То есть разрушение всего массива контролируется наиболее опасной его точкой. В действительности это не так. Из шахтных наблюдений известно, что элементы шахтного поля, в частности выработки и их сопряжения, выполняют свои функции и при незначительных разрушениях (частичных вывалах породы, сколах и других нарушениях целостности). В этом случае в противовес термину разрушения материала в его опасной точке уместно говорить о прочности и устойчивости массива с точки зрения его постепенного разрушения в объеме, с точки зрения функциональной пригодности конструктивных элементов шахтного поля.

При указанном подходе потребовалась разработка иной концепции разрушения, позволяющей расширить смысловое значение критериев прочности типа (6).

В работе полагается, что в углепородном массиве повреждения представляют собой множество дефектов, образующихся во времени, проявляющихся в виде разрыхления массива через микро-/макро трещинообразование. В результате возникает фронт разрушения – граница в материале между участками допредельного и запредельного деформирования.

При этом в массиве пород у выработок может organizоваться не один фронт разрушения, а несколько фронтов, развивающихся во времени.

В работах С.А. Аррениуса и С.Н. Журкова показана общность кинетических процессов разрушения различных материалов из-за подобия механизма скачкообразного перехода конгломерата атомов из одного равновесного состояния в другое, которая дает возможность в виде пошагового решения соответствующих задач накопления повреждений в углепородном массиве рассмотреть процедуру дискретного процесса разрушения горных пород. Обоснованность такого подхода подтверждается соответствующими экспериментальными исследованиями отечественных ученых, показывающими, что процессы разрушения массива в условиях его сжатия остаются подобными для различных горных пород.

В диссертационной работе, оставаясь на феноменологических представлениях разрушения углепородного массива, для оценки изменения пределов прочности во времени используется модель накопления повреждений в трактовке Л.М. Качанова.

При расчетах кинетики накопления повреждений в процедуру метода конечных элементов введена степенная зависимость скорости роста поврежденности массива в виде

$$\frac{d\theta}{dt} = -A \left(\frac{\sigma_i}{\theta} \right)^n \cdot S \left(\frac{\sigma_{kk}}{3\sigma_i} \right), \quad (7)$$

где $\sigma_{kk}/3$ – среднее напряжение; $S \left(\frac{\sigma_{kk}}{3\sigma_i} \right) = \exp \left[\left(1 - \frac{|\sigma_{kk}|}{3\sigma_i} \right) \cdot k \cdot n \right]$ – функция влияния на степень разрыхления; A , k , n – постоянные, определяемые из кривой длительной прочности, параметр n (угол наклона кривой длительной прочности) является характеристикой интенсивности образования рассеянных дефектов; θ – скалярная величина, описывающая поврежденность материала под нагрузкой, изменяющаяся с течением времени в пределах $0 \leq \theta \leq 1$. При $\theta = 0$ материал полагается полностью поврежденным, при $\theta = 1$ поврежденность отсутствует.

Из анализа соотношения (7) следует, что при всестороннем сжатии $S \left(\frac{\sigma_{kk}}{3\sigma_i} \right) = 0$ накопления повреждений не происходит, как это имеет место в действительности. Для случая одноосного нагружения образца $S \left(\frac{\sigma_{kk}}{3\sigma_i} \right) = 1$.

Таким образом, с целью выявления фактора разрушения углепородного массива у выработок на взрывобезопасность ведения горных работ при добыче угля разработана методика расчета эволюции напряженно-деформированного состояния массива при кратковременных нагружениях, а также с учетом ползучести и накопления повреждений во времени.

Таким образом, в главе разработаны методы решения третьей из задач исследований и методы доказательства второго из научных положений.

Четвертая глава «Анализ условий реализации параметров фрикционных воспламенений рудничных газов в горных выработках угольных шахт» содержит исследования изменения температуры поверхностей контакта частей горных пород в результате их ударного (динамического) фрикционного взаимодействия в одномерной и двумерной постановках нестационарных задач теплопроводности, а также оценку условий воспламенения метановоздушных смесей взрывчатой концентрации фрикционными искрами.

Наблюдаемые в экспериментах пятна контакта между частями образцов горных пород представляют собой разогреваемые в процессе трения поверхности. Экспериментально-теоретическим анализом установлено, что для линейного размера пятна контакта 0,03 м глубина прогреваемого массива по нормали к поверхности, передающая тепловую энергию в окружающее пространство при относительной скорости 10 м/с трения, составляет от $3,4 \cdot 10^{-4}$ м до $7,0 \cdot 10^{-4}$ м.

Если под толщиной зоны прогрева понимать слой газа в виде шара диаметром D , то при решении задачи о зажигании метановоздушной смеси, в соответствии с принципом воспламенения Я.Б. Зельдовича, можно принять, что зажигание МВС произойдет в случае, если энергия искры или пятна контакта окажется достаточной для разогрева определенного объема газа до адиабатической температуры воспламенения.

В диссертационной работе, с опорой на этот принцип, решение задачи о фрикционном трении с использованием алгоритма оценки условий зажигания метановоздушной смеси горячей поверхностью приводит к следующим результатам: для воспламенения 6%-ной метановоздушной смеси диаметр прогретой области газа в виде шара должен составлять не менее $D \geq 0,0012$ м.

Аналитические решения, полученные учеными на базе различных теплодиффузионных моделей, показывают, что количество тепла, необходимое для разогрева элементарного объема газа до температуры самовоспламенения МВС, соответствует следующим величинам: В.Н. Вилунов – 0,2 мДж; А.А. Каймаков, С.А. Песок – 0,3 мДж; А.Ю. Крайнов, В.А. Браймлер – 0,32 мДж.

В диссертационной работе, с целью уточнения значений минимальной величины количества тепла Q , необходимого для нагрева и воспламенения 6 %

содержания метана в смеси с воздухом, в объеме шара диаметром $D = 0,0012$ м, использована зависимость¹:

$$Q = C_{см} \times m_{см} \times \Delta T, \quad (8)$$

где $C_{см}$ – удельная массовая теплоемкость смеси газов, g_{CH_4}, g_B – весовые доли метана и воздуха в смеси газов соответственно, C_{CH_4}, C_B – удельные массовые теплоемкости метана и воздуха соответственно; $m_{см}$ – вес смеси газов в объеме шара диаметром $D = 0,0012$ м, δ – объемная доля метана в смеси ($\delta = 0,06$, т. е. 6 %), ρ_{CH_4}, ρ_B – удельный вес метана и воздуха соответственно; $\Delta T = (T_B - T_H)$ – температурный перепад, T_B, T_H – температура самовоспламенения и начальная температура смеси соответственно.

При этом средняя температура вспышки и взрыва МВС в раскаленном слое соприкасающихся частей пород при фрикционном трении принята равной $T_B = 746$ °С (см. ниже, глава 6).

Полученная оценка для минимального количества тепла, необходимого для самовоспламенения метановоздушной смеси при стандартных атмосферных условиях $T_H = 20$ °С, по зависимости (8), соответствует величине $Q = 0,287$ мДж.

Экспертные оценки минимального количества тепла, которое потребуются для самовоспламенения МВС в зависимости от глубины ведения горных работ, показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Минимальное количество тепла (Q), необходимое для самовоспламенения МВС в зависимости от глубины ведения горных работ H

H , м	T_H , °С	ΔT , °С	Q , мДж
400	12,3	733,7	0,290
600	18,2	727,8	0,288
800	24,1	721,9	0,285

Изучение трибологических эффектов, проявляющихся в результате динамического взаимодействия кусков горных пород, в рамках решения задач в двумерной постановке проводилось с использованием расчетной схемы, состоящей из двух прямоугольных блоков, стоящих один над другим (рисунок 1). Нижний блок фиксируется своей нижней гранью и является неподвижным, а верхний образец скользит по поверхности нижнего образца вдоль его длинной стороны с некоторой постоянной скоростью, которая в расчетах варьируется.

¹ Ботвенко, Д.В. Разработка методики оценки и классификации фрикционной опасности горных пород: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2004.

Для задания параметров фрикционного скольжения между образцами создается контакт закрытый и скользящий, без взаимного проникновения. Коэффициент трения зависит от теплофизических параметров массива, принимается постоянным до значений температуры пятна контакта $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, и далее его изменение следует линейному закону.

На верхнюю грань верхнего образца прикладывается постоянное давление, имитирующее силу ударного взаимодействия образцов пород, которое в расчетах также варьируется.

Для базового расчета приняты средние физико-механические и теплофизические характеристики материалов горных пород.

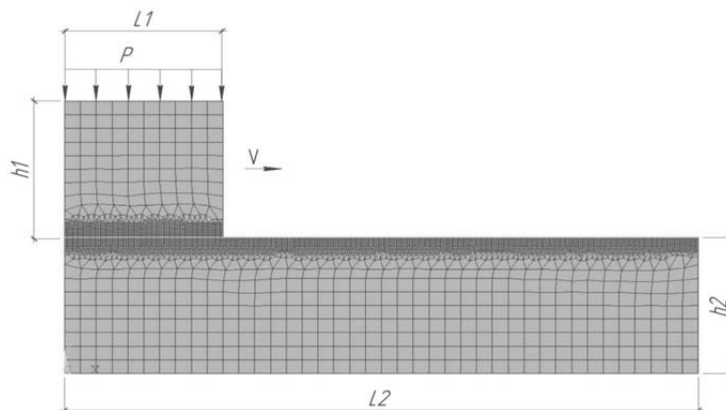
Начальные и граничные условия:

P – контактное давление (динамическая нагрузка), определялось с учетом коэффициентов динамичности в зависимости от скорости и угла встречи блоков. Во всех случаях полагалось, что уровень динамических нагрузок во избежание разрушения не превосходит предела прочности материала на сжатие.

