

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Спицын Андрей Александрович



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

Специальность 2.10.3. Безопасность труда

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Коршунов Г.И.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ	11
1.1 Производственный травматизм, обусловленный взрывами угольной пыли	11
1.2 Профессиональные заболевания вследствие воздействия пылевого фактора..	16
1.3 Методы оценки профессиональных рисков, связанных с пылевым фактором	19
1.4 Анализ эффективности применяемых средств пылевзрывозащиты.....	23
1.5 Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОГЕЛЯ КАК СРЕДСТВА ПЫЛЕВЗРЫВОЗАЩИТЫ И СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ	33
2.1. Выбор состава гидрогеля.....	33
2.2 Оценка безопасности гидрогеля по воздействию на человека и окружающую среду	38
2.3 Исследование пожаровзрывобезопасности гидрогелей.....	41
2.4 Определение физических, влагоудерживающих и пылезакрепляющих характеристик гидрогеля	44
2.5 Исследование кинетики высыхания гидрогеля в смеси с угольной пылью	49
2.6 Выводы по главе 2.....	57
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВИТАНИЯ, ПЫЛЕОСАЖДЕНИЯ И ПЫЛЕЗАКРЕПЛЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	58
3.1 Факторы, определяющие взрывчатость угольной пыли	58
3.2 Теоретические исследования пылевой динамики.....	60
3.3 Анализ параметров пылеотложения на шахтах Кузбасса.....	65

3.4 Стендовые исследования пылеосаждения по длине выработки	68
3.5 Исследование процессов пылезакрепления по длине выработки, обработанной гидрогелем	75
3.6 Выводы по главе 3.....	80
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ	82
4.1 Натурные испытания эффективности применения гидрогеля в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс»	82
4.2 Параметры, техника и технология нанесения гидрогеля на поверхность горной выработки.....	89
4.3 Оценка снижения профессиональных рисков при замене сланцевой пыли гидрогелем	93
4.4 Техничко-экономическое обоснование разработанных мероприятий	100
4.5 Выводы по главе 4.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ В Протокол испытаний по определению температуры воспламенения	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Протокол испытаний по определению температуры самовоспламенения.....	126

ВВЕДЕНИЕ

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 ежемесячно 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 г/м³·сут до 13,0 г/м³·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 по пунктам:

– Разработка научно-обоснованных методов анализа и прогнозирования параметров состояния производственной среды, опасных ситуаций и опасных зон.

– Изучение физических, химических, биологических и социально-экономических процессов, определяющих условия труда, установление взаимосвязей с вредными и опасными факторами производственной среды.

– Разработка научных основ, установление области рационального применения и оптимизация способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов.

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 выдачи свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683904 от 10 ноября 2023 года (Приложение А);
- 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) (Приложение Б).

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,

депремометрический 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 «Севергеозкотех-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, вызванных воздействием пылевых аэрозолей на работников угольных шахт; проведении теоретических исследований пылевой динамики в подземных 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 (пункты списка литературы № 46 – 48, 55 – 56), 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 (Приложение А, пункт списка литературы № 87).

Структура и объем 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ

1.1 Производственный травматизм, обусловленный взрывами угольной пыли

Угольная промышленность в нашей стране играет важную роль в топливно-энергетическом комплексе и в экономике страны в целом. Сегодня Россия занимает 6 место по объемам добычи угля (4,8% объема мировой угледобычи) после Китая, США, Индии, Австралии и Индонезии. Ее значимость подтверждается ресурсным потенциалом и вкладом в энергетическую политику страны [20,127].

На территории нашей страны по данным за 2024 год расположены 56 шахт и 134 разреза. По отчётам Министерства энергетики Российской Федерации, запасы угля в стране на конец 2024 года составили более 275 млрд. тонн, а добыча угля за весь 2024 год составила 443,5 млн. тонн [67,68,99]. Рост подземной добычи угля обеспечивается за счет закрытия нерентабельных шахт и концентрации горных работ на одном шахтопласте с увеличением длины лавы до 350 м и более, выемочного столба до 2 км и увеличением среднесуточных нагрузок до 5-5,5 тыс. тонн и максимальных нагрузок до 50 тыс. тонн и более [62,68]. Нарращивание объемов угледобычи сопровождается увеличением глубины ведения работ с ухудшением горно-геологических условий и обострением газового (метанового) и пылевого факторов, которые повышают риски возникновения аварийных ситуаций с травмированием персонала. Применение современных технических и технологических решений, а также высокопроизводительного шахтного оборудования приводит к ухудшению пылевой обстановки, связанной с повышением концентрации взвешенной пыли в горных выработках, ростом интенсивности пылеотложения и изменением дисперсного состава пылевого аэрозоля.

Угледобывающая отрасль демонстрирует устойчивую значимость, сохраняя лидирующие позиции в структуре топливно-энергетического комплекса. Несмотря на заметный рост использования природного газа (23,2%) и

возобновляемых источников энергии (9,3%) в мировом производстве электроэнергии, уголь остается доминирующим энергоносителем с долей 38%, что обуславливает его ключевую роль в обеспечении энергетической безопасности и стабильности мировой экономики [69,127].

В рамках реализации программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года, утвержденной правительством РФ, по оптимистичному сценарию объем добычи угля подземным и открытым способом планируется увеличить до 668 млн. тонн [56,65]. Для достижения этих показателей потребуются закрытие большинства нерентабельных и наиболее «опасных» шахт, а также повысить интенсивность ведения работ.

При сохранении общей тенденции к росту, суммарный объем добычи угля в 2025 году составит порядка 450 млн. тонн, что говорит о серьёзных намерениях к достижению отметки в 668 млн тонн к 2035 году.

Из рисунка 1.1 видно, что процесс снижения добычи угля в нашей стране не рассматривается и тенденции к росту и достижению отметки в 668 млн.тонн вполне реальны. За последние 5 лет (кроме 2020 г.) добыча угля достигла отметки в 430 млн. тонн в год, что говорит о достаточно высокой угледобыче.

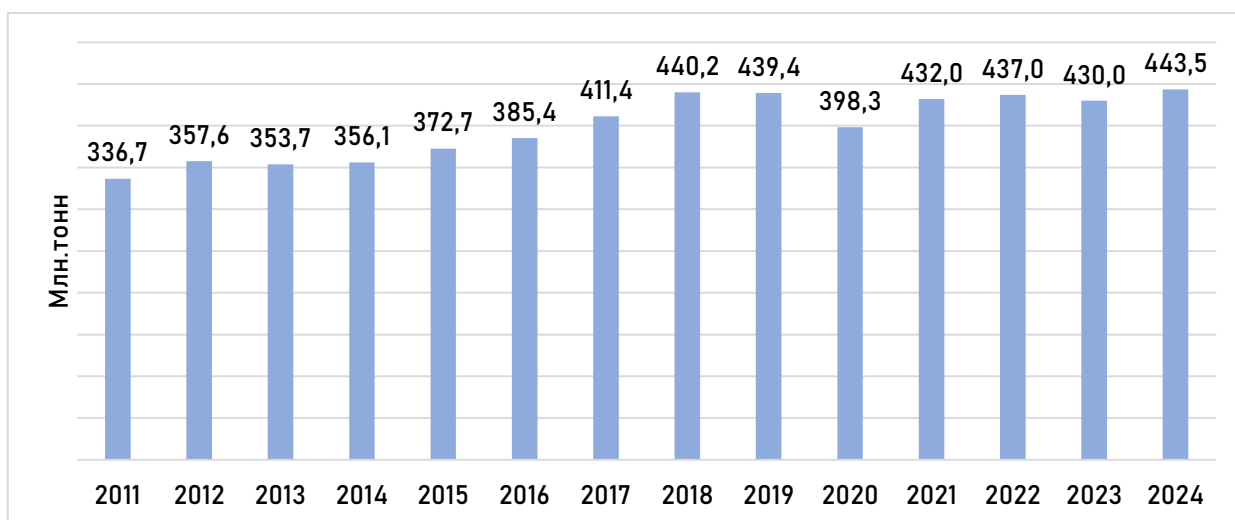


Рисунок 1.1 – Статистика добычи угля в Российской Федерации [62]

Учитывая прогноз до 2030 г. (рисунок 1.2), можно констатировать факт, что рост угледобычи подземным способом увеличится как минимум на 20 млн. тонн по сравнению с 2020 годом и на 60 млн. тонн - по сравнению с 2016.



Рисунок 1.2 – Объем добычи угля по способам в РФ (с прогнозом до 2035 г.)
[62,65]

В последние годы увеличение объемов и дисперсности взрывоопасной угольной пыли в горной отрасли России представляет серьезную угрозу для безопасности труда и здоровья работников. Эта проблема требует особого внимания и комплексных мер по снижению риска возникновения аварийной ситуации [74,89]. Разработанные меры и технические решения [3,4,25,58,88,117], направленные на уменьшение образования угольной пыли, не исключают вероятность взрыва.

На взрыв угольной пыли влияют некоторые факторы, а именно: концентрация угольной пыли в воздушной среде выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), наличие окислителя (кислорода) в концентрации достаточной для поддержания горения, нахождение угольной пыли во взвешенном (аэрозольном) состоянии, ограниченность пространства и источник воспламенения.

Согласно проведенному анализу, интенсивность пылевыведения и пылеотложения в горных выработках большинства шахт Кузбасса и Воркуты может достигать $120 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ и линейно уменьшаться по мере удаления от лавы [22], тем самым особое внимание стоит уделять обработке горных выработок составами, обеспечивающими их пылевзрывобезопасное состояние, не только ежедневно, но и многократно в течение суток [60]. При этом, чем выше интенсивность пылеотложения и концентрация метана в воздухе горной

выработки, тем чаще необходимо проводить обработку. С учетом того, что все шахты, расположенные на территории Кузбасса и составляющие основу сырьевой базы подземной угледобычи являются опасными по газу и взрывчатости угольной пыли [95], дальнейшее наращивание интенсивности ведения горных работ приведет к обострению и без того сложной ситуации по газовому и пылевому фактору.

Взрывы метана, а также метана и угольной пыли являются, к сожалению, не редкостью [31,39,51,127]. На рисунке 1.3 приведены примеры крупных аварий, связанных со взрывами угольной пыли и газа, произошедших на шахтах в XX-XXI столетиях, каждая из которых унесла многие шахтерские жизни [30,59,96,120,132].



Рисунок 1.3 – Количество погибших из-за взрывов угольной пыли и метана [46,60]

В 2007 году произошла одна из самых масштабных аварий современности с участием угольной пыли на шахте «Ульяновская» - погибло 110 человек. В

ноябре 2021 года на шахте «Листвяжная» в Кузбассе прогремел взрыв метана, в результате которого погибло 46 горняков, 5 горноспасателей, еще 106 работников получили травмы различной степени тяжести [46,52]. Самой же многочисленной по жертвам аварией, связанной со взрывом угольной пыли считается катастрофа на шахте «Курьер» (Франция) в 1906 году, где погибло 1099 человек. Можно с уверенностью сказать, что приведенные данные свидетельствуют о существовании ряда проблем в обеспечении пылевзрывобезопасности в угольных шахтах [33,52,60,63,115].

В качестве сравнения можно привести данные по угольной промышленности США: за последние 13 лет на угольных шахтах Америки не было зафиксировано ни одной крупной аварии из-за взрыва угольной пыли. Это говорит о том, что проблемам взрывоопасности в шахтах США уделяется большое внимание, в частности, за счет применения инновационных средств пылевзрывозащиты.

Приведенная статистика свидетельствует о том, что задачи по повышению пылевзрывобезопасности решены в неполной мере и сегодня. Травматизм, обусловленный воздействием на работников избыточного давления и отравляющих продуктов взрывов метана и угольной пыли, является наиболее тяжелым. Кроме того, высокая запыленность в горных выработках, многократно превышающая предельно-допустимую концентрацию (ПДК), не только повышает риск взрыва пыли, но и вызывает развитие профессиональных заболеваний нижних дыхательных путей и легких [7,19,24,28,92,93,110]. Актуальны и вопросы оценки и снижения аэрологических рисков как в России [6,104], так и в других угледобывающих странах [98,113]. Обеспечение пылевзрывобезопасности и аэрологической безопасности в угольных шахтах является одной из ключевых задач современных систем управления охраной труда и промышленной безопасностью (СУОТ и СУПБ).

Высокие показатели аварийности и травматизма на угольных шахтах, связанных с пылевым фактором, свидетельствуют о необходимости

совершенствования подходов к обеспечению пылевзрывобезопасности при ведении подземных горных работ.

