

На правах рукописи

Спицын Андрей Александрович



**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА РАБОТНИКОВ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОГЕЛЯ**

Специальность 2.10.3. Безопасность труда

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Коришунов Геннадий Иванович

Официальные оппоненты:

Романченко Сергей Борисович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», отдел 3.4. Моделирования пожаров и нестандартного проектирования, ведущий научный сотрудник;

Кобылкин Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, лаборатория 2.2. Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений, старший научный сотрудник.

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

Защита диссертации состоится **16 июля 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 мая 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Взрывчатая угольная пыль наряду с метаном при несоблюдении графика проведения мероприятий взрывозащиты или их недостаточной эффективности представляет опасность для работников шахт и их инфраструктуры. С начала XXI века неоднократно фиксировались взрывы пыли и газа на угольных шахтах России, США, Китая, Польши и других стран, в которых погибло более 700 человек.

По данным Роспотребнадзора в России в 2023 году 79% работников трудились в условиях, не удовлетворяющим критериям безопасности. Наибольшее количество работников, подвергающихся ежесменно воздействию повышенной концентрации фиброгенной пыли (39,2 %), приходится на угольную отрасль. За последние три года зафиксировано 129 случаев профессиональных заболеваний органов дыхания у персонала наиболее развитого угольно-промышленного региона России – Кузбасса.

Ежегодно на угольных шахтах РФ выявляется свыше 4500 нарушений, значительная часть которых вызвана некачественным проведением мероприятий пылевзрывозащиты. В частности, не соблюдаются периодичность и норма осланцевания горных выработок. Причиной этого является высокая трудоемкость работ, а также дефицит трудовых, транспортных и энергетических ресурсов. Кроме того, осланцевание повышает риск развития заболеваний органов дыхания вследствие увеличения запыленности.

Приведенная статистика свидетельствует о том, что задачи улучшения пылевой обстановки и повышения уровня промышленной безопасности требуют разработки менее трудоемких способов обработки выработок, позволяющих обеспечить их взрывобезопасность в течение более длительного периода времени по сравнению с осланцеванием.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что в качестве одного из перспективных направлений повышения эффективности пылевзрывозащиты на угольных шахтах следует рассмотреть применение водного раствора суперабсорбента (гидрогеля), положительно зарекомендовавшего себя в различных отраслях промышленности.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросами улучшения пылевой обстановки на горнодобывающих предприятиях и обеспечения пылевзрывозащиты занимались учёные: К.А. Лебецки, С.Б. Романченко, С.С. Кубрин, Б.Ф. Кирин, Ю.В. Шувалов, В.В. Кудряшов, Г.С. Забурдяев, А.Т. Айруни, С.Н. Подображин, И.Г. Ищук, А.А. Трубицын, О.В. Скопинцева, Г.А. Поздняков, Я.С. Ворошилов, А.С. Кобылкин, А.В. Корнев, J.F. Colinet, T.X. Ren, J.M. Listak, M.J. Sapko, Q. Wang и др. Однако, в их работах практически не рассматривались вопросы применения гидрогелей в качестве средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности.

Таким образом, разработка мероприятий по повышению безопасности труда работников угольных шахт по пылевому фактору на основе использования гидрогеля является актуальной задачей.

Объект исследования – процессы образования, витания, осаждения и связывания угольной пыли в подземных горных выработках.

Предмет исследования – взаимодействие пылевого аэрозоля и осевшей угольной пыли с гидрогелем.

Цель работы – повышение безопасности труда работников угольных шахт за счет снижения профессиональных рисков, обусловленных пылевым фактором.

Идея работы – снижение профессиональных рисков достигается путем замены осланцевания в конвейерных и путевых выработках с интенсивностью пылеотложения от $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ до $13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ на обработку гидрогелем, позволяющим снизить в них запыленность и обеспечить пылевзрывобезопасность в течение более длительного периода времени по сравнению с осланцеванием.

Задачи исследования:

1. Анализ аварийности, травматизма и профзаболеваемости на угольных шахтах, обусловленных пылевым фактором, а также способов их предупреждения.

2. Проведение исследований процессов витания, осаждения и закрепления угольной пыли в горных выработках.

3. Обоснование возможности применения гидрогеля для обеспечения пылевзрывобезопасности горных выработок и снижения в них запыленности.

4. Проведение лабораторных исследований пылевой динамики на физической модели горной выработки, обработанной инертной пылью и гидрогелем.

5. Разработка технологии применения гидрогеля, ее апробация в шахтных условиях и технико-экономическое обоснование.

6. Оценка снижения профессиональных рисков работников шахт при частичной замене осланцевания гидрогелем.