$T(x, y) = T_0(x, y) = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в объеме блоков – начальное условие;

$$K_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + q + h(T - T_{\infty}) = 0 \text{ – на свободной границе тела,}$$

где l_x, l_y – направляющие косинусы вектора нормали к поверхности; $h(T - T_{\infty})$ – закон охлаждения Ньютона; h – коэффициент теплообмена; $T_{\infty} = 20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура окружающей среды.



$$h_1 \times l_1 = 0,03 \times 0,03 \text{ м; } h_2 \times l_2 = 0,03 \times 0,12 \text{ м}$$

Рисунок 1 – Геометрия взаимодействующих образцов и их дискретизация на конечные элементы

Результаты расчетов эволюции температурного поля в объеме блоков вследствие фрикционного трения показаны на рисунке 2 с учетом того, что скорость соударения блоков по нормали к поверхности нижнего блока

составляла $V_b = 5$ м/с; скорость скольжения блоков относительно друг друга не изменялась во времени и равнялась $V = 10$ м/с. При этом скорость сближения блоков до их удара по касательной составляет 11,2 м/с, что соответствует падению верхнего блока на неподвижный нижний блок с высоты 6,3 м. При этом контактное динамическое давление соответствует величине $P = 4,0 \cdot 10^5$ кг/м².

Процесс охлаждения блоков во времени после их взаимодействия показан на рисунке 3.

При решении задачи об охлаждении блоков рассматривался переходный процесс нестационарной теплопроводности для различных времен, без какой-либо нагрузки на верхний блок. В качестве начальных условий использовались значения температур в узлах сетки конечных элементов, полученные для финальной части фрикционного трения на момент времени $t_3 = 9$ мс.

Рассматривая вероятность первоначального воспламенения МВС для случая сочетаний теплофизических и механических характеристик, принятых в настоящем исследовании для базового расчета, в диссертационной работе установлены значения мощности выделяемой тепловой энергии при движении верхнего блока по нижнему со скоростью 10 м/с для времен фрикционного трения $t_1 = 0,9$ мс, $t_2 = 4,5$ мс и $t_3 = 9$ мс, представляющие для теплового потока следующие величины $Q(t_1) = 3,6$ Дж/с, $Q(t_2) = 4,2$ Дж/с, $Q(t_3) = 5,5$ Дж/с.

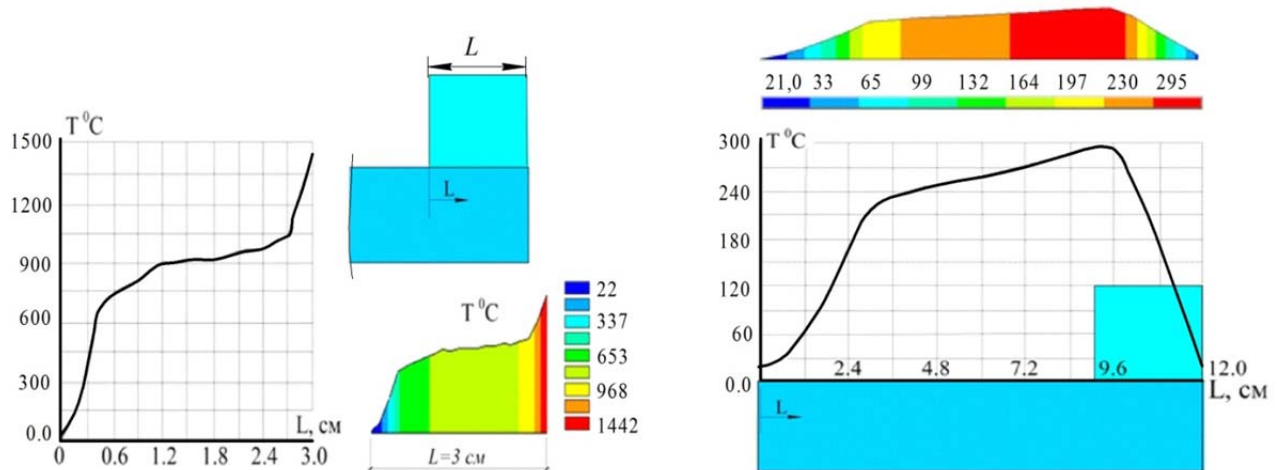


Рисунок 2 – График и эпюра изменения температуры вдоль линии контакта верхнего блока а) и нижнего блока б) для финальной части его движения ($t = 9$ мс)

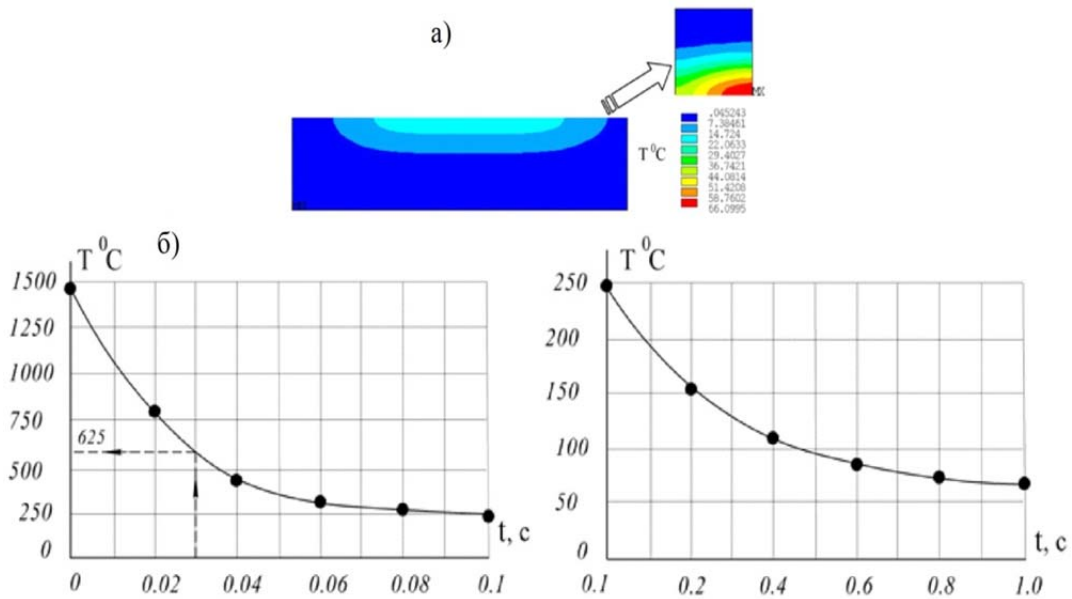


Рисунок 3 – Изолинии поля температур при охлаждении блоков в конце первой секунды а) и изменение максимальной температуры поверхности контакта верхнего блока при его охлаждении во времени б)

При этом количество тепла, расходуемое на нагрев объема МВС до его самовоспламенения, находится из выражения $Q = Q_{ti} \cdot t_u$, где t_u – время индукции (прогрева) смеси. Оценивая возможность воспламенения МВС по энергетическому критерию при условии прогрева объема смеси в течение времени не менее $t_u = 110$ мкс ($110 \cdot 10^{-6}$ с), получено:

$$Q(t_1) = 3,6 \cdot 110 \cdot 10^{-6} = 396 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 0,396 \text{ мДж};$$

$$Q(t_2) = 4,2 \cdot 110 \cdot 10^{-6} = 462 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 0,462 \text{ мДж};$$

$$Q(t_3) = 5,5 \cdot 110 \cdot 10^{-6} = 605 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 0,605 \text{ мДж}.$$

Имея в виду предельное значение минимального количества тепла, необходимого для самовоспламенения метановоздушной смеси при стандартных атмосферных условиях, т. е. $[Q_{кр}] = 0,287$ мДж, из сопоставления с полученными выше данными следует, что при определенных сочетаниях теплофизических и механических характеристик массива горных пород фрикционное трение может вызвать воспламенение МВС, поскольку $Q(t_i) > [Q_{кр}]$.

В связи с тем, что источник тепла при фрикционном трении имеет линейную зависимость от скорости взаимного смещения образцов (см. выражение 4), дана оценка минимальной скорости взаимного смещения образцов пород, при которой возможно воспламенение МВС:

– для воспламенения МВС, при пути трения образцов, равном 0,03 м, средняя скорость взаимного смещения образцов должна составлять не менее 7,2 м/с;

– при пути трения 0,06 м скорость смещения образцов должна составлять не менее 6,2 м/с;

– при пути трения 0,09 м скорость взаимного смещения должна составлять не менее 4,7 м/с.

Таким образом, в главе представлено решение второй задачи исследований и обоснование третьего из научных положений.

В пятой главе «Исследования предельных состояний и характера разрушения углепородного массива сложного строения в окрестности горных выработок как фактора зарождения вспышек пыле- и метановоздушных смесей», следуя идее, цели и задачам настоящей работы, проводится моделирование напряженных состояний и разрушений горного массива у очистных забоев и сопряженных с ним выработок под действием горного давления как предполагаемых мест, являющихся источниками фрикционной и электрической опасности.

Изучение геомеханической обстановки проводилось на конкретных примерах отрабатываемого угольного пласта Бреевского, очистного забоя № 1735 шахты «Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс». Корректный выбор геометрических параметров расчетных схем породного массива осуществлялся по известным методикам в соответствии с технологической документацией по пласту Бреевскому, по данным геологоразведочных работ. Все пласты пологого падения. Поскольку слагающие массив породы состоят в основном из переслаивающихся песчаников и алевролитов, на расстояниях от пласта до дневной поверхности и в глубину массива значения физико-механических характеристик принимались усредненными для нескольких слоев пород.

На рисунке 4 показаны граничные условия и дискретизация расчетных схем на конечные элементы, где L – расстояние от очистного забоя до монтажной камеры. На верхней границе схемы граничные условия задаются либо в усилиях, либо в перемещениях, выбираемых из узлов глобальной сетки конечных элементов вдоль границ фрагмента F .

Пример картины качественных результатов распределения вертикальных напряжений при условии плоского деформирования углепородного массива приведен на рисунке 5. Уточненные расчеты влияния действия массовых сил на перераспределение НДС у очистного забоя осуществлялись по расчетной схеме, извлеченной из глобальной схемы, фрагмент F (рисунок 4).