1.2 Профессиональные заболевания вследствие воздействия пылевого фактора

Стратегической целью предприятий угледобывающей отрасли является интенсификация производственных мощностей, однако достижение данной цели невозможно без создания безопасных условий труда. Согласно проведенному анализу состояния условий труда в различных секторах экономики РФ, установлено, что 36,1% работников осуществляют трудовую деятельность на работах с вредными и (или) опасными условиями. В структуре промышленного производства угольная отрасль лидирует по числу работников, ежедневно сталкивающихся с опасными и вредными условиями труда. Согласно статистике почти 80% сотрудников угледобывающих предприятий (а точнее 79,2 %) работают в зонах с повышенными производственными рисками (рисунок 1.4). Среди основных негативных факторов, характерных для угольных шахт и разрезов выделяются: шум (47,4%), тяжесть трудового процесса (57,7%), аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (АПФД) (36,3%) (рисунок 1.5.) [9,10,82,100,116].

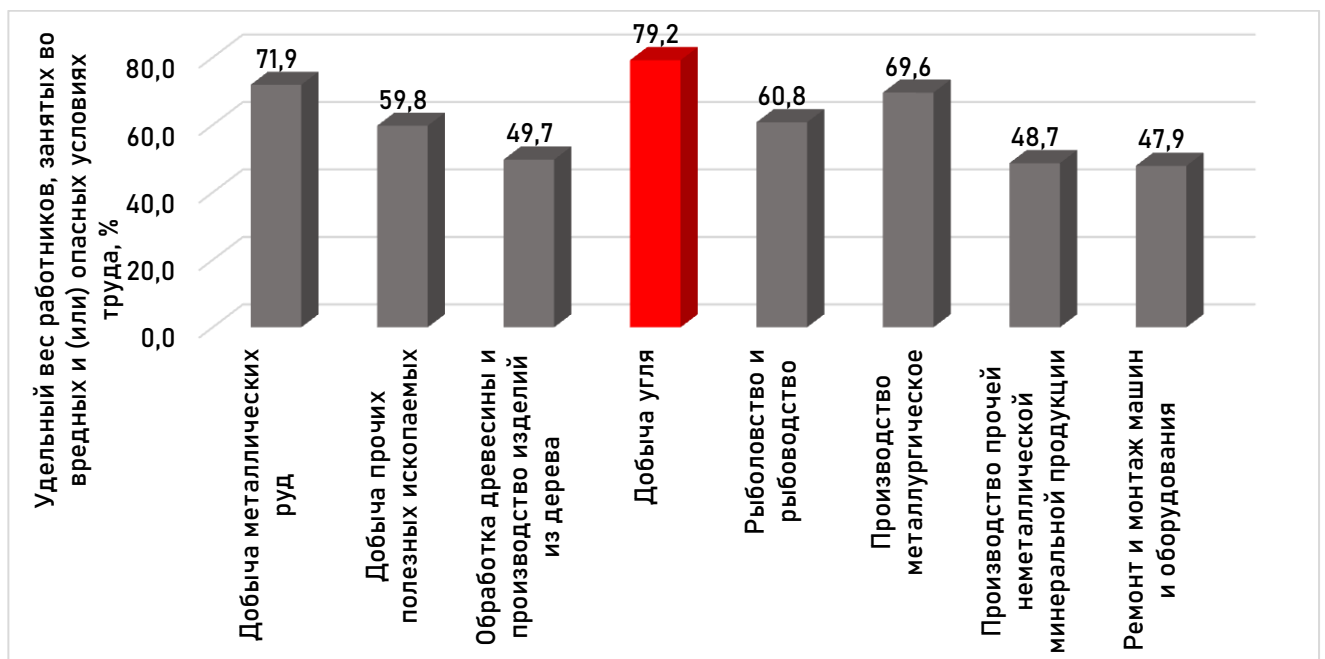


Рисунок 1.4 – Доля работников, занятых на работах с вредными условиями труда в 2023 г. [82]

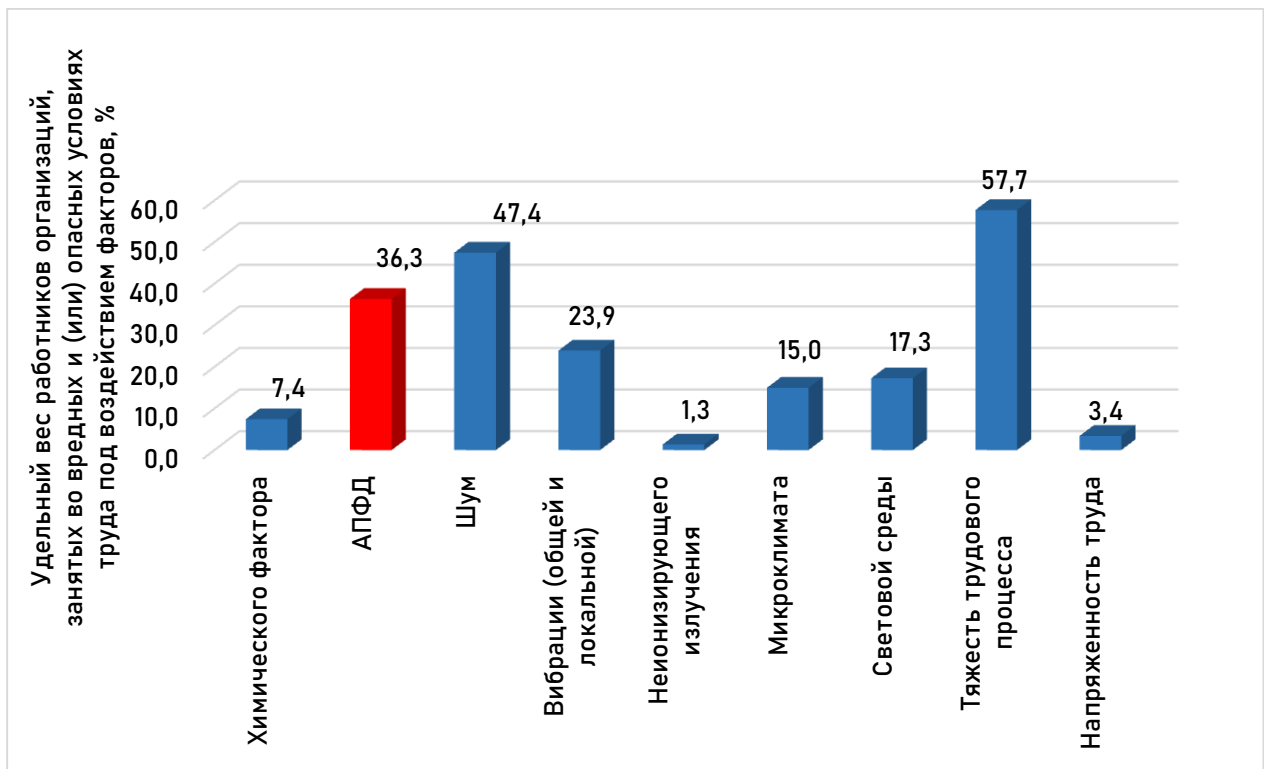


Рисунок 1.5 – Удельный вес персонала, работающего под воздействием вредных производственных факторов [82]

Исходя из приведенных данных, становится очевидным, что угольная отрасль создает для своих работников наиболее тяжелые и опасные условия труда, значительно повышающие риск потери здоровья задолго до наступления пенсионного возраста. Фактически, шахтеры и сотрудники разрезов ежедневно сталкиваются с такими воздействиями, которые со временем подрывают их работоспособность, приводя к хроническим заболеваниям, травмам и досрочной утрате возможности работать. Это ставит угольную промышленность в особую категорию отраслей, где защита здоровья и труда персонала требует первоочередного внимания.

Основным видом профзаболеваний, связанных с воздействием угольной пыли на организм человека, являются заболевания лёгких, представленные в основном пневмокониозами, хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ) и пылевыми бронхитами – 69,56% от общего числа [82].

В 2023 году официально в угольных шахтах Кузбасса зафиксировано 31 профессиональное заболевание, вызванное воздействием АПФД (рисунок 1.6). Данная статистика наглядно демонстрирует, что даже при современных мерах

защиты риск профессиональных патологий в угледобыче остается довольно высоким.

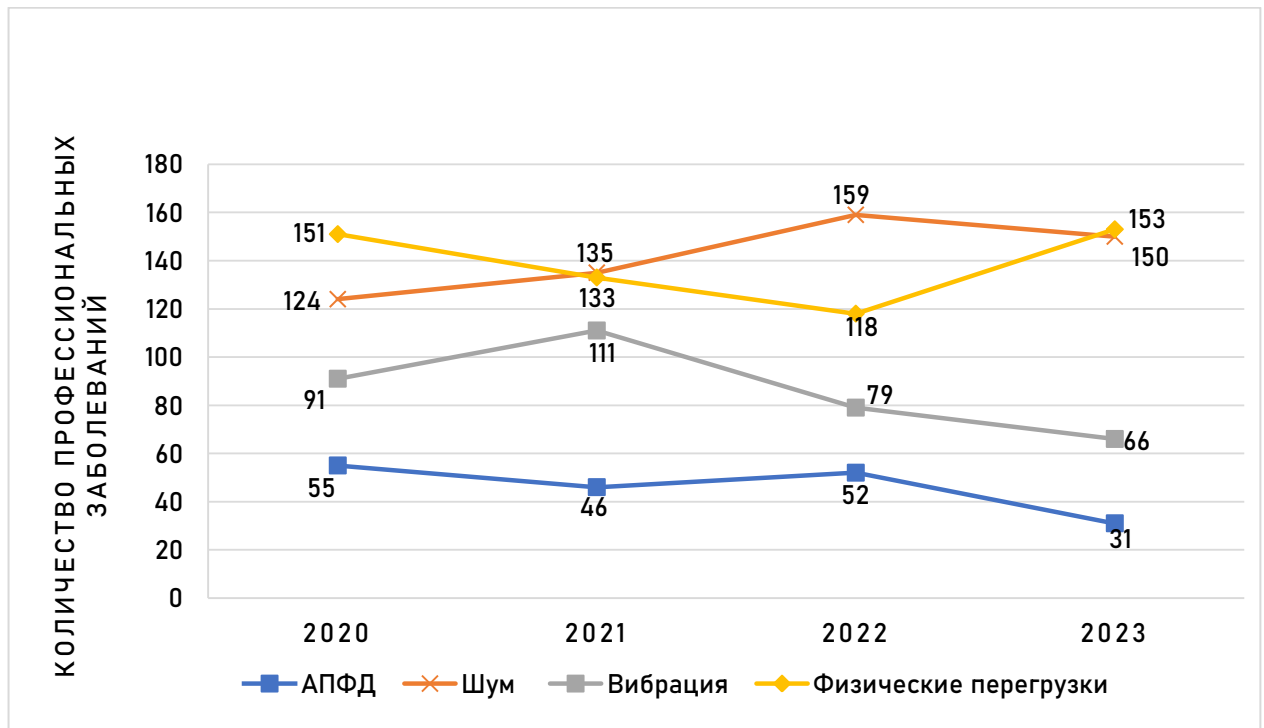


Рисунок 1.6 – Распределение случаев профзаболеваний работников угольных шахт Кузбасса по производственным факторам [82]

Патологии дыхательных путей у шахтеров по частоте возникновения уступают только болезням, развивающимся вследствие чрезмерных физических нагрузок, воздействия вибрации и повышенного уровня шума. Первопричины несоответствия рабочих мест установленным нормативам кроются в технологическом несовершенстве производственных циклов и использовании устаревшего технического оснащения. Согласно исследованиям ученых [17,27,36,40,57,71,100-103,106], персонал угольных шахт предприятий подвергается особому профессиональному риску. Наибольшую угрозу для здоровья представляют: эксплуатация изношенного горного оборудования при несоблюдении сроков технического обслуживания, недостаточный мониторинг санитарно-гигиенических показателей воздушной среды, нерегулярное проведение или низкая эффективность мероприятий по пылеподавлению, а также форсированные темпы угледобычи. Совокупное воздействие указанных факторов

создают экстремальные условия труда, для улучшения которых требуются комплексные меры по модернизации технологических процессов.

В период с 1968 по 2014 год на шахтах США погибло около 76 тысяч человек, имеющих большой подземный стаж и у которых был диагностирован пневмокониоз [107]. По данным исследований Национального института безопасности и здоровья труда США (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) с 1999 по 2016 год число смертей, вызванных пневмокониозом у шахтеров, снизилось на 73% - с 409 до 112 случаев [122], что свидетельствует о высоком внимании к условиям ведения подземных горных работ и эффективности мероприятий по борьбе с профессиональными заболеваниями на угольных шахтах Америки.

Высокие показатели профессиональной заболеваемости вследствие воздействия АПФД подтверждают выводы о необходимости совершенствования мероприятий комплексного обеспыливания и пылевого контроля.

1.3 Методы оценки профессиональных рисков, связанных с пылевым фактором

Основными видами профессиональных рисков, связанных с пылевыми аэрозолями и отложившейся угольной пылью являются: 1) риск возникновения профессионального заболевания органов дыхания (силикозы, антракозы, хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) и т.д.); 2) риск травмирования персонала в случае взрыва угольной пыли [2,5,16,28,37,38]. На сегодняшний день в угольной отрасли отсутствует системный анализ профессиональных рисков, связанных с вдыханием фиброгенной пыли (АПФД), которая постепенно разрушает здоровье шахтеров. Однако действующие нормы предусматривают расчет пылевой нагрузки на основе данных специальной оценке условий труда (СОУТ). Фактически, сегодняшний подход сводится к двум основным показателям: 1) фактическая пылевая нагрузка – количество частиц, которое вдыхает работник за смену; 2) контрольно-допустимая пылевая нагрузка – максимально разрешенная концентрация, при которой организм сможет восстанавливаться.