Научная новизна работы:

– установлены зависимости остаточной влажности гидрогелей различной концентрации в смеси с угольной пылью от микроклиматических параметров (температуры, влажности и скорости движения воздуха) и количества угольной пыли;

– установлены зависимости эффективности пылезакрепления в выработках, обработанных гидрогелем, от интенсивности пылеосаждения.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.10.3. Безопасность труда, пунктам 1, 2 и 6.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– получены математические зависимости массы угольной пыли, осаждаемой по длине выработки, от скорости движения воздушной струи и интенсивности пылеотложения;

– определены критические скорости срыва пылевых частиц, позволяющие установить зоны с наибольшей интенсивностью пылеотложения и скорректировать периодичность обработки выработок;

– определены типы и параметры горных выработок, которые целесообразно обрабатывать гидрогелем вместо инертной пыли, что позволит повысить безопасность труда за счет снижения трудоемкости и периодичности работ, уменьшения запыленности и повышения надежности пылевзрывозащиты;

– предложена экономически обоснованная технология приготовления и нанесения гидрогеля в шахтных условиях.

– результаты диссертационной работы подтверждены решением о выдаче свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683904 от 10 ноября 2023 года;

– результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к внедрению в рамках мероприятий повышения эффективности пылевзрывозащиты на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (акт об использовании результатов кандидатской диссертации от 03 апреля 2025 года).

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, включающие анализ профессиональной заболеваемости, травматизма и аварийности на угольных шахтах, обусловленных пылевым фактором, а также обзор мирового опыта по предотвращению взрывов угольной пыли и снижению запыленности; методы определения физико-химических свойств гидрогеля – динамической вязкости (ротационный вискозиметр IKA ROTAVISC me-vi); химического и фазового состава (рентгенофлуоресцентный спектрометр XRF-1800 фирмы Shimadzu и рентгеновский порошковый дифрактометр XRD-6000); адгезии (универсальная испытательная машина Testometric M350-5AT); гравиметрический, депреометрический и оптический методы измерения запыленности с использованием четырехканального аспиратора «АПВ-4», пылемеров «ПКА-01» и «МИК-1» соответственно при проведении лабораторных и шахтных исследований пылединамических процессов и оценки эффективности гидрогеля.

На защиту выносятся следующие положения:

1. С целью повышения пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт, снижения трудо- и энергоемкости, присущих осланцеванию, следует применять 4%-ый водный раствор суперабсорбента (гидрогель) на основе полипроп-2-еноата натрия.

2. Для определения периодичности обработки горных выработок гидрогелем необходимо учитывать эффективность пылезакрепления при его применении, особенности пылераспределения по длине и поверхностям горных выработок, а также критическую скорость срыва пылевидных частиц при различной интенсивности пылеотложения.

3. Для повышения безопасности труда работников по пылевому фактору предлагается проводить обработку подземных горных выработок, оснащенных ленточными конвейерами, и выработок, прилегающих к очистному забою, с интенсивностью пылеотложения от $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ до $13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ гидрогелем с применением высокопроизводительных механизированных средств.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается значительным объемом теоретических, лабораторных и натурных исследований при достаточной сходимости результатов. В работе применялись современные, в т.ч. стандартизированные методики, оборудование и приборы для исследования физико-химических свойств гидрогелей и эффективности пылезакрепления, определения запыленности и интенсивности пылеотложения в подземных горных выработках. Эффективность применения гидрогеля подтверждена положительными результатами экспериментов на шахте им. А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс».

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на 4 научно-практических мероприятиях с докладами: XXIV Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2023» (г. Ухта, Ухтинский государственный технический университет, 2023 г.), XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, Институт горного дела Уральского отделения РАН, 2023 г.), XXXI и XXXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2023 г., 2025 г.).

Реализация результатов работы. Разработанные мероприятия и рекомендации по применению гидрогеля для повышения пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт учтены при планировании противопылевых мероприятий на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Личный вклад автора заключается в анализе травматизма, уровня профессиональных заболеваний, количества произошедших аварий, связанных с пылевым фактором на угольных шахтах, проведении теоретических исследований пылевой динамики в подзем-

ных горных выработках, лабораторных исследований пылединамических процессов, физико-химических свойств гидрогеля и его эффективности, натурных испытаний разработанной технологии приготовления и нанесения гидрогеля в шахтных условиях; анализе полученных данных и установлении зависимостей; формулировании основных научных положений и выводов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 опубликованных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования и 4 приложения. Содержит 126 страниц машинописного текста, 38 рисунков и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, раскрыты пункты научной новизны, теоретическая и практическая значимость исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализировано общее состояние безопасности труда на угольных шахтах по пылевому фактору, представлена связанная с ним статистика аварий, профессиональных заболеваний и производственного травматизма, проанализированы факторы, определяющие пылевую обстановку и состояние пылевзрывобезопасности горных выработок, а также рассмотрены основные способы и механизмы обеспечения пылевзрывозащиты и снижения запыленности.