В диссертационной работе немаловажное значение придается изучению распределения напряженного состояния в пласте угля, в его почве и кровле. На рисунке 6 представлены результаты расчетов концентрации опорного давления у очистного забоя, кривые « a », « b », « c » соответствуют решению задачи в линейно-упругой постановке теории упругости, кривые « d », « e », « f » и « G »

получены по теории малых упругопластических деформаций. Распределению концентрации напряжений вдоль кровли пласта (вдоль линии 1) соответствуют кривые «а», «d». Распределению концентрации напряжений в срединной плоскости по мощности пласта (вдоль линии 2) соответствуют кривые «b», «e», «G», а вдоль почвы пласта (линия 3) – кривые «с», «f» (рисунок 6а). Для случая существования единой кривой деформирования всего массива угля соответствует кривая «G». Кривые «d», «e», «f» получены с использованием восстановленных диаграмм деформирования, зависящих от сочетаний первого и третьего главных напряжений.

Из анализа рисунка 6а следует, что не учет третьего главного напряжения приводит к значимым качественным и количественным отличиям в прогнозах механического поведения угля и вмещающих пород по сравнению с поведением массива для случая использования единой кривой деформирования.

В диссертационной работе обращается особое внимание на существенное влияние коэффициента внутреннего трения угля на величину опорного давления (рисунок 6б). С увеличением коэффициента трения решение задачи за пределами упругости приближается к решениям задачи в линейно-упругой постановке.

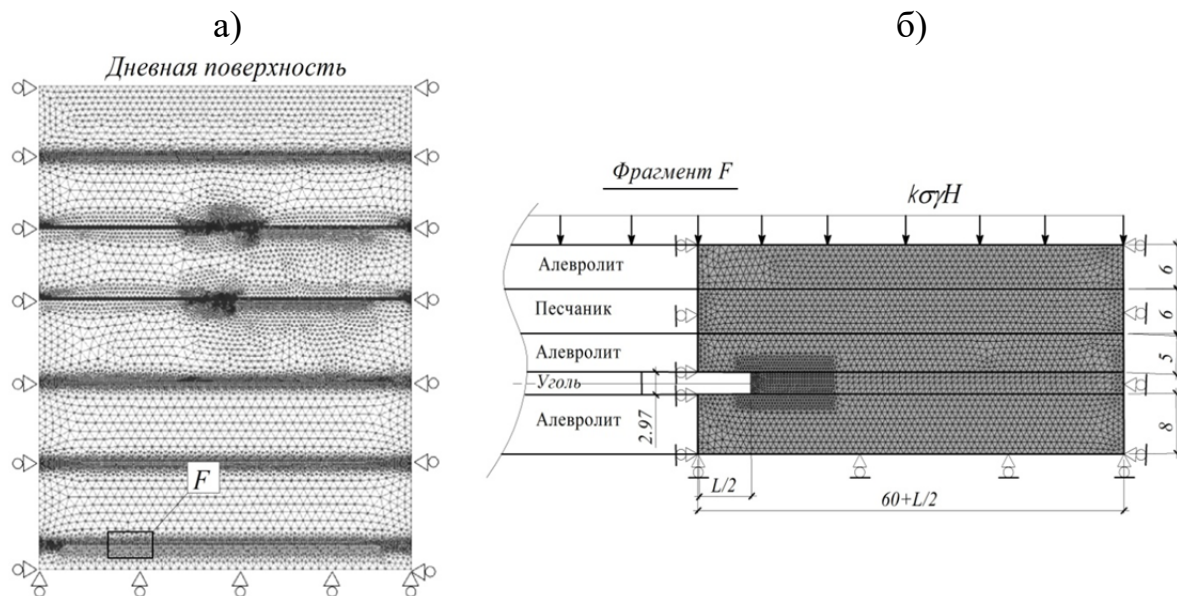


Рисунок 4 – Дискретизация на конечные элементы глобальной а) и локальной б) расчетных схем

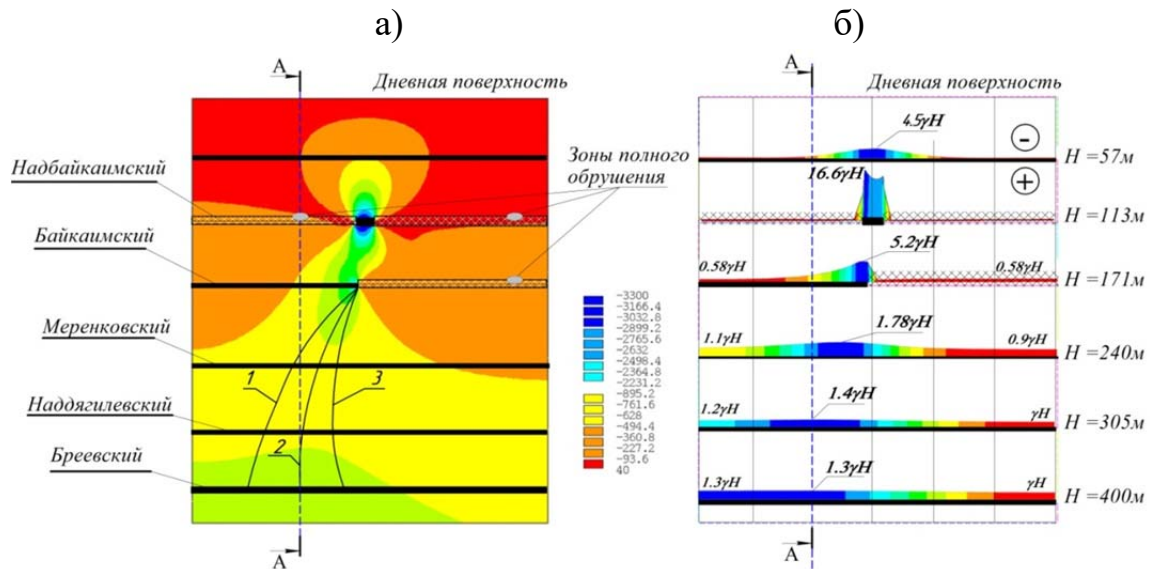


Рисунок 5 – Изолинии вертикальных напряжений (10^3 кг/м^2) в вертикальном разрезе горного массива вкрест простирания пласта Бреевского а) и эпюры концентрации напряжений вдоль напластований угля б)

С целью преемственности результатов расчетов НДС у выработок в зависимости от условий деформирования массива (плоская деформация или объемное напряженное состояние), рассматривается решение сформулированной выше задачи в трехмерной постановке задачи теории упругости и пластичности.

На рисунке 7 показаны физическая и расчетная схемы задачи о деформировании углепородного массива в окрестности обнажений.

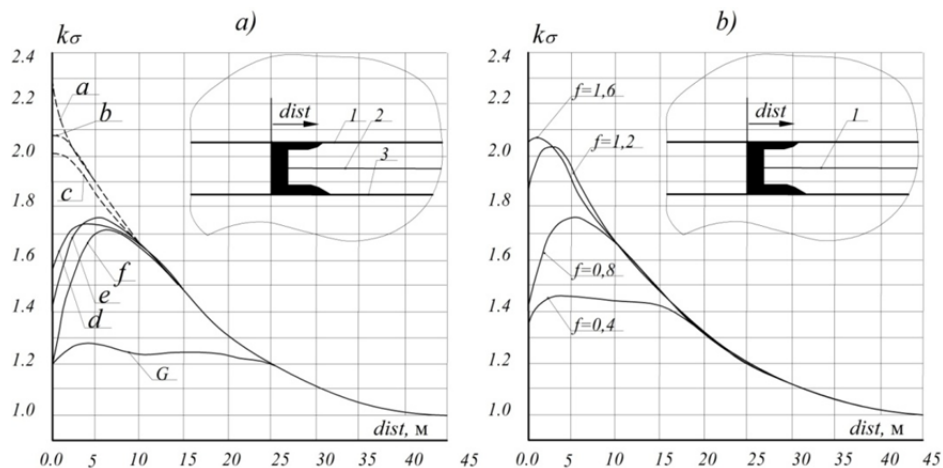


Рисунок 6 – Распределение концентрации опорного давления $k\sigma = \sigma_y / k_S \gamma H$ в массиве угля у очистной выработки а) ($k_S = 1,3$, см. рисунок 5, пласт Бреевский), и влияние коэффициента внутреннего трения угля f на величину опорного давления (давление вдоль линии 1 пласта) у очистной выработки б)

Полагая симметрию пласта относительно подготовительных выработок, расчетная схема задачи представлена, как показано на рисунке 7б, в объеме пород между сечениями плоскости 1 и плоскости 2 (размеры указаны в метрах).

Исследования показывают (рисунок 8), что на расстоянии $\sim 10 \cdot m$ (m – мощность пласта) от сопряжения забоя с выработкой реализуются условия плоской деформации. Вместе с тем в области массива у сопряжения забоя с выработкой концентрация напряжений увеличивается на $15 \div 20 \%$ по сравнению с концентрацией напряжений у груди забоя вдали от сопряжения.

Далее в диссертации рассматриваются характерные особенности накопления повреждений и разрушение в объеме углепородного массива у очистной выработки и в нависающей кровле при удалении очистного забоя от монтажной камеры.

Расчетная схема задачи, граничные условия и дискретизация массива на конечные элементы показаны на рисунке 9 (размеры указаны в метрах).