Значение пылевой нагрузки рассчитывает общую массу вредных пылевых частиц, осевших в легких работника за все годы его трудовой деятельности, и определяется по формуле (1.1) [51]:

$$\text{ПН} = K_{\text{cc}} \cdot N \cdot T \cdot Q, \quad (1.1)$$

где K_{cc} – фактическая среднесменная концентрация пыли в зоне дыхания работника, мг/м³,

N – число рабочих смен, отработанных в календарном году,

T – количество лет контакта с угольной пылью,

Q – объем воздуха, проходящего через легкие работника в течение смены, м³, который зависит от категории тяжести работ [6,84,86].

Расчет контрольной пылевой нагрузки (КПН) проводится по формуле (1.2) [51]:

$$\text{КПН} = \text{ПДК}_{\text{cc}} \cdot N \cdot T \cdot Q, \quad (1.2)$$

В условиях повышенной запыленности на угольных предприятиях рациональным подходом становится метод временного ограничения профессионального контакта с вредным фактором, суть которого заключается в расчете максимально допустимой продолжительности трудовой деятельности (стажа работы) T_1 в конкретных условиях при использовании контрольно-пылевой нагрузки за 25-летний рабочий стаж (1.3) [84,85]:

$$T = \frac{\text{КПН}_{25}}{K_{\text{cc}} \cdot N \cdot Q} \quad (1.3)$$

Некоторыми учеными [39,51] предложены методики по определению риска профзаболевания, в частности, В.В. Ткачевым разработан интегральный показатель расчета риска профзаболевания в результате воздействия АПФД, рассчитываемый по формуле (1.4) [51]:

$$R = 8,6 \cdot X_1 + 6,0 \cdot X_2 + 19,4 \cdot T \cdot L_1 + 6,4 \cdot K \cdot L_2 \cdot L_3 \quad (1.4)$$

X_1 – возраст рабочего, годы,

X_2 – общий стаж его профессиональной деятельности, годы,

T – стаж профессиональной трудовой деятельности, когда работник был задействован в работе с пылью, годы,

K – средневзвешенное содержание пыли в воздухе рабочей зоны, $\text{мг}/\text{м}^3$,

L_1 – коэффициент, учитывающий содержание свободного диоксида кремния (составляет от 0,6 до 1,2),

L_2 – коэффициент, учитывающий дисперсный состав частиц вдыхаемой пыли, ее минеральный состав и концентрацию в воздухе рабочей зоны (составляет от 0,8 до 2,3),

L_3 – коэффициент, учитывающий тяжесть труда и связанный с этим объем легочной вентиляции (составляет от 1,1 до 1,8).

Полученный результат интегрального показателя R сравнивают с табличным значением (таблица 1.1) и определяют риск (вероятность) заболевания.

Таблица 1.1 – Риск заболевания в зависимости от полученного результата интегрального показателя R [51]

Балловый показатель	1000-1150	1151-1200	1201-1250	1251-1300	1301-1350	1351-1400	1401-1450	1451-1500	1501-1550	1551-1600	1601-1700
Величина риска в %	До 2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90

В диапазоне $R = 1000-1150$ вероятность профессиональных заболеваний не превышает 2%, что соответствует минимальному уровню риска. При превышении значения $R = 1150$ отмечается возрастание профессионального риска, при этом каждые последующие 50 единиц прироста приводят к 10%-ному увеличению вероятности возникновения патологии [83].

Оценка риска аварии и сопутствующего травматизма работников угольных шахт в случае взрыва угольной пыли чаще всего проводится на основании экспертной оценки [83]. Оценку риска аварий на угольной шахте рекомендуется выполнять один раз в год или в случае изменения горно-геологических, технологических или горнотехнических условий ведения горных работ.

Оценка риска аварии на угольной шахте проводится с учетом факторов, влияющих на вероятность аварии, и значимости этих факторов, учитываемой

посредством индекса опасности аварии (ИОА). Также учитываются фактические данные за предшествующий год, в случае возникновения аварии на шахте (за последние три года), учитываются количество погибших и травмированных. Риск аварий, обусловленный человеческим фактором, определяется по формуле (1.5) [83]:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m r_{0(i)}}{\sum_{i=1}^m r_{0(i)}^{max}} \cdot 100 \quad (1.5)$$

где R_0 – показатель опасности (риска) аварий, обусловленный субъективным (человеческим) фактором,

$r_{0(i)}$ – индекс опасности аварии i -го фактора в блоке субъективного (человеческого) фактора,

$r_{0(i)}^{max}$ – максимальное возможное значение индекса опасности аварии i -го фактора в блоке субъективного (человеческого) фактора,

m – количество факторов в блоке субъективного (человеческого) фактора.

По каждому блоку факторов оценивается показатель опасности (риска) аварии, как отношение суммы индексов опасности аварий по блоку факторов к сумме максимально возможных индексов опасности аварий по данному блоку факторов с учетом субъективного (человеческого) фактора (1.6) [83]:

$$R_x = \frac{\sum_{i=1}^n r_{x(i)} + \sum_{i=1}^m r_{0(i)}}{\sum_{i=1}^n r_{x(i)}^{max} + \sum_{i=1}^m r_{0(i)}^{max}} \cdot 100 \quad (1.6)$$

где R_x – показатель опасности (риска) аварии,

$r_{x(i)}$ – фактический индекс опасности аварии i -го фактора,

$r_{x(i)}^{max}$ – максимально возможное значение индекса опасности аварии i -го фактора,

n – количество факторов.

Интегральный показатель опасности (риска) аварий на шахте определяется с учетом совокупности показателей опасности (риска) аварий всех видов как отношение суммы фактических индексов опасности аварий по всем блокам факторов аварий к сумме максимально возможных индексов опасности аварии по всем блокам факторов с учетом субъективного (человеческого) фактора (1.7) [83]:

$$R^{int} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^n r_{x(i)} + \sum_{i=1}^m r_{0(i)}}{\sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^n r_{x(i)}^{max} + \sum_{i=1}^m r_{0(i)}^{max}} \cdot 100 \quad (1.7)$$

где R^{int} – интегральный показатель опасности (риска) аварий,

k – количество блоков факторов (видов аварий, принимается $k = 8$).

Снижение пылевых нагрузок и повышение надежности пылевзрывозащиты за счет применения инновационных средств позволит снизить риски профессиональных заболеваний и травмирования персонала угольных шахт соответственно.

1.4 Анализ эффективности применяемых средств пылевзрывозащиты

На шахтах, разрабатывающих пласты угля, опасные по взрывам пыли, должны осуществляться мероприятия по предупреждению и локализации взрывов пыли, включая [34]:

- применение инертной пыли (сланцевая пылевзрывозащита);
- использование воды (гидропылевзрывозащита);
- применение инертной пыли и воды (комбинированная пылевзрывозащита).

Выбор способов и средств предупреждения и локализации взрывов пыли (таблица 1.2) должен осуществляться с учетом особенностей ведения горных работ и интенсивности пылеотложения в подземных горных выработках.

Таблица 1.2 – Способы пылевзрывозащиты горных выработок [34,53,54,87]

Способы пылевзрывозащиты	Выработки	Условия применения
		Интенсивность пылеотложения, $\text{г/м}^3 \cdot \text{сут.}$
1	2	3
Осланцевание	Выработки без капежа и скоплений воды	Независимо от интенсивности пылеотложения
Побелка	Откаточные выработки Капитальные выработки Вентиляционные выработки	$< 0,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$
Обмывка		$< 1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$
		$\geq 1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$
Связывание смачивающе-связующим составом		$\geq 1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$

Осланцевание является самым распространенным и основным способом защиты горных выработок, применяемым для предотвращения взрывов угольной

пыли за счет искусственного увеличения ее зольности при внесении инертной пыли. Основной механизм действия инертной пыли заключается в поглощении теплового импульса и разрыве химических реакционных цепочек при создании пылевого облака [89,123].

Осланцевание применяется как в России [90,97,109], так и зарубежом [75,111,112,121,128]. Для надежной пылевзрывозащиты требуется проведение корректного расчета количества инертной пыли на 1 п.м. горной выработки; определение периодичности нанесения инертной пыли; соблюдение требуемого расхода; организация контроля за качеством осланцевания горных выработок.

Количество инертной пыли (расход) для осланцевания 1 п.м выработки $q_{осл}$, кг/м и годовой расход на осланцевание выработки $Q_{осл}$, т/год определяют по формулам 1.8, 1.9 [34,47]:

$$q_{осл} = \frac{0,001 \cdot N \cdot \sigma_{отл} \cdot S}{100 - N}, \quad (1.8)$$

$$Q_{осл} = 10^{-3} \cdot q_{осл} \cdot L \cdot \frac{t_э}{T_{п}}, \quad (1.9)$$

где: N – норма осланцевания выработки, %,

$\delta_{отл}$ – нижний предел взрываемости отложившейся угольной пыли, г/м³,

S – площадь поперечного сечения выработки, м²,

$t_э$ – количество дней эксплуатации выработки за год, сут./год,

L – длина подземной горной выработки, м,

$T_{п}$ – периодичность проведения осланцевания, сут.

Показатель N отражает такое содержание негорючих веществ в инертно-угольной пылевой смеси, при котором ее взрыв невозможен (1.10) [47]:

$$N = \frac{A^{daf} \cdot (100 - D)}{100} + D, \quad (1.10)$$

где A^{daf} – зольность угля, %,

D – добавка инертной пыли, %.

Нижний предел взрываемости ($\delta_{отл}$, г/м³) и добавка инертной пыли (D , %) определяются исходя из зольности угля (A^{daf} , %) и выхода летучих веществ (V^{daf}) по номограммам, представленным в [34].

Расход инертной пыли для нейтрализации взрывчатых свойств пыли определяется взрывчатостью угольной пыли (степенью метаморфизма, влажностью и зольностью угля) и на 1 кг угольной пыли должен составлять (без учета природной зольности отбиваемого угля) при норме осланцевания: 60% - 1,5 кг инертной пыли, 75% - 3 кг инертной пыли, 80% - 4 кг инертной пыли, 86% - 6 кг инертной пыли, 89% - 8 кг инертной пыли. Величина добавки инертной пыли зависит от содержания уже имеющихся в угле минеральных веществ, летучих соединений и определяется по специальной номограмме [78].

Для шахт Кузбасса норма осланцевания составляет 87-89 %. Для сравнения, в угольных шахтах США данный показатель варьируется в пределах от 65% до 80%, Австралии – от 70% до 85%, Чехии – от 80% до 85%. В ЮАР норма осланцевания составляет от 50 до 75% в зависимости от выхода летучих веществ в угольной пыли (таблица 1.3) [1,46, 112].

В угольных шахтах ЮАР угли с выходом летучих веществ более 14% считаются взрывоопасными, с выходом менее 14% неопасные. Таким образом, расход инертной пыли на осланцевание в России заметно ниже по сравнению с указанными угледобывающими странами [1].

Таблица 1.3 – Требования к содержанию негорючей сланцевой пыли, %, при осланцевании выработок [1]

Уголь с выходом летучих веществ, %	Минимальное содержание негорючей сланцевой пыли в осевшей пыли. %
14-20	50
20-22	55
22-25	60
25-27	65
27-30	68
30-32	70
32-35	72
Свыше 35	75

Взрывоопасное количество витающей и осевшей угольной пыли вблизи забоев – источников образования пыли непрерывно накапливается за сутки, смену, так что поверх инертной пыли всегда имеется слой осевшей

тонкодисперсной угольной пыли. В таких условиях взрывозащитные свойства инертной сланцевой пыли резко снижаются, а в случаях накопления взрывоопасного количества угольной пыли - полностью исключаются.

Этот недостаток осланцевания выработок усугубляется при внедрении на шахтах комплекса обеспыливающих мероприятий, основанных на применении воды (секционного и комбайнового орошения, водяных и туманообразующих завес), так как увеличение влажности шахтного воздуха снижает гидрофобные свойства инертной пыли и приводит к ее слеживаемости, ухудшая «взрывозащитный эффект». Осланцевание не способствует снижению концентрации взвешенной в воздухе выработок углепородной пыли, а наоборот при передвижении людей по осланцованным выработкам запыленность воздуха составляет около $240-300 \text{ мг/м}^3$, а в процессе осланцевания при скорости движения воздуха свыше 2 м/с – $2000-6000 \text{ мг/м}^3$, что в сотни раз превышает допустимые нормы [78]. Тот факт, что инертная пыль изготавливается из природного материала – известняка или доломита, и является по сути экологичным средством пылевзрывозащиты, не делает ее безопасной для вдыхания работниками. Попадание в воздушную струю шахтной вентиляционной сети гидрофобизированных частиц карбоната кальция создает дополнительную пылевую нагрузку на органы дыхания горняков, ухудшает видимость (особенно в период проведения осланцевания и в течение некоторого времени после него), отрицательно сказывается на работе машин и механизмов, повышая степень их износа и приводя к преждевременному ремонту. Операция загрузки инертной пыли на внутришахтный транспорт и подача ее в осланцеватель характеризуется повышенной тяжестью труда. Проведение осланцевания вручную, что нередко практикуется на шахтах вследствие невозможности механизации процесса во всех горных выработках, предполагает еще большее увеличение физической нагрузки на работников.