Во второй главе представлены результаты лабораторных исследований физико-химических свойств предлагаемого гидрогеля на основе полипроп-2-еноата натрия, а также параметры пожаро-

взрывобезопасности, подтверждающие возможность и целесообразность его использования в качестве средства пылевзрывозащиты.

В третьей главе представлены исследования процессов витания, осаждения угольной пыли по длине выработок, описаны лабораторные исследования пылединамических процессов и определения эффективности пылезакрепления на гидрогеле, проведенные на разработанной физической модели выработки.

В четвертой главе приведена технология приготовления и нанесения гидрогеля на поверхности горных выработок, описаны шахтные исследования эффективности пылезакрепления, влаго- и пылеудержания гидрогелем при разных интенсивностях пылеотложения и микроклиматических условиях, позволившие определить типы и параметры горных выработок, использование в которых гидрогеля вместо осланцевания будет целесообразным; приведен расчет профессиональных рисков; дана технико-экономическая оценка разработанного технологического решения.

В заключении приведены основные результаты проведенного диссертационного исследования и сформулированы рекомендации по повышению безопасности труда работников угольных шахт на основе применения гидрогеля в качестве средства пылевзрывозащиты.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. С целью повышения пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт, снижения трудо- и энергоемкости, присущих осланцеванию, следует применять 4%-ый водный раствор суперабсорбента (гидрогель) на основе полипроп-2-еноата натрия.

С целью снижения рисков травмирования и развития профессиональных заболеваний предлагается рассмотреть в качестве эффективного средства пылевзрывозащиты водные растворы суперабсорбентов (гидрогели), основными достоинствами которых являются экологичность, относительная безвредность, способность абсорбировать и удерживать в больших количествах влагу длительное время.

В результате проведенного анализа суперабсорбентов, производимых как в России, так и зарубежом, акцент сделан на гидрогеле отечественного производства, включающего полипроп-2-еноат натрия, хлорид аммония и хлорид натрия.

Согласно паспорту безопасности, данный гидрогель является негорючим, пожаровзрывобезопасным и малоопасным по степени воздействия на организм человека веществом. Дополнительно был изучен химический и фазовый состав гидрогеля в научном центре «Экосистема» Горного университета. Пожаровзрывобезопасность гидрогеля была подтверждена исследованиями в лаборатории АО «НЦ ВостНИИ».

На базе Горного университета в научном центре геомеханики и проблем горного производства были проведены исследования наиболее важных эксплуатационных характеристик гидрогеля: адгезии, текучести, вязкости, кинетики высыхания в смеси с угольной пылью. Исследовались гидрогели с концентрацией сухого вещества 2, 4, 6, 8, 12 и 16%. Текучесть определялась на образцах, моделирующих поверхность горных выработок, пройденных по породе, по углю, а также закрепленных бетонной крепью.

Адгезионные свойства составов изучались на образцах из эквивалентного материала, покрытых слоем гидрогеля толщиной 3-4 см. Максимальная нагрузка на отрыв и максимальное удлинение до разрушения обработанных образцов определялись на установке «Testometric M350-5AT». Результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Адгезионные свойства гидрогелей

Концентрация раствора	Максимальная нагрузка, кгс	Максимальное удлинение до разрушения, мм
6%	1,453	1,605
4%	1,305	1,559
2%	0,511	1,953

С экономической точки зрения и эффективности удержания целесообразно применение 4%-ого раствора гидрогеля.

Для определения продолжительности «взрывозащитного эффекта» (когда влажность удерживаемой угольной пыли сохраняется выше 12%) проведены исследования кинетики высыхания гид-

рогелей в смеси с угольной пылью, масса которой подбиралась исходя из значений интенсивностей пылеотложения (P_t) в действующих угольных шахтах (рисунки 1 и 2).

Использование 4%-ого раствора гидрогеля при $P_t = 19,9 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ позволяет сохранять влажность осевшей угольной пыли не менее 12% до 3-х суток, при $P_t = 41,6 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ – до 1,5 суток, более концентрированные растворы суперабсорбента обеспечивают нормативные значения влажности в течение еще большего периода времени, составляющего не менее 2-х суток. В то же время при $P_t = 41,6 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ осланцевание проводится не реже 3-х раз в сутки.

Таким образом, доказана возможность применения 4%-ого гидрогеля вышеуказанного состава в качестве средства пылевзрывозащиты, позволяющего снизить периодичность обработки горных выработок по сравнению с осланцеванием.