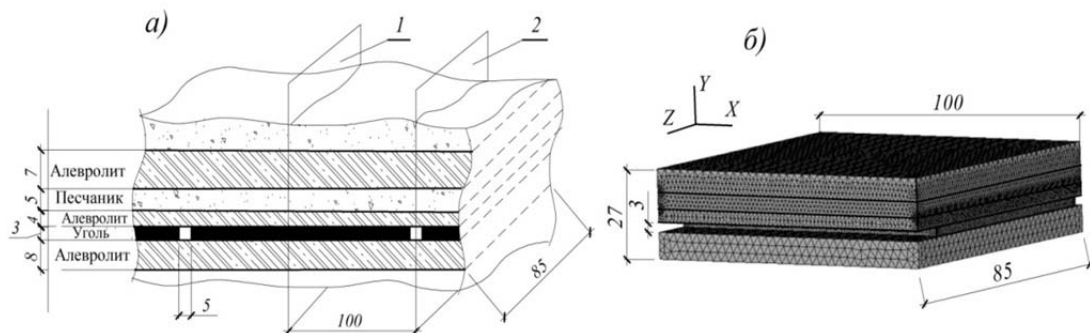


Рисунок 7 – Физическая а), расчетная б) схемы и их дискретизация на конечные элементы

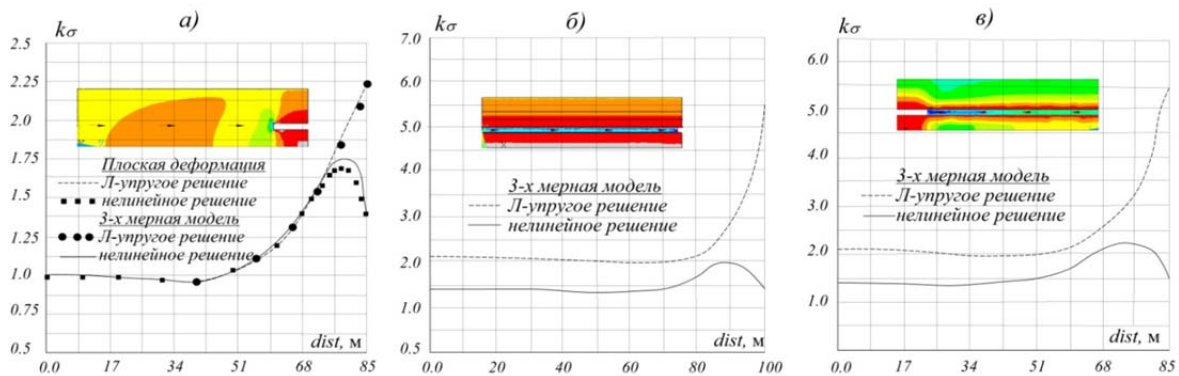


Рисунок 8 – Изменение концентрации горного давления $k_{\sigma} = \sigma_y / k_s \gamma H$ ($K_s = 1,3$) в среднем горизонтальном сечении пласта а) – в плоскости 1, по среднему сечению груди забоя б) – между плоскостями 1 и 2, и в среднем горизонтальном сечении пласта в) – в плоскости 2 (рисунок 9)

Структура пласта соответствует стратиграфической колонке, показанной на рисунке 9. Принято, что в пределах контура столба пласта Бреевского состоит 2-х угольных пачек, разделенных прослоем алевролита мощностью 0,1 м и крепостью по шкале М.М. Протоdjяконова $f = 2-5$. Для угля и вмещающих пород физико-механические характеристики приняты такими, как было описано выше. Для условий шахты «Комсомолец» при

расчетах средняя скорость проходки при очистной выемке пласта № 1735 принята равной 300 м/мес. (10 м/сут).

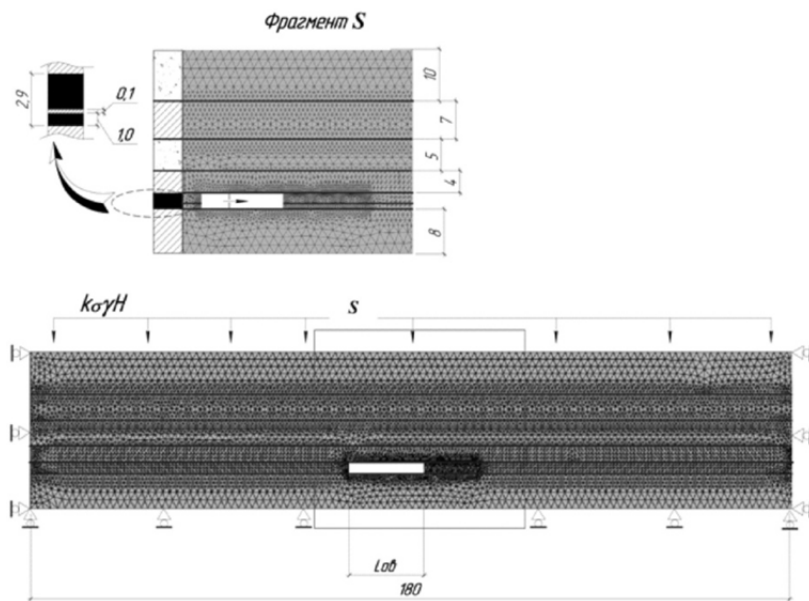


Рисунок 9 – Расчетная схема к задаче о накоплении повреждений и разрушении горных пород при движении очистной выработки

Механизм накопления повреждений в углепородном массиве (в каждом из конечных элементов) моделируется в процессе движения очистного забоя с шагом по времени $\Delta t = 1$ час.

Результаты расчетов накопления повреждений углепородного массива над выработанным пространством и в почве показаны на рисунке 10 для шага движения забоя 5 метров в виде изолиний функции поврежденности Ψ ($\Psi = 1 - \theta$, выражение 6; при $\Psi(t) = 1,0$ массив поврежден; при $\Psi(t = 0) = 0,0$ поврежденность отсутствует).

Из анализа рисунка 10 следует, что дезинтеграция пород в кровле у очистного забоя отстает от дезинтеграции массива в объеме, начиная от монтажной камеры, что связывается с большим временем накопления повреждений в этой зоне при увеличении размеров подрабатываемой толщи при движении забоя.

Прогнозируемый первичный шаг обрушений составил 25–30 метров нависающего свода, когда модель поврежденности указывает на спонтанное накопление повреждений в массиве горных пород в течение короткого промежутка времени. При этом максимальная суммарная мощность горных пород с полной поврежденностью достигает 15–16 метров (~ 5 -кратной мощности пласта). В то же время шахтные наблюдения показывают, что первичное обрушение происходит, когда нависающий пролет между

монтажной камерой и очистным забоем достигает 32-х, 35-ти метров (14–21 % относительной ошибки прогноза).

На изменение НДС оказывает значимое влияние не только увеличение площади выработанного пространства, но и характер изменения физико-механических характеристик угля и вмещающих пород из-за дезинтеграции массива. На рисунке 11 в терминах концентрации вертикальных напряжений показано изменение пригрузки на угольный пласт до первичного обрушения пород непосредственной кровли при отходе забоя от монтажной камеры как с учетом дезинтеграции массива (рисунок 10), так и с учетом увеличения площади выработанного пространства.

Исследования возможности и причин искрообразования при деформировании и разрушении горных пород в окрестности подготовительных выработок не менее актуальны, чем анализ накопления повреждений у очистных выработок.

Для выявления эффектов, влияющих на характер изменения НДС угле породного массива, вносимых непосредственно выработкой, рассматривается одиночная выработка арочного типа, пройденная в массиве пород для условий пласта Бреевского шахты «Комсомолец».

Выработка рассматривается в массиве горных пород, деформирующаяся в условиях плоской деформации.

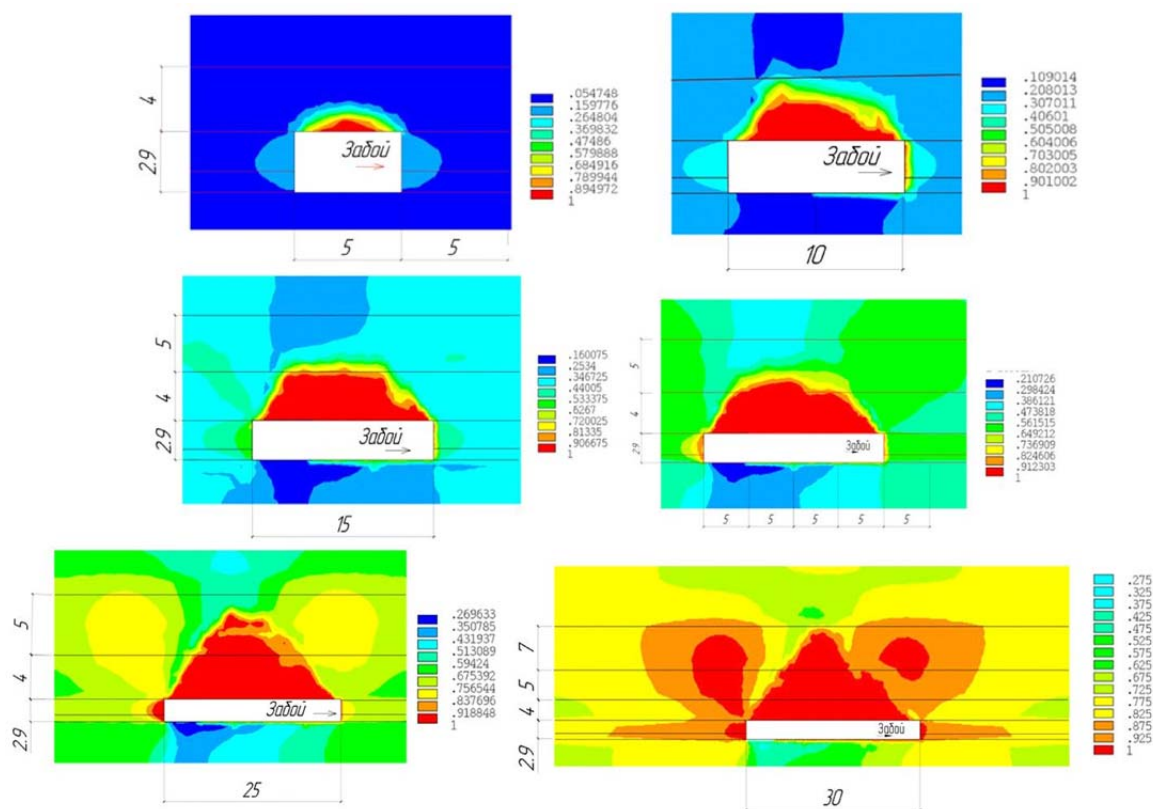


Рисунок 10 – Изолинии накопления повреждений углепородного массива во времени при удалении очистного забоя от монтажной камеры