Для механизации работ по осланцеванию применяют различные виды осланцевателей различных производств (рисунок 1.7, 1.8).



Рисунок 1.7 – Осланцеватели производства Польши: а) осланцеватель DROMADER, б) осланцеватели типа SMYK [46]



Рисунок 1.8 – Осланцеватели производства России: а) осланцеватель ОПШ-01; б) осланцеватель типа УО; в) осланцеватель типа ОГ-1 «БУРАН»; [46]

Малогабаритные осланцеватели типа SMYK и DROMADER оснащаются стандартными рукавами для осланцевания, которые могут быть соединены между собой в более длинные сети, обеспечивающие максимальную дальность подачи инертной пыли на расстояние до 1 км. Осланцеватели типа DROMADER производительностью от 49 кг/мин. до 250 кг/мин. при длине рукава 1000 м и 180 м соответственно вмещают до $0,3 \text{ м}^3$ инертной пыли и могут быть установлены как стационарно, так и на подвесных локомотивах. Осланцеватель ОПШ-01 предусматривает подачу осланцевочного материала через рукава длиной 20 метров с производительностью 35-40 кг/мин. и может транспортироваться по почве выработок грузоподъемными устройствами либо подвесными гидравлическими подъемниками или тележками на монорельсе грузоподъемностью 4 тонны. Осланцеватели типа УО рассчитаны на объем $0,9\text{--}2,5 \text{ м}^3$, оснащаются вентиляторами ВМЭ-5 и ВМЭ-6 с номинальной подачей 3,65 и $7 \text{ м}^3/\text{с}$. Осланцеватель типа ОГ-1 «БУРАН» предназначен для осланцевания горных выработок с площадью сечения до 25 м^2 с подачей инертной пыли от 120 до 300 кг за одну минуту на расстояние до 43,6 км. Данный вид оборудования

является крупногабаритным – имеет размеры 1390×4190×1370 мм, вмещает 2,5 м³ инертной пыли.

Таким образом, применение инертной пыли в качестве средства пылевзрывозащиты, с одной стороны, позволяет предупредить взрывы угольной пыли при соблюдении графика и нормы нанесения, с другой – увеличивает риски травмирования работников и развития осложнений с органами дыхания. При отклонении от порядка и периодичности обработки выработок инертной пылью возрастают риски взрывов угольной пыли и травмирования работников.

Для обеспечения пылевзрывозащиты капитальных выработок с низкой интенсивностью пылеотложения (менее 1,2 г/м³·сут.) проводится их побелка цементно-известковым раствором. Помимо побелки и осланцевания для обеспечения пылевзрывобезопасности в некоторых выработках проводят их обмывку или обработку смачивающе-связывающими составами. После обмывки угольная пыль увлажняется до достижения уровня поверхностной влажности не менее 12%, после чего систематически удаляется.

В шахтных условиях для борьбы с угольной пылью активно используют специальные пылеподавляющие составы, основа которых составляет кальциевая соль, которую обогащают различными добавками [21,23,51] Эффективность этих составов напрямую зависит от микроклиматических параметров. Если относительная влажность воздуха менее 85% оптимальным считается применение 35%-ного раствора CaCl_2 с 2%-ной добавкой ПАВ. В условиях повышенной влажности (свыше 85%) рекомендуется использовать менее концентрированный 25%-ный раствор с уменьшенным до 1% содержанием смачивающего компонента. Нормативные показатели расхода данных составов составляют 0,5 литра на квадратный метр для жидкой формы и минимум 3 кг/ м² [78]. Предложенные смачивающе-связывающие составы на основе хлорида кальция CaCl_2 , были разработаны еще в Советское время и их свойства очень сильно зависят от типа поверхностно-активного вещества. Также данные составы характеризуются высоким расходом компонентов в пересчете на сухое вещество и обладают меньшей гигроскопичностью и временем удержания влаги по

сравнению с современными водными растворами суперабсорбентов (гидрогелями).

Для понимания того, насколько часто необходимо проводить осланцевание, обмывку, нанесение смачивающе-связывающих составов для поддержания выработок во взрывобезопасном состоянии, пользуются следующей формулой (1.11) [47]:

$$T_n = \frac{K \cdot K_{CH_4} \cdot \sigma_{отл.}}{P_t} \quad (1.11)$$

где K – коэффициент, характеризующий продолжительность действия осланцевания, $K=1$,

K_{CH_4} – коэффициент, учитывающий влияние содержания метана в воздухе выработки, $K_{CH_4} = 0,25-0,75$,

$\sigma_{отл.}$ – нижний предел взрываемости отложившейся угольной пыли ($г/м^3$),

P_t – интенсивность пылеотложения, $г/м^3 \cdot сут.$

Минимальная периодичность выполнения работ определяется величиной интенсивности пылеотложения и выбранным способом пылевзрывозащиты (таблица 1.4).

Помимо вышеуказанных способов, известны также исследования по разработке составов вспененной инертной пыли WMX, которые успешно показали себя в натурных экспериментах по предотвращению взрывов угольной пыли. Сухой продукт смешивался с водой и становился еще более объемным в своих размерах, а затем наносился на стенки толщиной в 6 мм. Эффективность применяемого состава довольно высока, но имела ряд недостатков, например, состав мог находиться во влажном состоянии не более 12 часов, а также для нанесения его механизированным способом требовалось высокостоящее оборудование. Также для локализации взрывов пылегазовоздушных смесей устанавливаются водяные, сланцевые заслоны или автоматические средства локализации взрывоподавления, расположение которых определяется инструкцией по аэрологической безопасности [70,78]. Для снижения пылевыноса из очистных забоев на исходящей струе устанавливаются водяные,

туманообразующие или лабиринтно-тканевые завесы, а в самих забоях применяется комбайновое и секционное орошение с добавкой водного раствора шахтного смачивателя [45,49,50].

Таблица 1.4 – Периодичность выполнения работ по предупреждению взрывов угольной пыли [34]

Выработка (участок выработки)	Способ предупреждения взрывов угольной пыли	Периодичность проведения работ
Погрузочные пункты лав, погрузочные пункты из углеспусков, гезенков и скатов, а также участки откаточных штреков на протяжении не менее 25 м в обе стороны от указанных мест	Обмывка/осланцевание	Не реже 1 раза в смену
	Обработка смачивающе-связующим раствором	Не реже 1 раза в пять смен
Участки откаточных выработок на протяжении 25 м в обе стороны от опрокидывателей, участки откаточных штреков, уклонов и бремсбергов на протяжении 25 м от их сопряжений	Обмывка/осланцевание	Не реже 1 раза в сутки
	Обработка смачивающе-связующим раствором	Не реже 1 раза в 5 суток
Подготовительные выработки, проводимые по углю или по углю и породе, на протяжении 50 м от их забоев	Обмывка/осланцевание	Не реже 1 раза в сутки
	Обработка смачивающе-связующим раствором	Не реже 1 раза в пять суток
Конвейерные выработки:		
а) почва и элементы конструкции конвейера	Зачистка почвы и обмывка, или зачистка почвы и осланцевание	Не реже 1 раза в сутки
б) бока и кровля: - в районе перегрузочных пунктов и на протяжении 25 м от них по направлению движения вентиляционной струи	Обмывка или осланцевание	Не реже 1 раза в смену
	Связывание смачивающе-связующим раствором	Не реже 1 раза в 5 смен
- на остальном протяжении	Обмывка или осланцевание	Не реже 1 раза в месяц
	Обработка смачивающе-связующим раствором	Не реже 1 раза в 5 месяцев

Основным недостатком мероприятий гидроразрыхлительной защиты (например, обмывки, увлажнения осевшей пыли), используемых на некоторых горных выработках, является высокая скорость испарения воды, что приводит к довольно быстрому снижению влажности взрывоопасной угольной пыли до критического значения ($W=12\%$) и необходимости повторения процедур.

Анализ статистических данных по аварийности в угольных шахтах, связанный со взрывами угольной пыли, свидетельствует об актуальности проблемы обеспечения промышленной безопасности по пылевому фактору. Современные тенденции развития угольной отрасли, включая планы по наращиванию объемов добычи до 2035 года, прогнозируют существенное увеличение пылевой нагрузки в подземных выработках. В настоящее время в отдельных участках шахт фиксируется критическое накопление угольной пыли, достигающее нижнего предела взрывоопасной концентрации, что обуславливает необходимость совершенствования существующих способов пылевзрывозащиты. Учитывая выявленные недостатки традиционного метода осланцевания, широко применяемого в угольных шахтах, перспективным направлением может стать применение водных растворов гидрогелей в качестве альтернативы инертной пыли. Однако для успешного внедрения этой технологии необходимо провести детальные научные исследования и всесторонне изучить эффективность применения данного способа в шахтных условиях.

1.5 Выводы по главе 1

1. Взрывчатая угольная пыль представляет высокую опасность для жизни работников шахт и инфраструктуры предприятий. За последние 20 лет в ведущих угледобывающих странах мира взрывы угольной пыли унесли жизни более 700 человек.

2. В угольной промышленности России задействованы 79,1% работников на рабочих местах с вредными и/или опасными условиями труда, из которых 39,2% подвергаются воздействию АПФД.

3. Основными причинами аварийности, травматизма и профзаболеваемости по пылевому фактору на угольных шахтах являются недостаточно эффективные и надежные мероприятия комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты, высокая трудо- и энергоемкость их реализации, приводящая к нарушению регламента проведения работ, человеческий фактор.

4. Осланцевание, являющееся основным мероприятием по обеспечению пылевзрывобезопасности в горных выработках, несмотря на все его преимущества (экологичность, доступность сырья, отлаженность технологии), негативно сказывается на пылевой обстановке в горных выработках, повышает загрузку внутришахтного транспорта, увеличивает тяжесть труда и в целом снижает эффективность угледобычи.

5. Кардинальное повышение уровня промышленной безопасности по пылевому фактору требует разработки менее трудоемких способов обработки выработок, которое позволит удерживать взвешенную угольную пыль во влажном связанном состоянии, обеспечивая взрывобезопасность выработок в течение более длительного периода времени по сравнению с осланцеванием.

6. Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что в качестве одного из приоритетных направлений по повышению пылевзрывозащиты на угольных шахтах следует рассмотреть применение водного раствора суперабсорбента (гидрогеля), положительно зарекомендовавшего себя и нашедшего широкое применение в различных отраслях, в частности, горной промышленности.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОГЕЛЯ КАК СРЕДСТВА ПЫЛЕВЗРЫВОЗАЩИТЫ И СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ

2.1. Выбор состава гидрогеля

Учитывая недостатки применяемых на сегодняшний день в угольных шахтах средств пылевзрывозащиты, актуальным представляется использование определенных растворов суперабсорбентов, пользующихся спросом в различных отраслях: в сельском хозяйстве для обеспечения влагой растений в засушливых районах, для пожаротушения, где гидрогель способен при тушении создать пленку и не дает возможности проникновения кислороду к источнику горения и для увеличения нефтедобычи [15,105,114,124,129]. В угольной промышленности гидрогель используется при хранении пылящих материалов в штабелях (в частности, углей), а также для предотвращения самовозгорания угля [119,125]. Известен опыт применения суперабсорбентов в сухом виде (а не водных растворов гидрогелей) [108,118,131,133] для предупреждения взрыва взвешенной угольной пыли.

Рассмотрим более подробно достоинства и недостатки суперабсорбентов и гидрогелей, применяемых для указанных выше целей. Самый распространенный состав используемого гидрогеля, представляет основу, состоящую в основном из полиакриламида, который в свою очередь не токсичен при воздействии на человека.

Гидрогели торговых марок «Акватис», «Аквасин», состоящие в основном из калиевой соли акриловой кислоты активно применяются в сельском хозяйстве для удерживания и сохранения влаги в почве [13]. При анализе было выявлено, что данные составы не подходят по своим физическим свойствам, так как при разбавлении водой создают неоднородную «желейную» массу, которая при нанесении на стенки горной выработки не будут удерживаться на ее поверхности.

Гидрогель марки «ArcticLine» используется в качестве пылеподавителя для консервации угольных штабелей, а также для подавления пыления при погрузочно-разгрузочных работах в зимнее время. Основным его преимуществом является безопасность при воздействии на человека и нетоксичность, а также

несмерзаемость в холодное время. Основными недостатками данного состава является его высокая текучесть, что будет приводить к стеканию с поверхностей горных выработок, и высокая стоимость.