2. Для определения периодичности обработки горных выработок гидрогелем необходимо учитывать эффективность пылезакрепления при его применении, особенности пылераспределения по длине и поверхностям горных выработок, а также критическую скорость срыва пылевидных частиц при различной интенсивности пылеотложения.

С целью исследования процессов пылепереноса и пылеосаждения при различных интенсивностях пылеотложения, а также установления эффективности связывания угольной пыли гидрогелем, нанесенным на поверхности выработки, был разработан лабораторный экспериментальный стенд, представляющий собой физическую модель горизонтальной горной выработки (рисунок 3), параметры которой определялись с учетом критериев подобия. Для учета физико-механических свойств горного массива и шероховатости горных выработок внутренняя поверхность стенда была облицована подобранным эквивалентным материалом.

Методика проведения экспериментов предусматривала два этапа: 1 – моделирование аэро- и пылединамических процессов, протекающих при различных скоростях воздушного потока и интенсивностях пылеотложения ($P_t = 0,1, 1,2, 2,4, 13, 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$); 2 – определение эффективности пылезакрепления гидрогелем, нанесенным на внутреннюю поверхность стенда. Проводились замеры

запыленности в двух сечениях гравиметрическим методом, измерялась масса пыли, осевшей на почве и расставленных по длине стенда подложках. Регистрировались микроклиматические и атмосферные условия, рассчитывался баланс пылераспределения.

Полученные зависимости количества пыли, осевшей на боках и кровле выработки, и выпадающей на почву, от аэро- и пылединамических нагрузок представлены на рисунках 4 и 5. При $P_t = 1,2 - 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ наблюдается единый характер распределения пылевых частиц – при увеличении скорости воздуха (v) от 0,5 до 2 м/с доля частиц, закрепившихся на боках и кровле постепенно увеличивается, при $v > 2-3 \text{ м/с}$ доля осевшей на почве пыли резко возрастает, что свидетельствует о срыве ранее закрепившейся на боках и кровле части пыли. В настоящее время расход инертной пыли и аналогичных составов, а также периодичность обработки горных выработок определяются исходя из интенсивности пылеотложения на 1 п.м. выработки без учета баланса распределения угольной пыли по поверхностям выработки.

Для определения эффективности закрепления взвешенной угольной пыли на гидрогеле, нанесенного на внутреннюю поверхность стенда, моделировались наиболее неблагоприятные пылединамические процессы ($P_t = 2,4, 13, 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$) при максимальной скорости воздушного потока 4 м/с. Полученные результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2 – Оценка эффективности пылезакрепления

№	Интенсивность пылеотложения, $P_t, \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$	Среднее значение запыленности в 1-ом сечении, $C_1, \text{ мг/м}^3$		Среднее значение запыленности во 2-ом сечении, $C_2, \text{ мг/м}^3$	
		до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
1	2,4	375,0	62,5	14,8	3,1
2	13	890,6	437,5	35,2	18,8
3	42,2	2 125,0	1 281,3	67,2	35,2

Масса пыли при обработке стенок стенда 4%-ным гидрогелем, сократилась на 42,7-61,2%, а масса пыли, которая закрепилась на

боковых поверхностях и кровле модели, увеличилась на 43,7-52,3% или в 1,8-2,1 раза. Увеличение интенсивности пылепоступления до значений, характерных для наиболее «пыленагруженных» участков в шахтах приводит к ускоренному забиванию слоя гидрогеля пылью и снижению пылеулавливающего эффекта. Тем не менее, при экстремальных пылевых нагрузках, характеризуемых величинами $P_t = 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ и $P_t = 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$, эффективность снижения запыленности при использовании гидрогеля в первоначальный момент времени составила 46,6-50,9% и 39,7-47,6%.

Концентрация пыли в стенде, измеренная практически сразу после обработки его внутренних поверхностей гидрогелем, снизилась – на 79,1-83,3% при $P_t = 2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$, на 66,7- 81,5% – после высыхания гидрогеля в течение 4 часов и повторных пылевых нагрузках. Высокая пылезакрепляющая и адгезионная способность гидрогеля была подтверждена шахтными экспериментами в условиях постоянных повышенных пылевых нагрузок и интенсивностях пылеотложения до $13 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$

3. Для повышения безопасности труда работников по пылевому фактору предлагается проводить обработку подземных горных выработок, оснащенных ленточными конвейерами, и выработок, прилегающих к очистному забою, с интенсивностью пылеотложения от $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ до $13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ гидрогелем с применением высокопроизводительных механизированных средств.