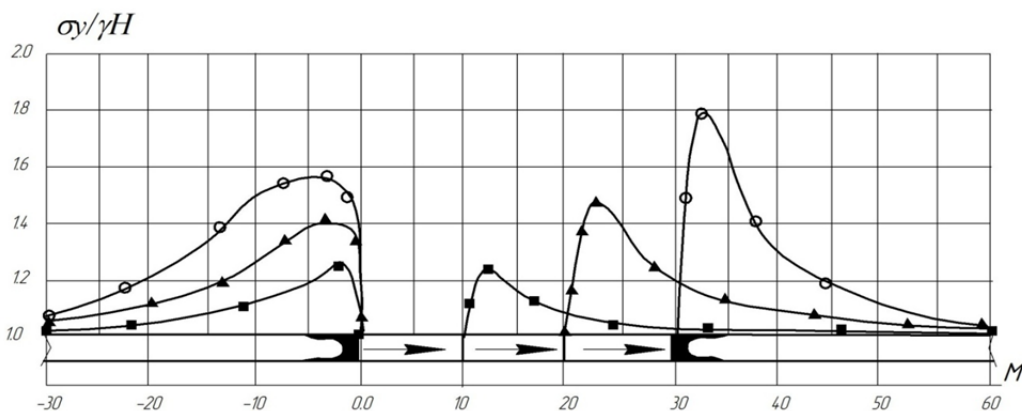


Рисунок 11 – Изменение концентрации опорного давления для угольного пласта с учетом дезинтеграции массива пород и движения очистного забоя

Результаты моделирования НДС массива у выработки, накопление повреждений в его объеме для некоторых моментов времени, а также характер и размеры разрушения для определенных выше условий нагружения и физико-механических характеристик угля и вмещающих пород показаны на рисунке 12.

В результате расчетов установлено, что накопление повреждений в первые часы (сутки) после проходки идет наиболее интенсивно, приближает сечение выработки (как конструктивный элемент) к равнопрочной конструкции. Далее, в зависимости от условий эксплуатации, выработка может сохранять работоспособное состояние месяцы и годы.

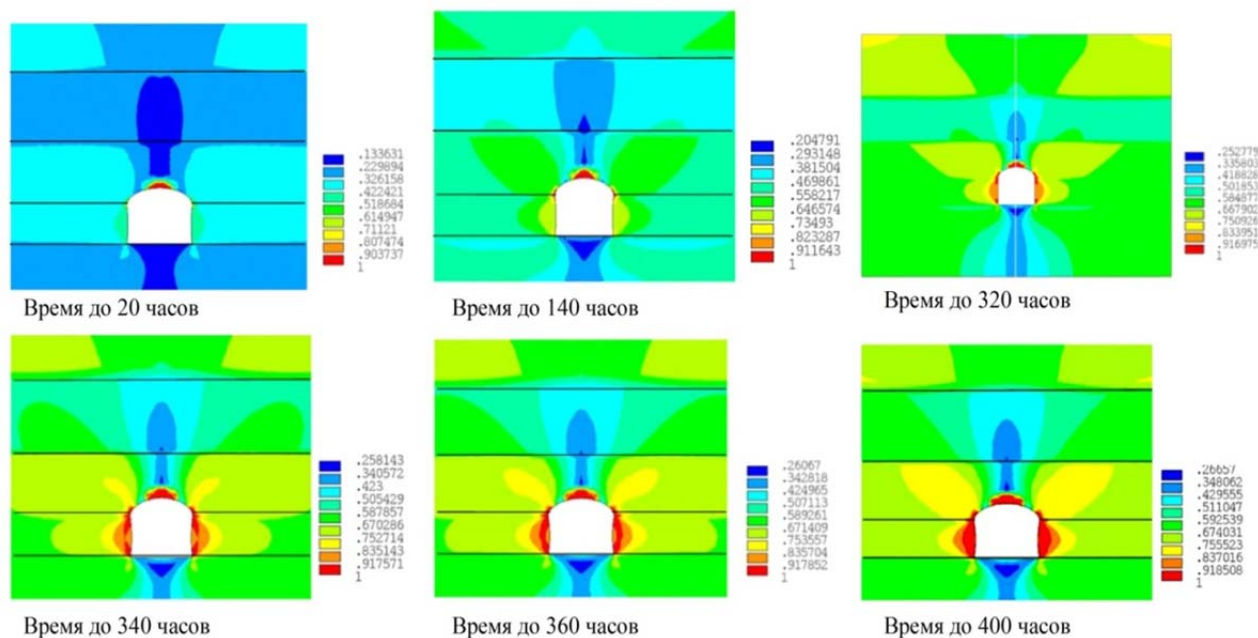


Рисунок 12 – Хронология накопления повреждений углепородного массива у одиночной выработки

В диссертационной работе констатируется, что численное моделирование позволяет исследовать процессы разрушения, происходящие в глубине массива с полнотой, которая до настоящего времени недостижима в натурных и лабораторных экспериментах.

Таким образом, в главе представлены результаты решения четвертая из задач исследований и доказательство второго из научных положений.

Глава 6 «Экспериментально-теоретические исследования возгораний и взрывов пылеметановоздушных смесей в выработках угольных шахт» посвящена доказательству существования аварийных ситуаций, вызванных разрушениями горных пород; обоснованию причинно-следственных связей воспламенения метановоздушных смесей вследствие электрических разрядов, возникающих при деформировании массива, а так же экспериментально-теоретическому анализу параметров воспламенения метановоздушной среды вследствие трения породы о породу.

Исследования фрикционных воспламенений МВС проводились на базе экспериментальной установки ВостНИИ роторного типа по специальной программе, а также с использованием математического моделирования процессов фрикционного трения, реализующихся в процессе испытаний.

Фрагмент модернизированной автором лабораторной установки роторного типа для изучения параметров фрикционного трения образцов пород показан на рисунке 13.

Перед началом испытаний проводились микроскопические исследования поверхности зоны пятна контакта на предмет определения исходного (до опытов) содержания свободного диоксида кремния. Далее метаном заполнялась взрывная камера установки – массовая доля метана составляла 6–9 %. Усилия прижатия образцов контролировались пружиной 4. Одновременно с включением ротора в работу включалась видеокамера. При испытаниях число оборотов вращения ротора диаметром $D = 200$ мм составляло $\omega = 540 \text{ мин}^{-1}$.

Испытываемые образцы изготавливались из вмещающих пород шахт Воркутинского и Кузбасского месторождений угля.

По существующим представлениям только при содержании в породе диоксида кремния более 60 % и крепости породы более 6 по шкале проф. М.М. Протоdjаконова возможно возникновение вспышки МВС. Тем не менее, результаты испытаний указывают на наличие вспышек метановоздушной смеси в условиях, считающихся не опасными, т. е. когда возгорания МВС имеют место в том числе при испытаниях пород с небольшим (до 30 %) начальным содержанием кремния.

В работе этот феномен объясняется тем, что в процессе динамического контакта частей горных пород содержание диоксида кремния в приповерхностных слоях увеличивается в процессе трения вследствие разрушения и удаления цементирующей основы – материала, связывающего вкрапления частиц кварца, обладающих меньшими предельными прочностными свойствами, по сравнению с частицами кварца.

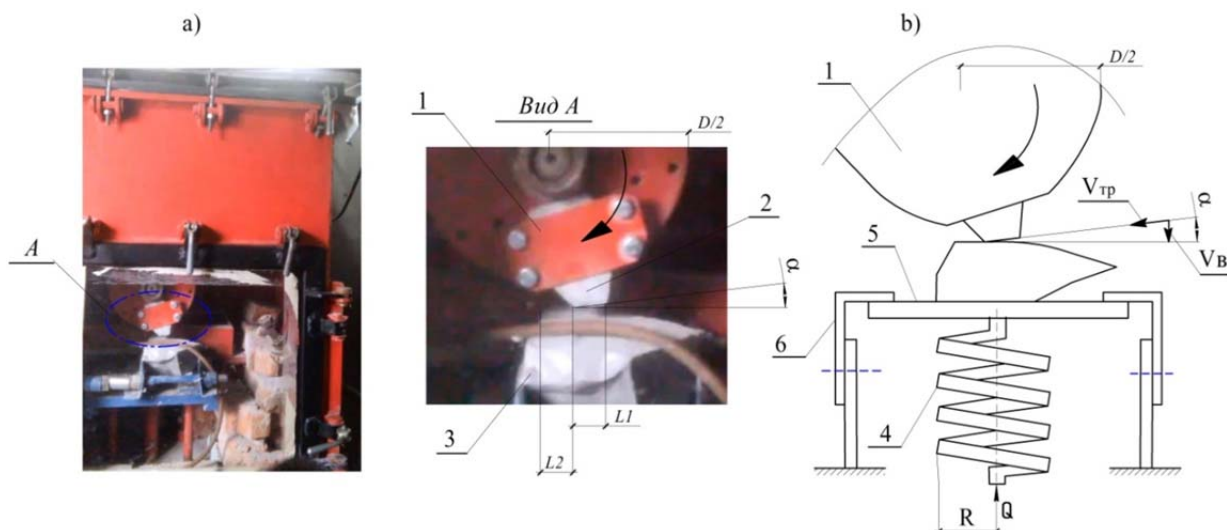


Рисунок 13 – Роторная установка для испытаний образцов горных пород на фрикционное трение: внешний вид а) и кинематическая схема установки б): 1

– ротор; 2 – подвижный образец породы; 3 – неподвижный образец; 4 – пружина; 5 – монтажный стол; 6 – ограничитель подъема монтажного стола;

$V_{тр}$ – скорость встречи подвижного образца с неподвижным образцом породы; $V_{в}$ – вертикальная (по нормали к неподвижному образцу) скорость встречи образцов

В результате происходит наклеп (упрочнение) приповерхностных слоев материала за счет увеличения содержания диоксида кремния в пятнах физического контакта, что приводит к воспламенению МВС при начальном содержании в породе диоксида кремния менее 60 %.