При нефтедобыче различные составы гидрогелей применяются в качестве буровых растворов для увеличения их вязкости и герметизации выбуренной горной породы [130]. Основные компоненты, входящие в их состав – это сульфонированный полиакриламид, карбоксилированный полиакриламид, оксиэтилцеллюлоза, бишофит и хлористый натрий, сульфонол, диоксид марганца технический, барит, гематит, крахмал. Каждый из этих компонентов может использоваться для конкретной цели: для понижения влажности или вязкости, быть смазочной добавкой или эмульгатором. Некоторые из этих добавок не являются токсичными, но при взаимодействии с минералами пласта могут образовывать ядовитые вещества (тяжелые металлы: свинец, медь, цинк, марганец и др.) [73,130].

Гидрогели, применяемые для пожаротушения, образуют надежное пленкозащитное покрытие и локализуют очаги горения, но могут содержать вещества, относящиеся к более высокому классу опасности по воздействию на человека. Гидрогель марки «Гидропласт», который является наиболее распространенным в нашей стране состоит из полиакрилат калия, относящийся к 4 классу опасности по воздействию на организм человека. Особый интерес вызывает суперабсорбент торговой марки «Аквасин-П», который представляет собой сополимер акриламида/акриловой кислоты и аммонийной натриевой соли акриловой кислоты. Основными компонентами, входящими в его состав, являются полипроп-2-еноат натрия, хлорид аммония и хлорид натрия. Данный состав обладает высокой влагоудерживающей способностью, устойчивостью полимерной цепочки и экологичностью. В связи с этим для дальнейших исследований в качестве потенциальных средств пылевзрывозащиты были взяты гидрогели «Гидропласт» и « Аквасин-П».

Важным свойством гидрогелей для пыле- и влагоудержания является поведение гидрогелей в условиях воздействия температурного фактора. Были

проведены лабораторные эксперименты по кинетике высыхания схожих по своим физическим свойствам гидрогелей «Аквасин-П» и «Гидропласт». Методика эксперимента подразумевала приготовление 4%-ого и 6%-ого раствора гидрогелей, нанесение их на чашки Петри слоем толщиной 2 и 4 мм и исследование динамики высыхания в лабораторных условиях. После высыхания гидрогелей визуально определялось физическое состояние каждого исследуемого образца. В лаборатории поддерживалась температура $t = 24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ и относительная влажность воздуха $\varphi = 21\%$.

После нанесения гидрогелей в течение регламентированного времени чашки взвешивались до постоянства массы и полного высыхания гидрогелей. На рисунке 2.1 можно увидеть первоначальное состояние гидрогелей после их нанесения, а на рисунке 2.2 результат полного высыхания гидрогелей, которое произошло через 3,5 суток.

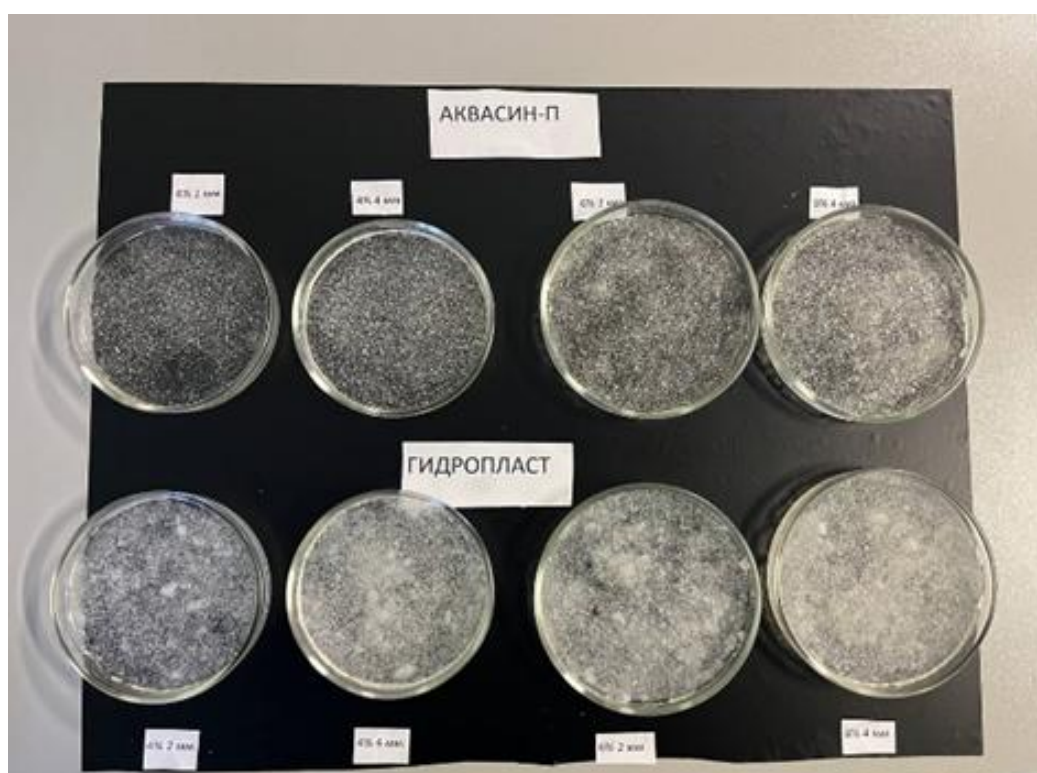


Рисунок 2.1 – Начальное состояние поверхностей гидрогелей

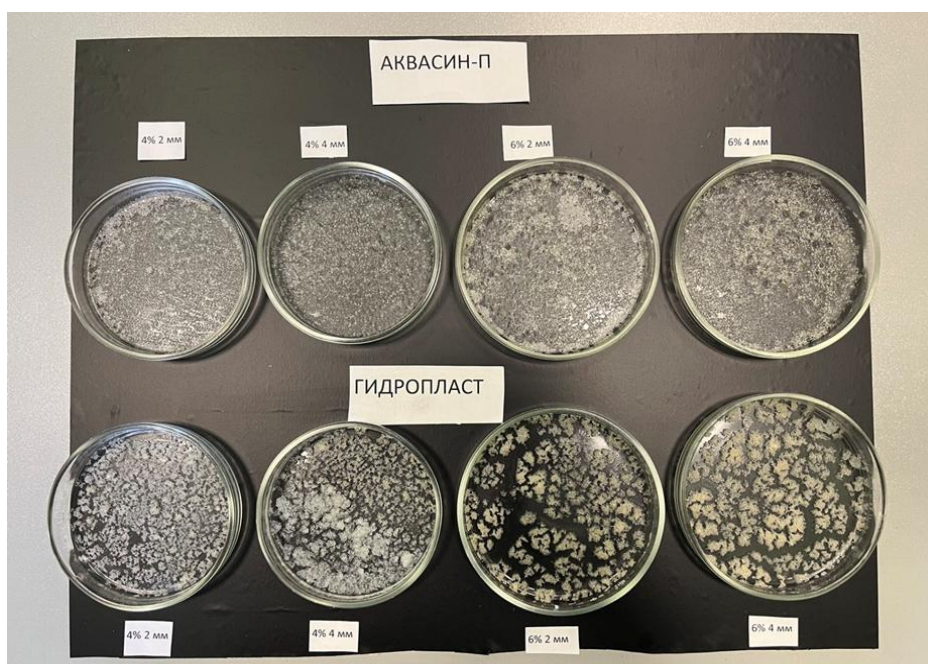


Рисунок 2.2 – Конечное состояние поверхностей гидрогелей через 3,5 суток

Результаты измерения кинетики высыхания гидрогелей представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения влажности гидрогелей, полученные в процессе высыхания

	начальная, %	через 6 ч, %	через 12 ч, %	через 24 ч, %	через 30 ч, %	через 48 ч, %	через 72 ч, %	через 84ч, %
4% раствор Аквасин-П (2 мм)	88,62	83,62	81,90	75,64	70,77	44,12	0,00	0,00
4% раствор Аквасин-П (4 мм)	95,00	93,45	92,99	91,41	90,43	84,51	59,26	0,00
6% раствор Аквасин-П (2 мм)	97,96	97,74	97,48	96,39	95,45	91,89	0,00	0,00
6% раствор Аквасин-П (4 мм)	97,96	97,79	97,55	96,75	96,15	93,98	60,00	0,00
4% раствор «Гидропласт» (2 мм)	95,12	94,55	93,94	91,18	88,89	72,73	0,00	0,00
4% раствор «Гидропласт» (4 мм)	94,27	93,82	93,37	91,73	90,68	85,62	47,62	0,00
6% раствор «Гидропласт» (2 мм)	92,67	91,67	90,60	85,81	81,36	57,69	0,00	0,00
6% раствор «Гидропласт» (4 мм)	93,46	92,82	92,18	89,71	88,03	81,21	6,67	0,00

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что полное высыхание гидрогелей с толщиной нанесения 2 мм происходит через 72 часа, а гидрогели с толщиной нанесения 4 мм полностью высохли через 84 часа.

После завершения процесса дегидратации гидрогелей следующим этапом эксперимента являлась их повторное увлажнение до исходной влажности для оценки восстановительных свойств. Результаты, представленные на рисунке 2.3, демонстрируют различное поведение исследуемых образцов в процессе регидратации. Гидрогели марки «Аквасин - П» полностью восстанавливают исходную структуру, подвергаясь полному растворению в водной среде. В отличие от них, образцы марки «Гидропласт» вследствие специфики процесса дегидратации, приводящей к образованию фрагментированной структуры «черепков», не способны к полному растворению в воде.



Рисунок 2.3 – а) растворы гидрогелей сразу после добавления воды; б) растворы гидрогелей через сутки после добавления воды

На основании результатов проведенных исследований для дальнейших испытаний был выбран гидрогель торговой марки «Аквасин-П», который не образует «черепков» при высыхании, плохо смачиваемых водой, в отличие от «Гидропласта». С целью возможности применения гидрогеля в условиях горных выработок необходимо оценить его безопасность в отношении работников и окружающей среды.

2.2 Оценка безопасности гидрогеля по воздействию на человека и окружающую среду

Первоначально был проанализирован компонентный состав сухого суперабсорбента. Суперабсорбент торговой марки «Аквасин-П» представляет собой сополимер акриламида/акриловой кислоты и аммонийной натриевой соли акриловой кислоты и включают полипроп-2-еноат натрия, хлорид аммония и хлорид натрия (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Компонентный состав суперабсорбента

Наименование компонента	Химическая формула	Доля в составе (по массе), %	ПДК р.з., мг/м ³	Класс опасности соединения
Полипроп-2-еноат натрия	$[C_3H_3NaO_2]_n$	60	10	4
Аммоний хлорид	NH_4Cl	20	10	3
Натрий хлорид	$NaCl$	20	5	3

Данные компоненты относятся к 3 и 4 классам опасности по воздействию на организм человека.

Полипроп-2-еноат натрия представляет собой суперабсорбирующий полимер в виде белого гранулированного порошка, не растворимого в воде, способного поглотить ее в 100-1000 раз больше собственной массы. Данный компонент применяется в целях гигиены для взрослых и детей и в медицине, что говорит о его безопасном использовании. Полипроп-2-еноат натрия нетоксичен и негорюч.

Хлорид натрия $NaCl$ или поваренная соль, каменная соль, пищевая соль используется в различных сферах: в пищевой промышленности (усилитель вкуса, специи), в медицине (физраствор, антисептики), в химической промышленности (сырье для получения соды, хлора, гидроксида натрия), а также в сельском хозяйстве в качестве минеральной добавки для животных. Хлорид натрия считается малотоксичным.

Аммоний хлорид NH_4Cl , как и остальные компоненты, применяется в пищевой промышленности как добавка E510 (улучшитель муки и регулятор

кислотности), в медицине (диуретик и добавка в сиропы от кашля), в сельском хозяйстве в составе азотных удобрений. Относится к малоопасным компонентам и в малых дозах при попадании внутрь стимулирует отхождение мокроты при кашле.

Для применения в условиях шахт планируется использование слабоконцентрированного водного раствора суперабсорбента, что приводит к значительному снижению содержания активного компонента в конечной смеси и будет еще более безопасным для работников и окружающей производственной среды. Безопасность и экологичность состава подтверждена паспортом безопасности.

Дополнительно был изучен химический и фазовый состав суперабсорбента. Фазовый состав образца анализировался в научном центре «Экосистема» Горного университета методом порошковой рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре XRD-6000 фирмы Shimadzu (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Рентгеновский порошковый дифрактометр XRD-6000

Расшифровка спектров дифрактограмм проводилась с использованием международной рентгенометрической картотеки JCPDS (PDF).

Качественный и количественный состав проб суперабсорбента определяли в ходе рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФСА) по фундаментальным параметрам с использованием рентгенофлуоресцентного

спектрометра XRF-1800 фирмы Shimadzu. Скорость нагревания образцов составляла 20°C в минуту.