С целью подтверждения раннее полученных результатов и определения рациональной области применения гидрогеля были проведены шахтные испытания, предусматривающие обработку гидрогелем участков горных выработок, отличающихся интенсивностью пылеотложения, расположением источников пылевыделения и микроклиматическими параметрами: №1 – конвейерный наклонный ствол (КНС); № 2 – конвейерный бремсберг; № 3 – магистральный вентиляционный штрек; № 4 – исходящая струя из лавы в путевом штреке. Во всех выбранных для экспериментов выработках, за исключением участка № 4, располагались ленточные конвейеры. Результаты шахтных испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Условия проведения и результаты шахтных испытаний эффективности гидрогеля

Наименование параметра	Опытный участок			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Атмосферное давление, $p_{\text{атм}}$, кПа	100,5-100,9	101,4-101,6	101,6	101,6
Температура воздуха, $t_{\text{в}}$, °C	13,6 -14,4	15,2-15,8	14,3-14,8	14,6-15,6
Относительная влажность, $\phi_{\text{в}}$, %	66,8-79,1	67,5-78,9	71,1-77,0	78,7-88,8
Средняя по сечению скорость движения воздуха, $g_{\text{ср.}}$, м/с	5,9-6,0	2,6-2,7	2,6 -3,1	1,4-1,5
Средняя МРК в 0,4-0,6 м от бока выработки до и после ее обработки гидрогелем $C_{\text{р.т.}}/C'_{\text{р.т.}}$, мг/м ³	5,6 / 4,9	12,6 / 10,8	12,8 / 11,0	18,6 / 15,4
Тип обрабатываемой поверхности	Бетонная	Угольный массив	Угольный массив	Угольный массив
Остаточная влажность гидрогеля с осевшей пылью, $W_{\text{ост.}}$, %: – через 1 сутки – через 2 суток – через 4 суток – через неделю	91,45 86,20 – 78,50	91,76 90,55 – 77,12	91,92 86,87 – 84,68	– 94,70 92,10 –
Относительная влажность, $\phi_{\text{в}}$, %	66,8-79,1	67,5-78,9	71,1-77,0	78,7-88,8
Средняя по сечению скорость движения воздуха, $g_{\text{ср.}}$, м/с	5,9-6,0	2,6-2,7	2,6 -3,1	1,4-1,5

Продолжение таблицы 3

Наименование параметра	Опытный участок			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Средняя МРК в 0,4-0,6 м от бока выработки до и после ее обработки гидрогелем $C_{р.т.} / C'_{р.т.}$, мг/м ³	5,6 / 4,9	12,6 / 10,8	12,8 / 11,0	18,6 / 15,4
Тип обрабатываемой поверхности	Бетонная	Угольный массив	Угольный массив	Угольный массив
Остаточная влажность гидрогеля с осевшей пылью, $W_{ост.}$, %:				
– через 1 сутки	91,45	91,76	91,92	–
– через 2 суток	86,20	90,55	86,87	94,70
– через 4 суток	–	–	–	92,10
– через неделю	78,50	77,12	84,68	–
Интенсивность пылеотложения, P_t ,	1,29	2,29	2,46	13,44
Периодичность осланцевания, T , сут.	20	11	10	2
Периодичность обработки гидрогелем, T , сут.	21-40	21-40	21-40	4-6

Проведение шахтных экспериментов позволило подтвердить результаты лабораторных и стендовых испытаний. За время проведения экспериментов, слой гидрогеля, толщиной от 4-6 до 10-12 мм держался на различных поверхностях и абсорбировал пылевидные частицы. Влажность смеси за одну неделю снизилась не более чем на 19%, исходя из чего можно предположить, что при $P_t = 2,4$ г/м³·сут. «пылевзрывозащитный эффект» сохранится на протяжении 3-5 недель, что в 2-3,5 раза дольше по сравнению с осланцеванием. Для участков выработок с $P_t \approx 13,0$ г/м³·сут. продолжительность действия

гидрогеля определяется в большей степени забиванием его слоя угольной пылью. В путевом штреке на исходящей из очистного забоя струе, влажность гидрогеля через 4 суток после его нанесения была выше 90 %, но уровень насыщения угольной пылью приближался к максимальному. Срок «эффективного действия» гидрогеля составил 4-6 суток, что больше чем в 2 раза по сравнению с осланцеванием. Периодичность осланцевания для такого рода выработок может составлять от 1 раза в 1-2 суток до нескольких раз в сутки в зависимости от пределов взрывчатости угольной пыли, в то время как на периодичность обработки горных выработок гидрогелем это не влияет. Обработка гидрогелем горных выработок с более высокой интенсивностью пылеотложения $P_t > 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ будет не эффективной. В общешахтных выработках с $P_t < 1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ и $v > 5 \text{ м/с}$ применение гидрогеля нецелесообразно по причине необходимости повторного нанесения гидрогеля или его увлажнения с периодичностью выше частоты нанесения инертной пыли.