В этой связи в методику эксперимента по оценке фрикционной опасности горных пород внесены изменения, включающие этап предварительного формирования пятна контакта между образцами пород.

Результаты испытаний по предварительному формированию пятен контактов свидетельствуют об увеличении содержания диоксида кремния в местах динамических фрикционных взаимодействий отдельных горных пород, и это увеличение значимое – возможен приповерхностный прирост содержания кремния более чем на 20 %.

После формирования пятна контакта испытания на фрикционную опасность горных пород проводятся в соответствии с существующей методикой, обычным порядком (рисунок 14).

Методика оценки температуры воспламенения метановоздушной смеси включала в себя определение числа оборотов ротора до воспламенения МВС во взрывной камере, с одной стороны, и моделирование изменения температуры пятна контакта при периодическом фрикционном взаимодействии образцов, по схеме (рисунок 15).

Расчеты контактного взаимодействия образцов проводились методом конечных элементов по расчетной схеме (рисунок 1). Результаты прогноза температуры воспламенения МВС в зависимости от размеров пятен контактов приведены на рисунке 16.

Требуемые для расчетов механические и теплофизические характеристики испытываемых образцов определялись до опыта в лабораторных условиях.

Результаты экспериментально-теоретической оценки температуры воспламенения метановоздушной смеси показывают, что средний уровень температуры прогрева пятна контакта верхнего блока до воспламенения МВС соответствует величине $T_g = 746\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 16) и не зависит от размеров пятна контакта и числа оборотов ротора испытательной установки.

Далее, рассматривая природу воспламенения МВС вследствие возникновения искровых разрядов при разрушении углепородного массива, в диссертационной работе наряду с известными гипотезами образования электрических пробоев между частями горных пород выдвигается следующее предположение.

При обрушении горных пород в выработанных пространствах выемочных участков возможно возникновение температурного импульса из-за реализации пьезоэлектрического эффекта, вырабатывающего электрический заряд достаточной мощности для воспламенения метановоздушной смеси.

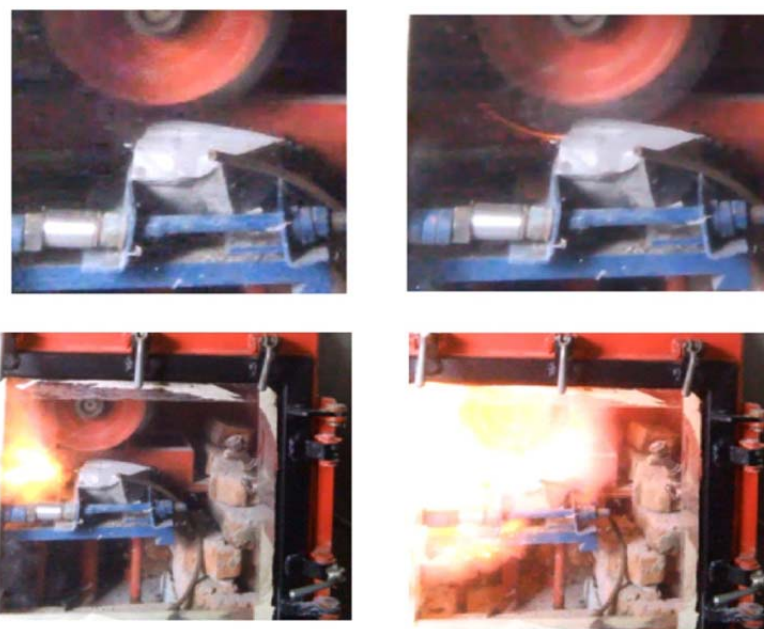


Рисунок 14 – Следующие друг за другом кадры видеосъемки воспламенения и взрыва МВС в камере роторной установки в опытах на фрикционную опасность горных пород

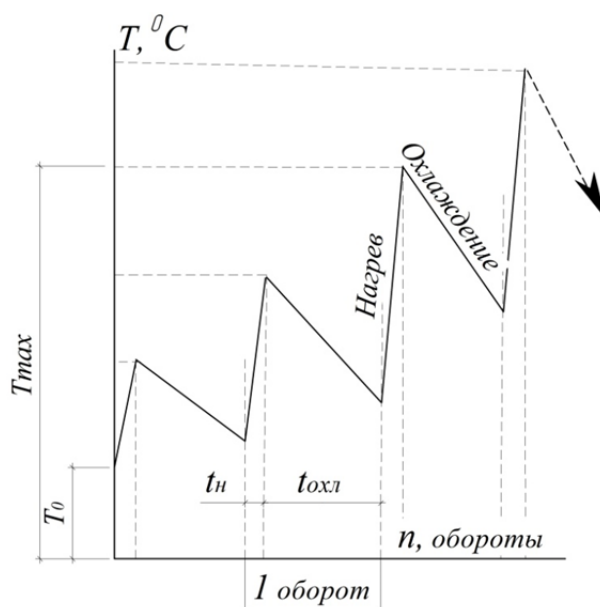


Рисунок 15 – Диаграмма-схема расчета изменения фрикционных температур в пятне контакта образцов при вращении ротора: T_0 – начальная (комнатная) температура образцов; T_{max} – максимальное значение температуры в пятне контакта; t_n – время взаимодействия образцов; $t_{\text{охл}}$ – время охлаждения образцов при вращении ротора

Экспериментальные исследования прямого пьезоэлектрического эффекта горных пород проводились двумя способами – в результате статического и динамического нагружения образцов горных пород.

В процессе испытаний установлено, что амплитуда всплеска напряжений, вызванных пьезоэлектрическим эффектом, зависит от ориентации электрических диполей (рисунок 17).

Наибольшая амплитуда напряжений при испытаниях образцов фиксируется, когда направление поляризации диполей в образцах ориентируется по нормали к разрушаемой поверхности. Поскольку при изготовлении образцов направление диполей в породе заранее неизвестно (рисунок 17б), методика испытаний предусматривает принудительную переориентацию направления поляризации в образцах по схеме рисунка 17а.

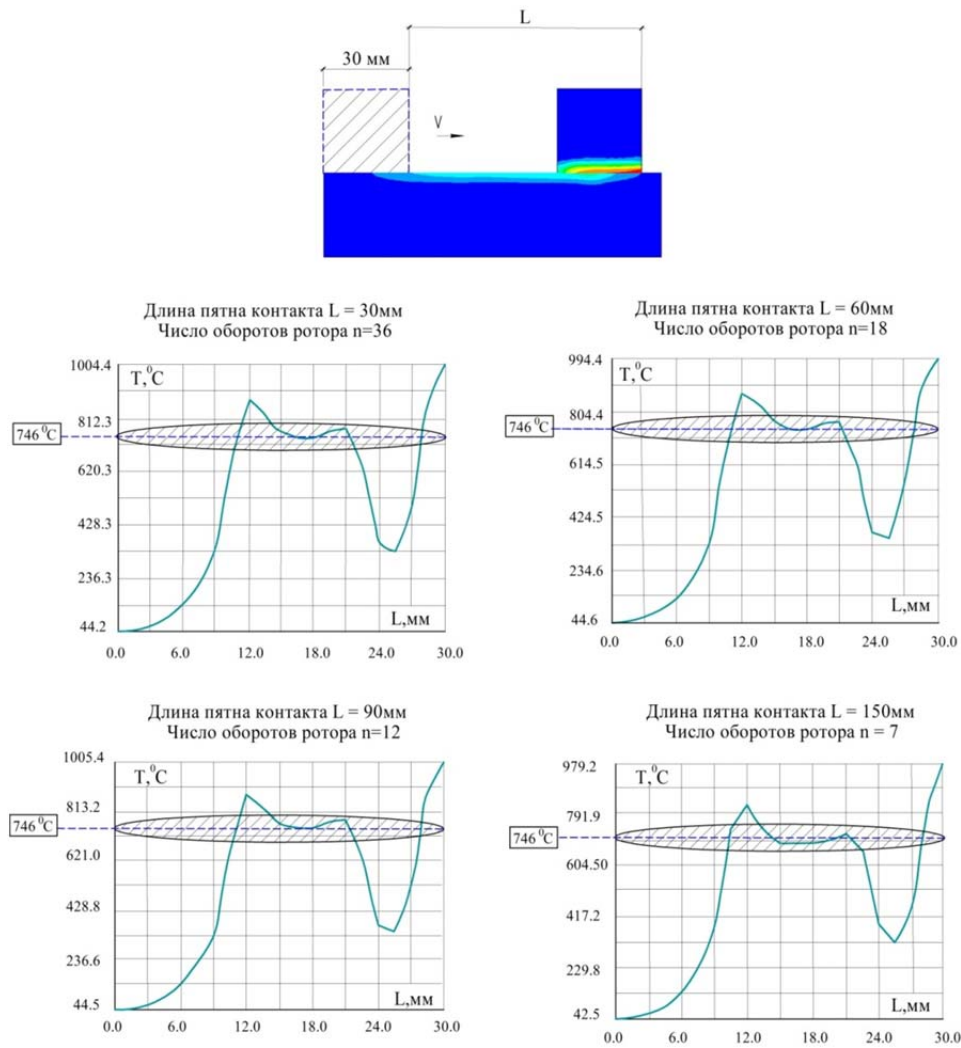


Рисунок 16 – Прогноз воспламенения МВС по температуре пятна контакта во взаимосвязи с числом оборотов ротора (число фрикционных взаимодействий) и с размерами пятен физического контакта между образцами