Порошковая рентгеновская дифрактометрия позволила выявить только наличие CaCO_3 (в базе № 5-0586) и SiO_2 (№ 33-1161) в исследованном образце суперабсорбента. Дифрактограмма образца представлена на рисунке 2.5.

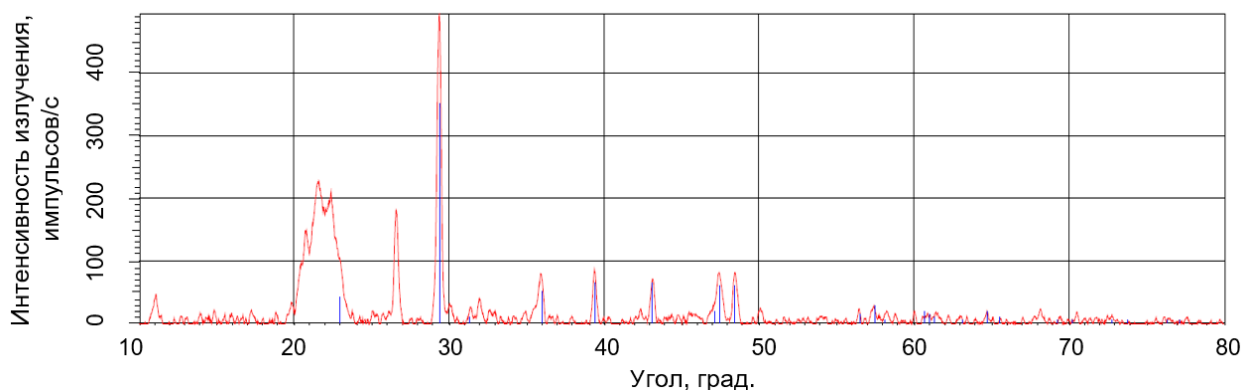


Рисунок 2.5 – Дифрактограмма исследованного образца

Пиковые значения интенсивностей рентгеновского излучения 400-500 импульсов в секунду, соответствующие вышеуказанным минеральным соединениям, зафиксированы при угле отражения $\theta=30$ град. Результаты РФСА, сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты полуколичественного анализа проб суперабсорбента

№ пробы	Соединение	Содержание, %	Соединение	Содержание, %
1	Na_2O	16,1614	K_2O	0,2435
	CaO	2,3911	SO_3	0,0874
	Al_2O_3	1,4806	TiO_2	0,0448
	SiO_2	0,6997	P_2O_5	0,0255
	MgO	0,2837	SrO	0,0067
	Fe_2O_3	0,2756	CH_2	78,3000
2	Na_2O	14,5914	Al_2O_3	0,0957
	SO_3	1,1622	Fe_2O_3	0,0372
	K_2O	0,5499	NiO	0,0282
	SiO_2	0,3341	ZnO	0,0207
	CaO	0,1514	CuO	0,0092
	MgO	0,1201	CH_2	82,9000

Результаты исследований показали наличие более широкого спектра химических соединений в исследованных образцах, преимущественно оксидов, с преобладанием оксида натрия и функциональных групп CH_2 . Полученные результаты по нескольким пробам коррелировались между собой. В результате проведенных исследований не было выявлено отклонений в составе суперабсорбента или наличия дополнительных соединений, способных оказать негативное воздействие на персонал.

Для обоснования возможности использования гидрогелей в качестве средства пылевзрывозащиты необходимо выполнить:

- анализ химического состава суперабсорбента;
- лабораторные испытания с целью определения температуры воспламенения и самовоспламенения;
- определение такой концентрации его водного раствора, при которой гидрогель не будет стекать или отваливаться от поверхности выработки, на которую его наносят;
- оценку времени высыхания раствора в смеси с угольной пылью, что позволит определить периодичность обработки выработок для обеспечения их взрывобезопасного состояния;
- поведение гидрогеля на стенках горных выработок под воздействием аэродинамических потоков с различными их скоростями;
- исследование запыленности воздуха и интенсивности пылеосаждения в горных выработках, обработанных гидрогелем.

2.3 Исследование пожаровзрывобезопасности гидрогелей

Для безопасного применения водного раствора суперабсорбента на основе полипроп-2-еноат натрия в угольной шахте были проведены эксперименты по оценке взрывопожаробезопасности в отраслевом центре по промышленной безопасности в угольной отрасли НЦ ВостНИИ. Для проведения экспериментов были взяты пробы 4 и 6%-ного гидрогелей объемом 1 литр каждая, приготовленные непосредственно в лаборатории из сухого суперабсорбента,

разбавленного водой. Определялась температура воспламенения, самовоспламенения, на основании чего делался вывод о горючести (пожароопасности) состава. Температура воспламенения определялась с помощью аппарата для определения температуры вспышки в открытом тигле (ТВО-ЛАБ-01) из коррозионностойкого материала, термогигрометра (ИВА-6Н), с делением шкалы не более 1 °С, барометра анероида контрольного М-67, секундомера для определения скорости нагревания жидкости, трехстворчатого экрана (ширина створки 460 мм и высотой 610 мм) для защиты тигля от потоков воздуха, а также газовой горелки с пламенем в форме шара диаметром не более 4,5 мм. За температуру воспламенения воспринимают ту температуру, при которой пары жидкости воспламеняются от пламени газовой горелки и продолжают гореть в течение 5 и более секунд после его удаления. Исследования проводились по методике, описанной в ГОСТ 12.1.044-89 [24] (п. 4.6, 4.8). Проводилось по три опыта для каждой пробы, отдельно для 4 и 6%-ого гидрогелей, которые нагревали подобно определению температуры вспышки. Полученные результаты, приведенные в таблицах 2.4, 2.5 подтверждают отсутствие температуры воспламенения у исследованных проб. Полученные результаты для 4% гидрогеля подтверждены протоколом (Приложение В).

Температура самовоспламенения определялась на установке «СТС-2П», которая представляет собой реакционный сосуд объемом 200 см³ из кварцевого стекла и включает воздушный термостат, обеспечивающий равномерный нагрев колбы до заданной температуры. Подача гидрогеля осуществлялась дозированно с помощью шприца из нержавеющей стали. Температуру внутри установки регулировали так, чтобы было обеспечено равномерное ее нагревание до необходимой температуры. Затем в колбу подавалась проба испытываемого образца, и проводились наблюдения за содержимым до появления пламени и/или взрыва. В этот момент останавливали секундомер и регистрировали период индукции самовоспламенения. Если испытуемый образец не демонстрирует пламя и/или взрыв, то испытание прекращают. Результаты определения

температуры самовоспламенения представлены в таблицах 2.6, 2.7 и отражены в протоколе для 4%-ого гидрогеля (Приложение Г).

Таблица 2.4 – Результаты определения температуры воспламенения 4%-ого раствора гидрогеля в НЦ ВостНИИ

Номер опыта	Скорость нагревания образца, °С/мин	Температура испытания, °С	Результат испытания на воспламенение	Температура воспламенения, °С
1	5,5	91,4	воспламенение отсутствует	-
2	5,5	90,5	воспламенение отсутствует	-
3	5,5	91,2	воспламенение отсутствует	-

Таблица 2.5 – Результаты определения температуры воспламенения 6%-ого раствора гидрогеля в НЦ ВостНИИ

Номер опыта	Скорость нагревания образца, °С/мин	Температура испытания, °С	Результат испытания на воспламенение	Температура воспламенения, °С
1	5,5	86,1	воспламенение отсутствует	-
2	5,5	85,9	воспламенение отсутствует	-
3	5,5	85,7	воспламенение отсутствует	-

Таблица 2.6 – Результаты температуры самовоспламенения 4%-ого раствора гидрогеля в НЦ ВостНИИ

№	Количество вещества в пробе, см ³	Температура колбы °С,			Температура испытания, °С	Результат испытания
		верх	середина	низ		
1	0,6	348,1	348,0	349,4	348,7	самовоспламенение отсутствует
2	0,8	402,2	401,9	403,1	402,5	самовоспламенение отсутствует
3	1,0	498,0	494,9	498,9	496,9	самовоспламенение отсутствует
4	1,0	504,0	502,2	504,9	503,6	самовоспламенение отсутствует
5	1,0	649,9	649,1	650,0	649,6	самовоспламенение отсутствует
6	0,6	649,8	649,5	649,9	649,7	самовоспламенение отсутствует
7	0,8	650,0	648,9	650,0	649,5	самовоспламенение отсутствует
8	1,0	649,9	649,6	650,0	649,8	самовоспламенение отсутствует
9	1,0	649,7	649,3	649,8	649,6	самовоспламенение отсутствует

Таблица 2.7 – Результаты температуры самовоспламенения 6%-ого раствора гидрогеля в НЦ ВостНИИ

№	Количество вещества в пробе, см ³	Температура колбы °С,			Температура испытания, °С	Результат испытания
		верх	середина	низ		
1	1,0	499,2	498,9	500,4	499,7	самовоспламенение отсутствует
2	1,0	600,8	599,2	600,9	600,1	самовоспламенение отсутствует
3	1,0	649,5	649,1	650,0	649,6	самовоспламенение отсутствует
4	0,6	649,7	649,2	649,9	649,6	самовоспламенение отсутствует
5	0,8	649,8	649,1	649,9	649,5	самовоспламенение отсутствует
6	1,0	649,8	648,9	650,0	649,5	самовоспламенение отсутствует
7	1,0	649,9	649,3	650,0	649,7	самовоспламенение отсутствует

При температурах испытания от 348,7 до 649,8°С самовоспламенения как 4%-ого, так и 6%-ого гидрогелей зафиксировано не было.

Таким образом, отсутствие температур воспламенения и самовоспламенения свидетельствует о том, что 4 и 6%-ый гидрогели на основе полипроп-2-еноат натрия являются негорючими и могут быть применены во взрывоопасных средах, в том числе на шахтах и рудниках опасных по взрывам газа и пыли.

2.4 Определение физических, влагоудерживающих и пылезакрепляющих характеристик гидрогеля

Для обоснования возможности применения гидрогеля в качестве средства пылевзрывозащиты на лабораторной базе кафедры безопасности производств и научного центра геомеханики и проблем горного производства Горного университета были проведены лабораторные исследования по определению его наиболее важных эксплуатационных характеристик: концентрации, адгезии, текучести, вязкости, кинетики высыхания в смеси с угольной пылью.

Для проведения исследований были взяты гидрогели с концентрацией сухого вещества 2, 4, 6, 8, 12 и 16%. Текучесть исследовалась на образцах, моделирующих поверхность горных выработок, пройденных по породе и углю, а также закрепленных бетонной крепью (рисунок 2.6). Сверху на эти поверхности наносились водные растворы суперабсорбента и велись наблюдения за скоростью растекания гидрогеля. Исследования показали, что раствор с концентрациями 4-6% наиболее эффективно удерживался на поверхности.

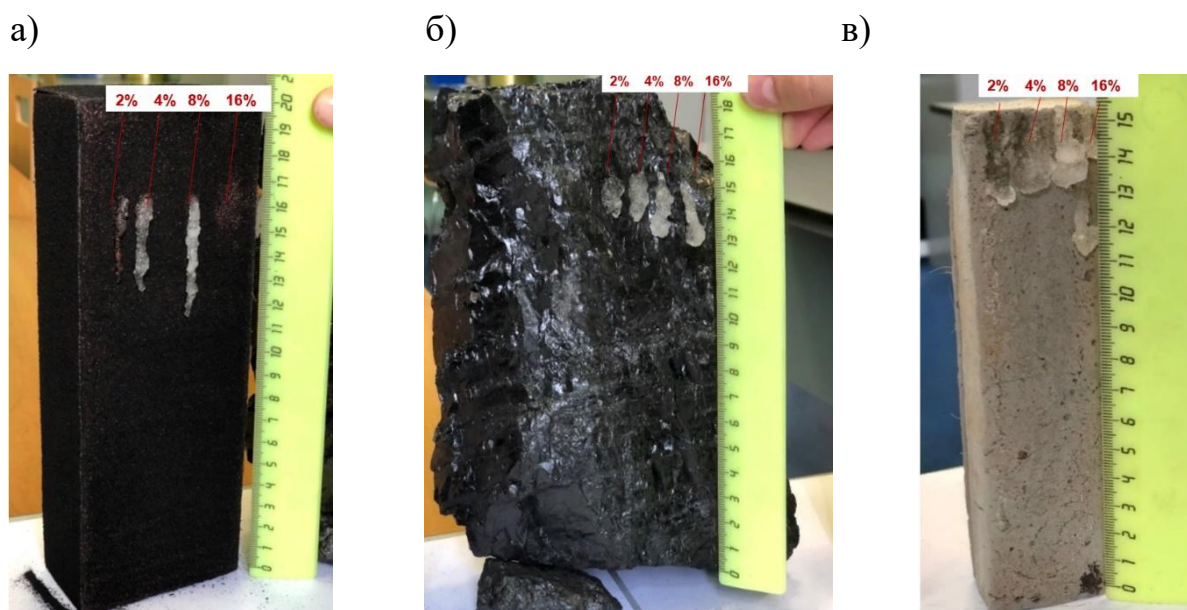


Рисунок 2.6 – Определение текучести растворов гидрогеля на различных поверхностях, моделирующих: а) подготовительную выработку, пройденную по породе; б) подготовительную выработку, пройденную по пласту; в) подготовительную выработку с бетонной крепью или бетонную перемычку [47]

Исследования показали, что растворы суперабсорбента с концентрацией сухого вещества 2-3% обладают высокой текучестью и не задерживаются на вертикальных поверхностях. Растворы с концентрацией 8-16% сложны в приготовлении и в нанесении, так как обладают высокой вязкостью, плохо закрепляются на поверхности и отслаиваются вместе с осевшей угольной пылью. Растворы с массовой долей 4-6% обладают удовлетворительной текучестью и достаточной адгезией к поверхности.