Анализ данных по запыленности позволяет отметить ее снижение в диапазоне 12,5-14,3 % при $P_t = 1,29-2,46 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ и на 17,2 % на участке с $P_t = 13,44 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$

Для применения в шахтных условиях была разработана технология приготовления и нанесения гидрогеля механизированным способом, предусматривающая доставку и подачу гидрогеля посредством локомотивов и автоматических устройств по аналогии с «Бураном» для осланцевания (рисунок 7).

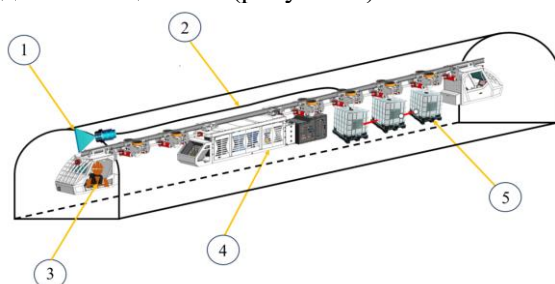


Рисунок 7 – Схема нанесения гидрогеля в шахтных условиях: 1 – распылительная форсунка; 2 – система подачи гидрогеля; 3 – машинист дизельного локомотива; 4 – дизельный локомотив; 5 – еврокубы с гидрогелем

Для распыления гидрогеля ручным способом могут быть использованы бочковые насосы винтового типа с производительностью 40-60 л/мин и максимальным напором 4-6 Бар. Предлагаемые технологические решения по нанесению гидрогеля позволят избежать значительных физических нагрузок, характерных для работников при реализации осланцевания. Снижение периодичности и трудоемкости мероприятий пылевзрывозащиты за счет частичной замены инертной пыли на гидрогель позволит повысить безопасность труда также за счет снижения профессиональных рисков – риска развития профзаболеваний органов дыхания и риска травмирования, связанного с угрозой взрыва угольной пыли.

Для определения величины снижения риска травмирования персонала ($\Delta R_{\text{травм.}}$) в горных выработках в случае потенциально возможного взрыва угольной пыли из-за несоблюдения нормированного графика пылевзрывозащитных мероприятий была предложена формула (1):

$$\Delta R_{\text{травм.}} = (P_{\text{нар. осл.}} - P_{\text{нар. гель}}) \cdot 100\% = \left[\left(1 - \frac{n_{\text{осл.}}}{N_{\text{осл.}}} \right) - \left(1 - \frac{n_{\text{гель}}}{N_{\text{гель}}} \right) \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

где $P_{\text{нар. осл.}}$, $P_{\text{нар. гель}}$ – вероятность нахождения выработок во взрывоопасном состоянии из-за несоблюдения нормированного графика осланцевания и обработки выработок гидрогелем, д. ед.; $n_{\text{осл.}}$, $n_{\text{гель}}$ – количество фактически проведенных осланцеваний и обработок выработок гидрогелем за рассматриваемый период, шт., $N_{\text{осл.}}$, $N_{\text{гель}}$ – нормативное количество осланцеваний и обработок гидрогелем за рассматриваемый период, шт.

Для оценки снижения риска заболеваний пылевой этиологии использовалась формула В.В. Ткачева (2):

$$R = 8,6 \cdot X_1 + 6,0 \cdot X_2 + 19,4 \cdot T \cdot L_1 + 6,4 \cdot K \cdot L_2 \cdot L_3 \quad (2)$$

где X_1 , X_2 – возраст работника и общий стаж его работы, лет; T – стаж работы при контакте с угольной пылью, лет; K – средневзвешенное содержание пыли в воздухе рабочей зоны, мг/м³; L_1 – коэффициент, учитывающий содержание свободного диоксида кремния, $L_1 = 0,6-1,2$; L_2 – коэффициент, учитывающий дисперсный и минеральный

состав частиц вдыхаемой пыли, $L_2 = 0,8-2,3$; L_3 – коэффициент, учитывающий тяжесть труда и объем легочной вентиляции, $L_3 = 1,1-1,8$.

Для условий выработок, приведенных в таблице 3, замена осланцевания на обработку гидрогелем позволит снизить величину риска травмирования работников в случае реализации потенциальной угрозы взрыва угольной пыли на 25-50 %. Риск развития профессиональных заболеваний органов дыхания у работников, задействованных в рассматриваемых выработках, снизится на 10-40 % в зависимости от расположения рабочего места, интенсивности пылепоступления и пылеотложения.