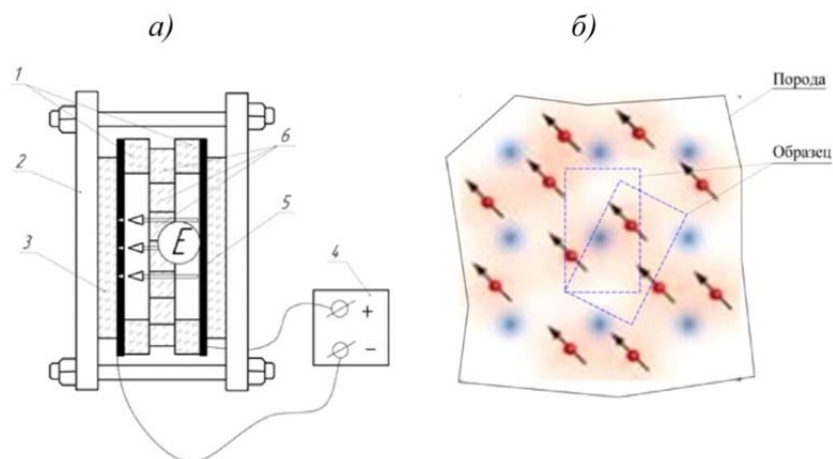


Рисунок 17 – Схема сборки для получения направленной поляризации диполей кварцита: 1 – керамические изолирующие огнеупорные пластины; 2 – опорная пластина (дюралюминий Д16); 3 – керамическая изолирующая огнеупорная пластина; 4 – источник высокого напряжения; 5 – контактные пластины из бронзовой фольги; 6 – образцы породы

Сборка с образцами кварцита (рисунок 17а) помещается в муфельную печь с температурой нагрева, при которой происходит фазовый переход II рода, связанный со скачкообразным изменением электрических свойств симметрии вещества (эффект Кюри; для кварца точка Кюри соответствует $T = 575\text{ }^{\circ}\text{C}$). После выдержки сборки в печи в течение 30 минут на контактные пластины (позиция 5, рисунок 17а) подается напряжение 3 кВ от высоковольтного источника постоянного тока 4, который не отключался до полного охлаждения печи. Считается, что после охлаждения упорядоченное состояние доменов остается стабильным. После охлаждения печи (10–12 часов) сборка разбиралась, и образец подвергался статическому или динамическому нагружениям. Полученные при этом электрические импульсы фиксировались на осциллографе, Рисунок 18.



Рисунок 18 – Типовая осциллограмма напряжений для образцов песчаника при динамическом приложении нагрузки

Результаты проведенных экспериментов по выявлению наличия пьезоэффектов в горных породах показали стабильное наличие пьезоэлектричества при деформировании и разрушении образцов из кварцита, песчаника, алевролита.

Используя пропорциональную связь между величиной заряда q [Кл] на гранях пьезоактивного образца и приложенной к грани силы F [Н] – $q = d \cdot F$ прямыми экспериментами с образцами горных пород (кварциты, содержание диоксида кремния 55–62 %; влажность 0,8 %), получена оценка для величины пьезоэлектрического модуля: $d = (0,70 \div 0,73) \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

С учетом того, что предел прочности кварцита при ударном нагружении соответствует значению $\sigma_b = 93,3$ МПа, оценка уровня выходного электрического напряжения U между гранями разрушаемого образца приводит к величине $\approx 5,6$ кВ, которой более чем достаточно для возникновения искрового разряда между берегами трещин.

В диссертационной работе показано, что искровой разряд, реализующийся в виде плазменного промежутка между расходящимися поверхностями частей массива, время его действия, температура прогрева газа

до его взрыва имеют прямую зависимость от уровня давления в массиве, от давления газа в дефекте, от площади и величины его раскрытия, а также от теплофизических свойств материала массива, от структуры и физико-механических свойств горных пород.

Таким образом, в главе представлены результаты решения пятой из задач исследований и доказательство первого и второго научных положений.

В главе 7 «Рекомендации по подавлению и локализации фрикционного и электродинамического воспламенения пылеметановоздушных смесей при разрушении горных пород в выработках угольных шахт» рассмотрены принципы увеличения безопасности ведения горных работ, базирующиеся на приемах устранения источников главных опасностей – вспышек и взрывов рудничных газов при разрушении горных пород.

При этом решены следующие задачи.

1. Разработаны рекомендации по подавлению и локализации взрывного горения рудничных газов в горных выработках и в транзитных коммуникациях (газопроводах) устройствами динамического автономного взрывоподавления, осуществляющими функции слежения за взрывоопасной обстановкой, и подавления распространения ударных волн и пламени без присутствия человека.

2. Экспериментально показано, что для полной флегматизации горящих углеводородов огнегасящим порошком количество огнетушащего вещества, необходимого для локализации очага горения по площади, составляет величину не менее $0,82 \text{ кг/м}^2$. Экспериментально показано, что для полной флегматизации горящих углеводородов огнегасящим порошком количество огнетушащего вещества, необходимого для локализации горения взрывчатого газа в объеме, составляет величину не менее $2,1 \text{ кг/м}^3$.

3. Разработан комплекс мероприятий и мер по предупреждению, подавлению и локализации фрикционного и электродинамического воспламенения пылеметановоздушных смесей при разрушении горных пород в выработках угольных шахт, в том числе при сложных условиях подготовки и отработки запасов угля.

4. Разработаны методические указания и методика экспертизы о порядке проведения испытаний на фрикционную опасность горных пород в лабораторных условиях с целью последующего выбора метода управления состоянием горного массива, способов и средств предотвращения воспламенения рудничных газов.

Таким образом, в главе представлены результаты решения шестой и седьмой задач исследований и доказательство пятого и шестого научного положений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой на основе выполненных автором исследований в области трибологических и электродинамических процессов и особенностей их проявлений при разрушении массива горных пород решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное социально-экономическое значение, – повышение промышленной безопасности предприятий угольной отрасли путем разработки методологических основ контроля и прогноза фрикционных и электроразрядных воспламенений рудничных газов, а также разработки способов предупреждения и локализации взрывного горения метановоздушных смесей в горных выработках.

Основные научные и практические результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Из шахтных наблюдений и зарисовок местоположений взрывов пылеметановоздушных смесей в горных выработках значительного числа обследованных угольных шахт (более 40 случаев) России установлено, что практически в каждой пятой аварии источники воспламенения метановоздушных смесей проявляются в результате разрушений горного массива в короткие периоды существования переходных процессов механических превращений пород от монолитного до дискретного состояний.

Необходимость в доработке существующих руководящих материалов, разработке новых нормативов для установления параметров возможного инициирования воспламенения рудничных газов при ведении горных работ вызвана: несовершенством теоретических представлений о процессе воспламенения метановоздушной смеси в результате трения разрушаемых частей горных пород; отсутствием методологии оценки влияния горного давления на трещинообразование и накопление повреждений в массиве пород как источников искрения при обрушениях и потерях устойчивости гетерогенных систем; сужением области надзора соответствующих служб за установлением степени фрикционной и электрической опасности горных пород, а также несовершенством и противоречиями между требованиями отдельных руководящих документов при проведении экспертиз с целью установления причин техногенных аварий.

2. С целью районирования вероятных местоположений взрывов рудничных газов в горных выработках, происходящих вследствие разрушений горных пород, а также для оценки критических условий возгораний пыли – и

метановоздушных смесей, исследования их особенностей разработаны следующие математические модели:

- в одномерной и двумерной постановках задачи нестационарной теплопроводности разработаны аналитические и численные модели оценки изменения температуры в зоне динамического фрикционного контакта частей горных пород, движущихся относительно друг друга с некоторой наперед заданной скоростью;

- разработана методика расчета эволюции напряженно-деформированного состояния массива при кратковременных нагружениях, а также с учетом ползучести и накопления повреждений во времени в рамках решений в двумерных и трехмерных постановках связанных задач нестационарной теплопроводности и упругости. Модель массива горных пород представлена в виде нелинейной вязкоупругой среды наследственного типа, учитывающей вид напряженного состояния;

- с учетом специфики изменения физико-механических свойств угля и вмещающих пород под нагрузкой разработана конечно-элементная процедура восстановления диаграмм деформирования в каждом из элементарных объемов массива, вид которых зависит от реализации в массиве сочетаний главных напряжений;

- основываясь на феноменологических представлениях разрушения материала, разработана процедура кинетики накопления повреждений в массиве горных пород. При этом полагается, что в углепородном массиве повреждения представляют собой множество дефектов, образующихся во времени, проявляющиеся в виде разрыхления массива через микро-/макротрещинообразование. Кинетическое уравнение поврежденности представлено зависимостью скорости роста повреждений материала от некоторого эквивалентного напряжения в трактовке Л.М. Качанова.

- в рамках теории малых упругопластических деформаций получено аналитическое решение задачи о плоском деформировании массива пород у круговой выработки для произвольного вида диаграмм деформирования.

3. Для различных физико-механических и теплофизических параметров горных пород исследована эволюция температурных полей в пятнах контакта образцов при их фрикционном динамическом взаимодействии, и установлено, что:

- увеличение модуля упругости материала приводит к увеличению значений температур в зоне контакта пары;

- увеличение плотности материала приводит к уменьшению значений температур;

- при увеличении коэффициента теплопроводности фрикционная температура уменьшается;
- увеличение коэффициента трения приводит к увеличению температуры;
- увеличение теплоемкости материала уменьшает температуру в зоне контакта;
- для воспламенения метановоздушной смеси взрывоопасной концентрации нагретыми поверхностями пород объем прогретой смеси должен составлять не менее $9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$. При этом для стандартных атмосферных условий уточнена минимальная энергия воспламенения смеси, соответствующая величине 0,287 мДж при минимальной длительности температурного воздействия, равной 0,11 мс. Величина температуры нагретой поверхности, необходимой для воспламенения метановоздушной смеси, близкой к стехиометрическому составу, находится на уровне своего среднего значения 746 °С и выше;
- при контактном давлении между образцами на уровне, близком к пределу прочности пород, температура пятна динамического контакта осколков возрастает до температуры плавления (до 1300 °С) за время от 0,01 мс до 0,1 мс при относительной скорости трения от 1 до 10 м/с, при толщине слоя фазовых превращений в пятне контакта 100–200 мкм;
- для средних значений теплофизических и механических характеристик кварцитов и давлении между образцами не менее 18 % от величины предела прочности породы при пути трения образцов, равном 0,03 м, средняя скорость взаимного смещения образцов, необходимая для воспламенения МВС, составляет не менее 7,2 м/с, при пути трения 0,06 м скорость смещения образцов составляет не менее 6,2 м/с, при пути трения 0,09 м скорость взаимного смещения составляет не менее 4,7 м/с.