Следующим этапом лабораторных экспериментов по определению рациональной концентрации рабочего раствора гидрогеля было изучение адгезионных свойств составов на образцах из эквивалентного материала, представляющего собой слой песка толщиной 30-40 мм, закрепленного эпоксидной смолой ЭД-20 и полиэтиленполиамином. Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Изготавливались образцы из эквивалентного материала размерами 10х10 см, которые затем обрабатывались гидрогелем толщиной 2-4 мм. На образец с гидрогелем укладывался сверху необработанный образец, дальше проводились испытания на отрыв на установке Testometric M350-5AT в научном центре геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (рисунок 2.7, 2.8).



Рисунок 2.7 – Подготовленные образцы для исследований



Рисунок 2.8 – Испытания на отрыв на установке Testometric M350-5AT

При этом регистрировались максимальная нагрузка на отрыв и максимальное удлинение до разрушения обработанных образцов. Основные полученные результаты проведения экспериментов представлены на рисунке 2.9 – 2.11 и в таблице 2.8:

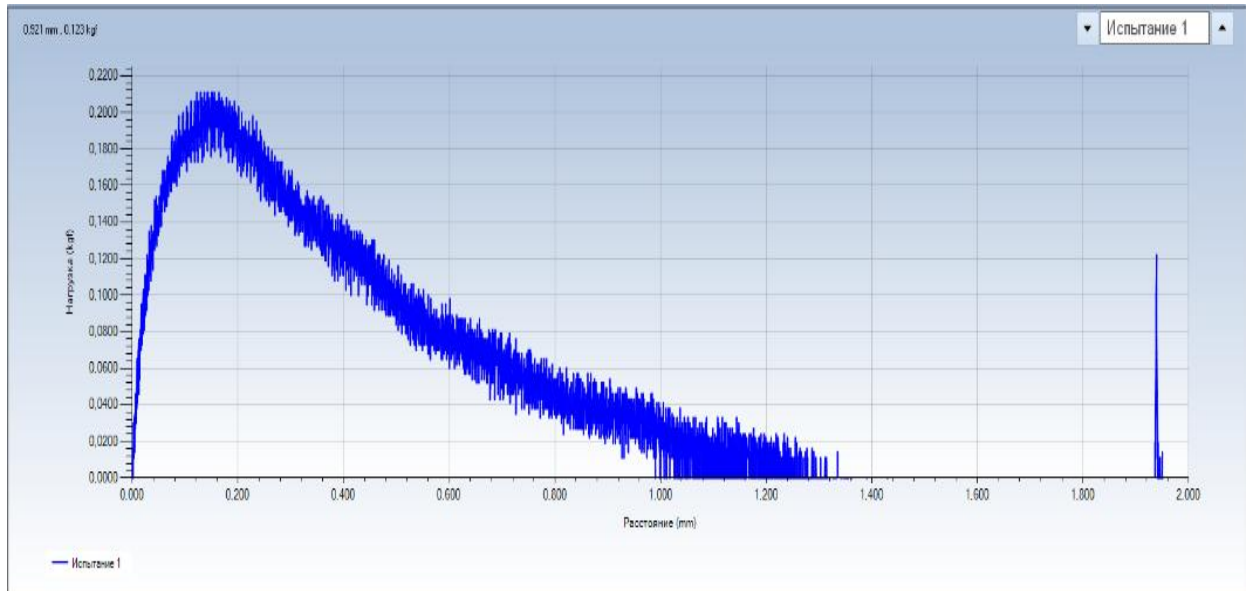


Рисунок 2.9 – Измерение максимальной нагрузки на отрыв и максимального удлинения для 2%-ого гидрогеля

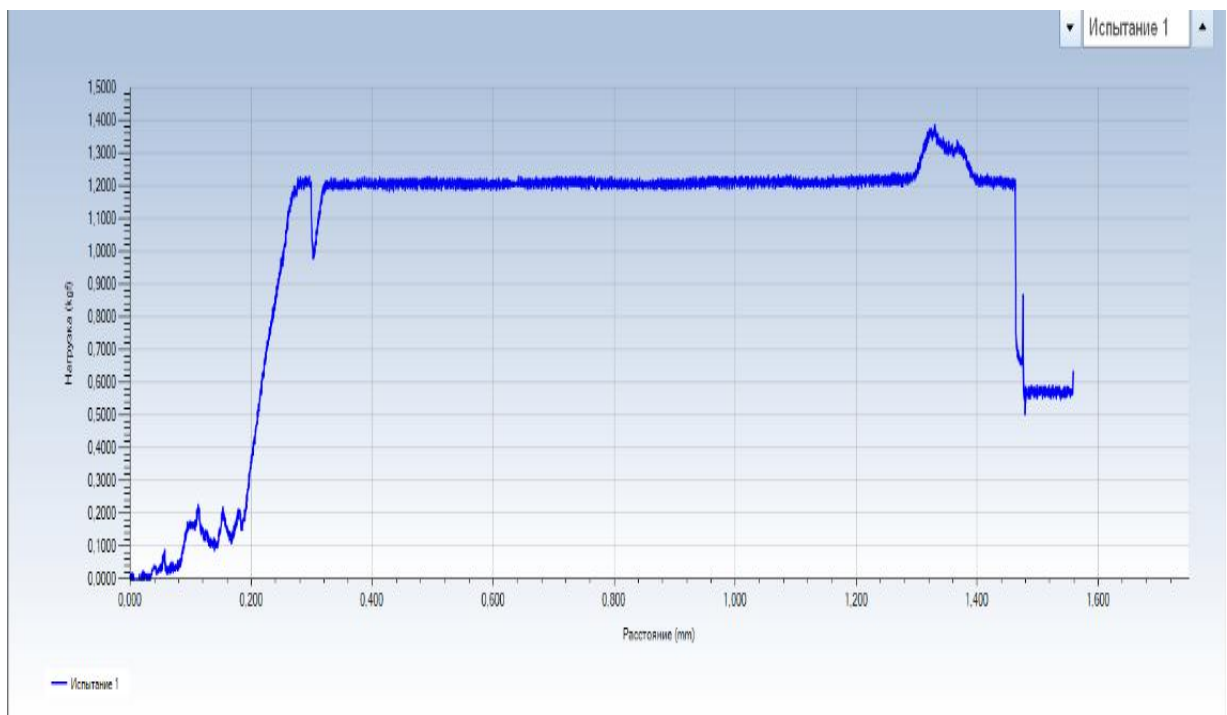


Рисунок 2.10 – Измерение максимальной нагрузки на отрыв и максимального удлинения для 4%-ого гидрогеля

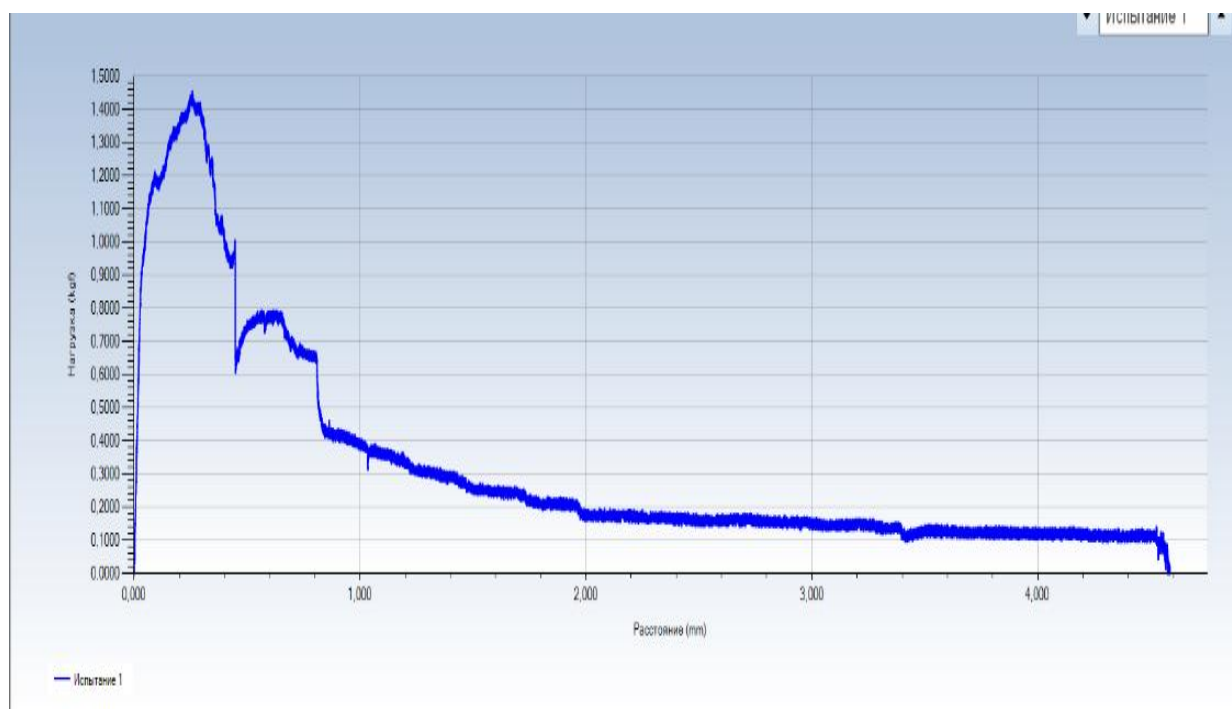


Рисунок 2.11 – Измерение максимальной нагрузки на отрыв и максимального удлинения для 6%-ого гидрогеля

Таблица 2.8 – Адгезионные свойства гидрогеля различных концентраций

Концентрация раствора	Максимальная нагрузка, кгс	Максимальное удлинение до разрушения, мм
6%	1,453	4,605
4%	1,385	1,559
2%	0,211	1,953

Из полученных результатов следует, что наилучшие показатели у 4 и 6%-ого раствора гидрогеля, но исходя из экономической целесообразности, 4%-ый раствор предпочтителен.

Для оценки применимости гидрогеля в промышленных масштабах, в частности для механизированного или ручного способа нанесения на стенки горных выработок, были проведены исследования его динамической вязкости. Измерения выполнялись в лаборатории Научного центра факультета переработки минерального сырья с использованием ротационного вискозиметра ИКА ROTAVISC me-vi с диапазоном определения вязкости от 100 до 40 000 000 мПа·с (рисунок 2.12). Методика измерений основана на регистрации изменения

крутящего момента шпинделя, погруженного в исследуемый образец. Процедура включала в себя следующие этапы:

- погружение шпинделя до момента контакта нижней пластины направляющей с дном емкости;
- вращение шпинделя с постоянной скоростью 150 об/мин;
- фиксация значения вязкости через 5 минут после стабилизации показаний.



Рисунок 2.12 – Измерение вязкости с помощью вискозиметра
IKA ROTAVISC me-vi

В результате установлено, что динамическая вязкость 4%-ого раствора суперабсорбента составляет 7893 мПа·с, что подтверждает его пригодность для предлагаемых условий эксплуатации.