Реализация предлагаемого технического решения позволит не только повысить безопасность труда работников, но и получить экономический эффект в размере 5,2 млн. в год при обработке 1 км горных выработок с площадью поперечного сечения 24 м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предлагается решение актуальной задачи, направленной на обеспечение безопасности труда работников угольных шахт по пылевому фактору.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Высокий уровень аварийности, травматизма и профзаболеваемости на угольных шахтах по пылевому фактору обусловлен низкой эффективностью мероприятий комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты, в частности, нарушением периодичности и норм осланцевания горных выработок.

2. Проведенные теоретические исследования процессов впитывания и закрепления угольной пыли в выработках показали, что эффективным механизмом обеспечения пылевзрывозащиты является удержание пылевых частиц во влажном вязком слое гидрогеля.

3. Результаты лабораторных исследований химического состава и физических свойств (текучести, влажности, вязкости, адгезии) гидрогеля на основе полипроп-2-еноата натрия показали возможность применения его 4%-ого водного раствора в качестве средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности.

4. В ходе лабораторных исследований пылевой динамики доказана эффективность пылезакрепления и снижения запыленности при использовании гидрогеля, определена критическая скорость срыва пылевых частиц и получено распределение угольной пыли по поверхности выработок, что необходимо учитывать при расчете расхода гидрогеля и периодичности его нанесения.

5. В результате проведенных шахтных экспериментов определены типы и параметры горных выработок, в которых применение гидрогеля вместо осланцевания будет целесообразным и позволит повысить безопасность труда.

6. Разработана технология применения гидрогеля, использование которой позволит снизить профессиональные риски работников угольных шахт и получить экономический эффект.

7. Научные положения диссертации и предлагаемое техническое решение обеспечивают дальнейшее развитие теории и технологии обеспечения пылевзрывозащиты горных выработок угольных шахт.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Коршунов, Г. И. Разработка способа снижения выделения респираторной фракции пыли в атмосферу разреза за счет рекультивации пылящих источников / Г. И. Коршунов, А. А. Спицын, В. А. Баженова // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 6. – С. 27-32. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-27-32. – EDN PFNLEZ.

2. Коршунов, Г. И. Применение метода снижения запыленности в угольных шахтах / Г. И. Коршунов, А. А. Спицын, Н. А. Онегов, С. И. Фитерман // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 250-255. – EDN: FOIDFN.

3. Корнев, А. В. Повышение безопасности труда работников угольных шахт по пылевому фактору на основе использования гидрогеля / Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_5.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Корнев, А. В. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции / Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И., Баженова В. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 133–149. DOI:10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.

5. Корнев, А. В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах / Корнев А. В. Спицын А. А., Займенцева Л. А., Зубко М. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 180–198. DOI:10.25018/0236_1493_2023_91_0_180.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683904 Российская Федерация. Программа для расчета комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты: № 2023681925: заявл. 24.10.2023: опубл. 10.11.2023 / А. В. Корнев, К. А. Кольвах, **А. А. Спицын**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».



угольной пылью при $P_t = 19,9 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$



пылью при разной интенсивности пылеотложения



а) общий вид; б) схема; 1 – деревянный короб, облицованный изнутри эквивалентным материалом; 2 – вентилятор «DEVENT LT 160»; 3 – место установки загрузочного устройства для подачи угольной пыли; 4 – пылесборник; 5 – входные отверстия для гибких трубок аспиратора; 6 – четырехканальный аспиратор «АПВ-4»

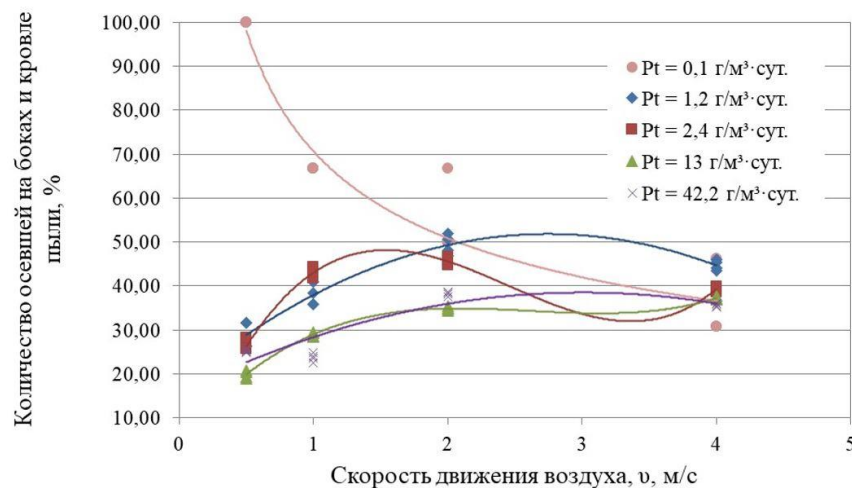


Рисунок 4 – Зависимость количества пыли, осевшей на боках и кровле модели выработки, от скорости движения воздуха при различных значениях интенсивности пылеотложения