4. В рамках лабораторных экспериментов в сочетании с теоретическим анализом установлены причины и параметры воспламенения метановоздушной среды при трении породы о породу, включающие следующие признаки:

- при разрушении массива и в процессе динамического контакта частей горных пород в приповерхностных контактирующихся слоях в результате структурно-текстурных преобразований возможно увеличение содержания диоксида кремния до 25–30 % и выше от начального, сопровождающееся увеличением коэффициента крепости материала на поверхностях пятен контактов, что объяснят причину вспышек и возгораний пылеметановоздушных смесей с изначально достаточно низким содержанием кремния в объеме породы (по М.М. Протодяконову возгорание горючих газовых смесей возможно лишь при уровне содержания кремния выше 60 %).

5. Проведенные лабораторные исследования и анализ причин возгораний пылеметановоздушных смесей позволили выявить и установить физику процесса накопления зарядов на вновь образующихся поверхностях горных пород при их разрушении:

- возникновение и накопление зарядов в массиве пород является следствием прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов, возникающих при растяжении-сжатии массива пород, в том числе при образовании и развитии трещиноподобных дефектов;

- показано, что возникновение искрового разряда, реализующегося вследствие пьезоэлектрического эффекта в виде плазменного промежутка между расходящимися поверхностями частей массива, время его действия, температура прогрева газа до его взрыва имеют прямую зависимость от уровня гравитационного давления в массиве (от глубины разработки), от давления газа в дефекте, от площади и величины его раскрытия, от ориентации дефекта по отношению к магнитным силовым линиям земного шара, от теплофизических свойств материала массива, а также от структуры и физико-механических свойств горных пород;

- экспериментально-теоретическими расчетами установлено, что при реализации пьезоэлектрического эффекта горных пород при уровне температуры в плазменном столбе искры между расходящимися поверхностями частей массива порядка $10\,000\text{ }^{\circ}\text{K}$ для возгорания метановоздушной смеси необходимо затратить энергию на возникновение искрового разряда порядка $8,2 \cdot 10^{-2}$ мДж. При этом площадь сечения канала плазмы длиной 3 мм составляет порядка $0,003\text{ мм}^2$, при диаметре толщины искры около 57 микрон. Оценочное время существования электрического пробоя (искры) составляет не менее 0,01 наносекунды.

6. Разработаны рекомендации по подавлению и локализации взрывного горения рудничных газов в горных выработках и в транзитных коммуникациях (газопроводах, газоотводящих сетях) устройствами динамического автономного взрывоподавления, осуществляющими функции слежения за взрывоопасной обстановкой и подавлением ударных волн и пламени.

Экспериментально установлено, что для полной флегматизации горящих углеводородов огнегасящим порошком количество огнетушащего вещества, необходимого для локализации очага горения по площади, составляет величину не менее $0,82\text{ кг/м}^2$; для полной флегматизации горения взрывчатого газа в объеме количество огнетушащего вещества составляет величину не менее $2,1\text{ кг/м}^3$.

7. Разработанная методология контроля фрикционных свойств материалов горных пород по параметрам пожарной и фрикционной опасности

легла в основу разработки «Методики оценки степени фрикционной опасности кварцесодержащих горных пород», а также предложений по предотвращению фрикционного искрения при разрушении горных пород, по пыле- и взрывозащите угольных шахт в следующие нормативные документы:

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 550 от 19 ноября 2013 года;

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах», утверждена Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 462 от 14 октября 2014 года;

- «Методические рекомендации по проведению экспертных работ при расследовании технических причин аварий в угольных шахтах», утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору, приказ № 743 от 20 декабря 2012 года.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Ботвенко Д.В. Особенности применения порошковых устройств автономной взрывозащиты горных выработок / Д.В. Ботвенко, В.Г. Казанцев, С.И. Голококов // Уголь. – 2019. – № 6 (1119). – С. 52–58.
2. Ботвенко Д.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород на базе деформационной теории пластичности / Д.В. Ботвенко, В.Г. Казанцев // Уголь. – 2019. – № 4 (1117). – С. 86–91.
3. Ботвенко Д.В. Управление состоянием массива у круговых выработок с учетом нелинейно-упругого поведения горных пород / Д.В. Ботвенко, В.Г. Казанцев, Ли Хи Ун // Уголь. – 2019. – № 2 (1115). – С. 31–36.
4. Черданцев С.В. Горение мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок / С.В. Черданцев, Ли Хи Ун, Ю.М. Филатов, Д.В. Ботвенко, П.А. Шлапаков, В.В. Колыхалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 2. – С. 172–180.
5. Ботвенко Д.В. Исследование возможности и причин искрообразования при деформировании и разрушении горных пород / Д.В. Ботвенко, В.Б. Попов, А.М. Ермолаев, В.Г. Казанцев // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 10. – С. 60–64.
6. Ботвенко Д.В. Исследование пьезоэлектрического эффекта горных пород / Д.В. Ботвенко, М.С. Сазонов, В.Г. Казанцев, В.В. Высоцкий // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 49–55.
7. Ботвенко Д.В. О возможности воспламенения метановоздушной смеси от пьезоэлектрического эффекта горных пород / Д.В. Ботвенко, В.Г. Казанцев, М.С. Сазонов, В.В. Высоцкий // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 96–98.
8. Сазонов М.С. Изменение энергетического состояния углепородного массива при проветривании горных выработок / М.С. Сазонов, Д.В. Ботвенко, Е.Я. Кулявцев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1–1. – С. 33–43.
9. Ботвенко Д.В. Обоснование количественной оценки показателей, основанных на геомеханических процессах, происходящих в углепородном массиве в окрестности очистного забоя / Д.В. Ботвенко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 15–19.
10. Ботвенко Д.В. Проблема фрикционного воспламенения метановоздушной смеси в современных условиях угледобычи / Д.В. Ботвенко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 48–50.
11. Ботвенко Д.В. Изучение условий формирования природных и технологических предпосылок к возникновению температурного импульса от фрикционного трения горных пород в выработанном пространстве очистного забоя / Д.В. Ботвенко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 5–14.

12. Ботвенко Д.В. Исследование процессов, обуславливающих устойчивость и периодичность обрушения пород кровли в очистных забоях на пластах полого падения при современной технологии угледобычи / Д.В. Ботвенко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 84–89.
13. Мурашев В.И. Оценка ударо- и выбросоопасности очистных забоев угольных шахт на стадии проектирования / В.И. Мурашев, Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 49–53.
14. Мурашев В.И. Применение программного комплекса для определения зон влияния очистных забоев на окружающий горный массив / В.И. Мурашев, Д.В. Ботвенко, А.А. Шуляков // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2011. – № 2. – С. 61–65.
15. Мурашев В.И. Разработка аналитико-экспериментального метода для определения геомеханического состояния проходческих забоев угольных шахт на стадии проектирования / В.И. Мурашев, Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 2. – С. 14–20.
16. Мурашев В.И. Аналитико-экспериментальный метод определения геомеханического состояния очистных забоев угольных шахт на стадии проектирования / В.И. Мурашев, Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков, А.Г. Овчаренко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 75–80.
17. Макаров П.В. Моделирование высокоскоростной деформации геосреды / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, С.И. Голоскоков, Д.В. Ботвенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S12. – С. 247–258.
18. Макаров П.В. Возможности применения эволюционного подхода при моделировании поведения геосреды / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, С.И. Голоскоков, Д.В. Ботвенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S12. – С. 259–276.
19. Голоскоков С.И. Экспериментальные исследования фракционного состава продуктов разрушения угля при различных скоростях нагружения / С.И. Голоскоков, Д.В. Ботвенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S13. – С. 210–211.
20. Тимошенко А.М. Методика проведения технического аудита системы промышленной безопасности в организациях по добыче и переработке каменного угля / А.М. Тимошенко, Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков, А.Я. Каминский // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 41–53.
21. Макаров П.В. Моделирование разрушения образцов углей при динамическом нагружении / П.В. Макаров, Е.П. Евтушенко, И.Ю. Смолин, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 31–38.

22. Ботвенко Д.В. Анализ степени фрикционной опасности горных пород угольных шахт Кузбасса / Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № S6. – С. 81–83.

Статьи в других журналах и сборниках научных трудов

23. Ботвенко Д.В. Автоматические средства локализации взрывов при применении камерно-столбовой системы отработки запасов угля в условиях ООО «УК «Межегейуголь» / Д.В. Ботвенко, С.И. Голоскоков, М.Ю. Коптев, Е.П. Татарников // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2017. – № 1. – С. 19–30.

Патенты РФ на изобретения

24. RU № 2473810 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01). Способ прогноза выбросоопасности очистных забоев / Мурашев В.И., Ботвенко Д.В., Трубицын А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО». – № 2011135274/03; заявл. 23.08.2011, опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3. – 8 с.

25. RU № 2473809 Российская Федерация, МПК E21F 5/00 (2006.01). Способ прогноза выбросоопасности подготовительных выработок / Мурашев В.И., Ботвенко Д.В., Трубицын А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО». – № 2011134945/03; заявл. 19.08.2011, опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3. – 7 с.

26. RU № 2377411 Российская Федерация, МПК E21F 5/02 (2006.01). Способ оценки горных пород по фрикционному воспламенению метановоздушной смеси / Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ботвенко Д.В., Голоскоков С.И.; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО». – № 2008132243/03; заявл. 04.08.2008, опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36. – 6 с.

Подписано в печать 03.07.2020 г.
Формат 60х84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Заказ _____. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

ФГБОУВО «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева».
650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ФГБОУВО «Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева».
650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А.