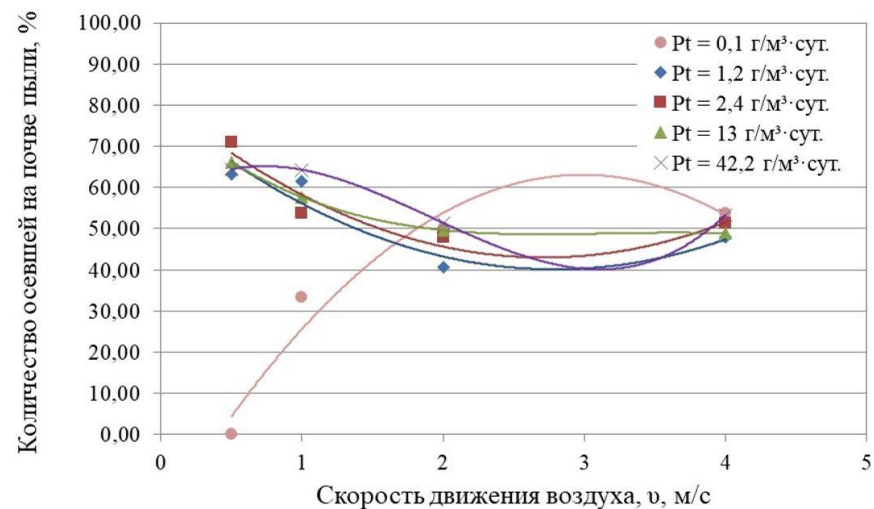
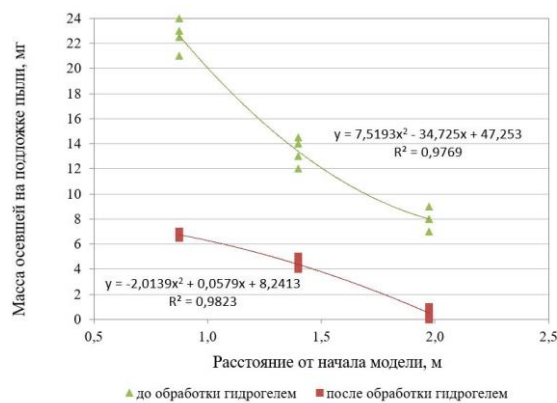
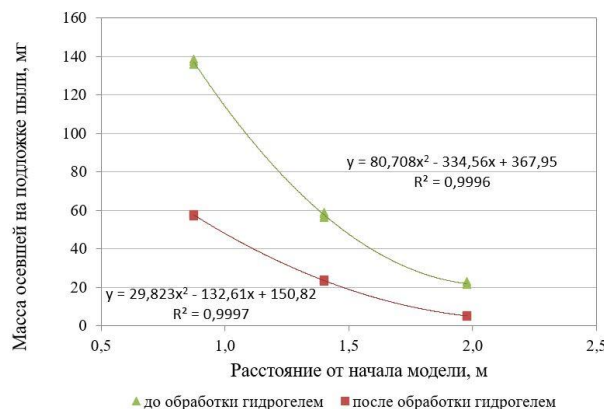


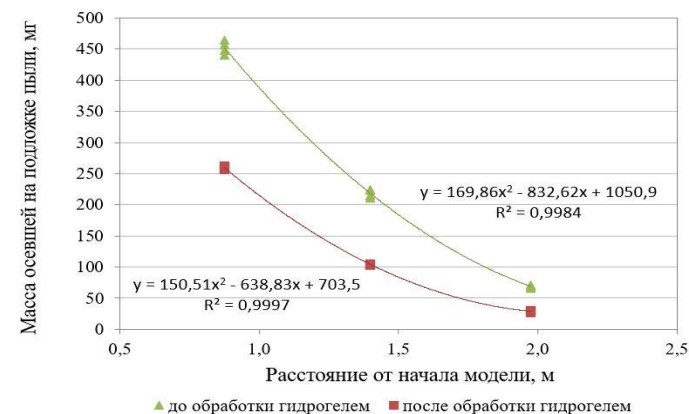
Рисунок 5 – Зависимость количества пыли, осевшей на почве модели выработки, от скорости движения воздуха при различных значениях интенсивности пылеотложения



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Зависимость массы пыли, осевшей на почве модели выработки, от расстояния и обработанности стенда гидрогелем: а) при $P_t = 2,4$ г/м³·сут.; б) при $P_t = 13,0$ г/м³·сут.; в) при $P_t = 42,2$ г/м³·сут.