2.5 Исследование кинетики высыхания гидрогеля в смеси с угольной пылью

Для определения необходимой периодичности нанесения гидрогеля на поверхность горной выработки с осевшей углепородной пылью необходимо знать, насколько быстро «уходит» из него влага. В соответствии с приказом Ростехнадзора от 20.12.2012 № 743 и Руководством по борьбе с пылью и пылевзрывозащите на угольных и сланцевых шахтах (1992 г.) при влажности

осевшей угольной пыли менее 12% выработки считаются взрывоопасными. В лабораторных условиях были проведены исследования кинетики сушки приготовленных концентрированных растворов гидрогеля с различным содержанием сухого порошка, которые смешивались с навесками взрывоопасной угольной пыли различными по массе. Массы навесок пыли рассчитывались из максимальных значений реальных интенсивностей пылеотложения, зафиксированных в подготовительных выработках угольных шахт (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Исходные данные для расчета массы проб угольной пыли [47]

№	Наименование выработки	Интенсивность пылеотложения, P_t , $(\text{г}/\text{м}^3) \cdot \text{сут}$	Площадь поперечного сечения, S , м^2	Длина участка выработки, Δl , м
1	Конвейерный штрек (место перегрузки)	41,6	19,6	20
2	Проходческий забой	19,9	18,5	153

Интенсивность пылеотложения (P_t) рассчитывается по формуле (2.1) на основании результатов измерения запыленности в начале (C_1) и конце (C_2) отрезка длиной до 50 м участка подготовительной горной выработки, на которой определяется пылеотложение [46]:

$$P_t = \frac{C_1 - C_2}{(l_1 - l_2) \cdot S \cdot t}, \text{ г}/\text{м}^3 \cdot \text{сут}. \quad (2.1)$$

где C_1 , C_2 – запыленность воздуха в начальном и конечном сечениях рассматриваемого отрезка горной выработки, $\text{г}/\text{м}^3$,

l_1 , l_2 – расстояние от сопряжения очистного забоя с вентиляционным или конвейерным штреком или от источника пылевыведения до соответствующего сечения выработки, в котором измеряется запыленность, м,

S – площадь поперечного сечения выработки в свету, м^2 ,

q_v – объем воздуха, прошедшего через рассматриваемый участок горной выработки за время замера, м^3 ,

t – время замера, сут.

Показатель интенсивности пылеотложения характеризует массу пыли, скопившуюся в 1 м^3 участка горной выработки длиной Δl ($l_2 - l_1$) и площадью сечения S при прохождении по ней воздуха с начальной запыленностью C_1 в объеме $q_в$ за период измерения, принимаемый равным одним суткам.

Исходя из этого, проведем расчет массы навесок пыли, которые нужно взять для опытов. Рассмотрим расчет на примере процессов пылеосаждения в конвейерном штреке.

Определим массу пыли $M_{\text{сут.}}$, которая сосредоточится в воздухе участка выработки при указанных в таблице 2.4 параметрах выработки и интенсивности пылеотложения по формуле (2.2) [46]:

$$M_{\text{сут.}} = P_t \cdot S \cdot \Delta l = 41,6 \cdot 19,6 \cdot 20 = 16307,2 \text{ г} \quad (2.2)$$

Вычислим площадь внутренних поверхностей горной выработки $S_{\text{уч.}}$, на которых за одни сутки задерживаются и на которые выпадают пылевые частицы с общей массой $M_{\text{сут.}}$, упрощенно считая сечение выработки квадратным и пренебрегая неравномерностью распределения пыли на бортах, кровле и почве выработки (2.3) [46]:

$$S_{\text{уч.}} = 4 \cdot \sqrt{S} \cdot \Delta l = 4 \cdot \sqrt{19,6} \cdot 20 = 354,18 \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

Массу пыли, оседающую на 1 м^2 поверхности выработки, определим из соотношения (2.4) [46]:

$$M_{\text{ед.}} = \frac{M_{\text{сут.}}}{S_{\text{уч.}}} = \frac{16307,2}{354,18} = 46,04 \text{ г/м}^2 \quad (2.4)$$

Так как в качестве подложек для смесей угольной пыли с гидрогелем использовали куски фольги размером $50 \times 50 \text{ мм}$, то массу навесок пыли M_{25} , в мг, выпадающей из воздуха на площади 25 см^2 можно вычислить как (2.5) [46]:

$$M_{25} = \frac{M_{\text{ед.}} \cdot 1000}{10000} \cdot 25 = \frac{46,04 \cdot 1000}{10000} \cdot 25 = 115,11 \approx 115 \text{ мг} \quad (2.5)$$

Таким образом, на площади 25 см^2 поверхности участка горной выработки, имеющей сечение $19,6 \text{ м}^2$ и протяженность 20 м , при интенсивности пылеотложения $41,6 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ осядет 115 мг пыли. Для участка проходческого

забоя с параметрами, приведенными в таблице 2.4, масса пыли, осевшей на поверхности площадью 25 см^2 , составит 53,5 мг. Для прогнозирования изменения влажности гидрогеля на поверхности горных выработок в случае экстремальной ситуации, когда интенсивность пылеотложения может резко возрасти и превысить в 10-15 раз максимально фиксируемую ($40 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$), были дополнительно проведены эксперименты с навесками угольной пыли массой 1,625 г.

Расход гидрогеля принимался равным 2 л/м^2 , исходя из практических данных по применению пылесвязывающих составов и воды для операций обмывки и орошения подземных горных выработок. Приготовленные смеси угольной пыли с раствором гидрогеля различной концентрации (4,8,12,16%) выкладывали на подложки из фольги (рисунок 2.13а), взвешивали и оставляли в лаборатории для сушки в естественных условиях (при $t=21-23^\circ\text{C}$ и $\phi=30-32\%$). Последующие измерения массы навесок проводили с периодичностью один раз в сутки до того момента, когда значения прекращали меняться (рисунок 2.13б). После этого пробы досушивали в сушильном шкафу при $t=105 \pm 5^\circ\text{C}$ (рисунок 2.13 в) до постоянства массы (результаты двух последних взвешиваний должны отличаться не более чем на 0,1% исходной массы пробы) и рассчитывали значения влажности.

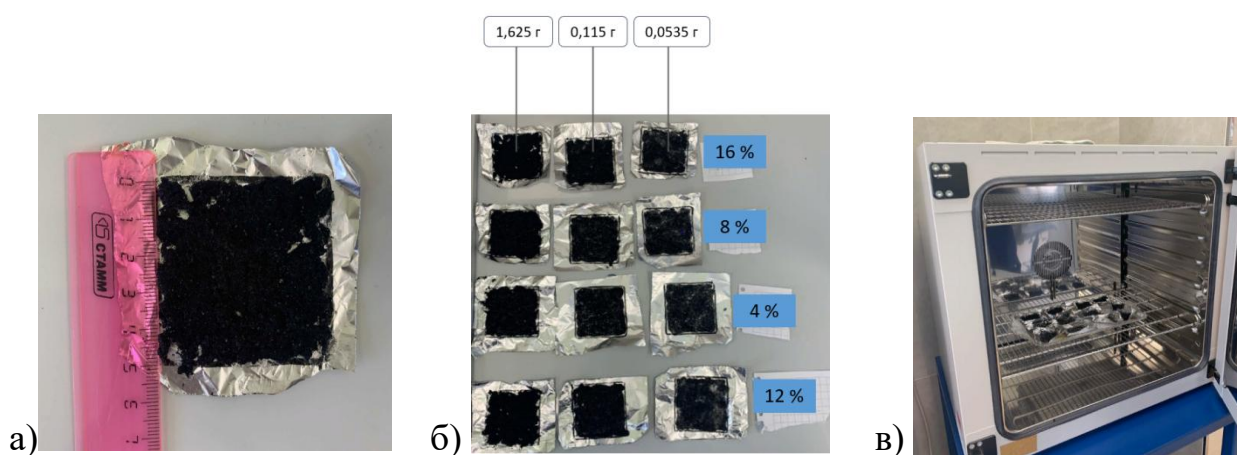


Рисунок 2.13 – Этапы проведения экспериментов по кинетике сушки смесей угольной пыли с гидрогелем [47]: а) подготовка и выкладка проб на подложки; б) сушка проб в естественных условиях; в) термическая сушка проб

Для определения продолжительности «взрывозащитного эффекта» (когда влажность удерживаемой угольной пыли сохраняется выше 12%) были проведены исследования кинетики высыхания различных концентрированных растворов гидрогеля в смеси с угольной пылью, масса которой соответствовала различным значениям интенсивностей пылеотложения в угольных шахтах (рисунок 2.14, 2.15).

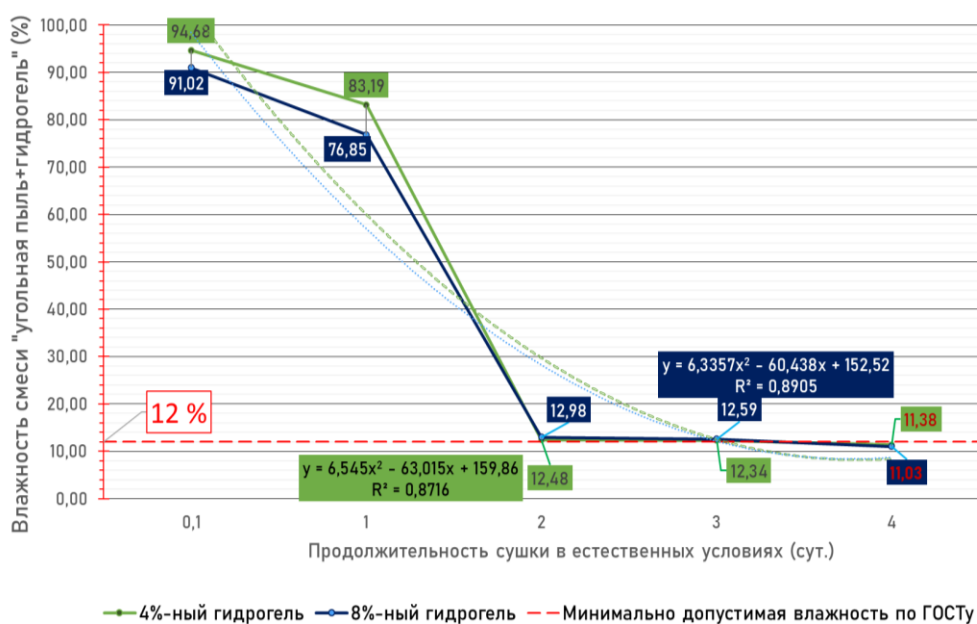


Рисунок 2.14 – Кинетика высыхания 4%-ного и 8%-ного гидрогеля вместе с угольной пылью при $P_t = 19,9 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$

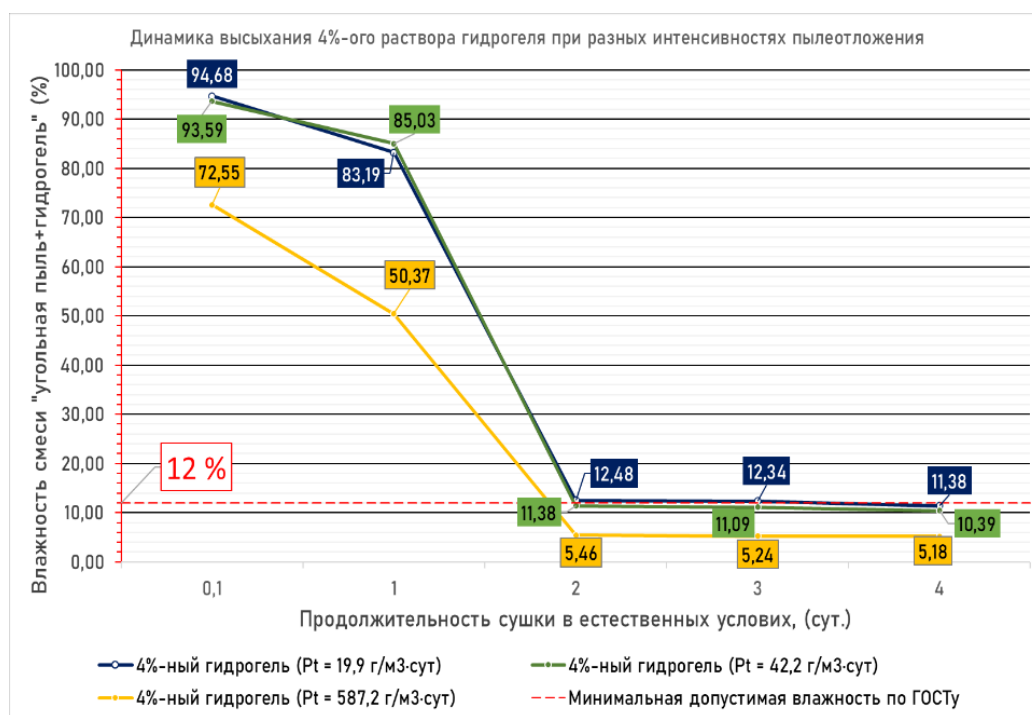


Рисунок 2.15 – Кинетика высыхания 4%-ного гидрогеля вместе с угольной

пылью при разной интенсивности пылеотложения

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод: использование 4%-ого раствора гидрогеля при интенсивности пылеотложения $19,9 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ позволяет удерживать влажность осевшей угольной пыли не менее 12% до 3-х суток, при интенсивности $41,6 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ – до 1,5 суток, а более концентрированные растворы суперабсорбента обеспечивают нормативные значения влажности в течение еще большего периода времени, составляющего не менее 2 суток. Следует отметить, что осланцевание для выработок с указанной интенсивностью пылеотложения требуется проводить не менее 3 раз в сутки. Следовательно, с точки зрения высыхания и закрепления на поверхности горной выработки оптимальным является 4%-ый гидрогель, основные эксплуатационные свойства которого приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Основные эксплуатационные характеристики 4%-ого раствора суперабсорбента [48]

№	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1	Рекомендуемая рабочая концентрация (с учетом полученных результатов по определению текучести и адгезии)	%	4-6
2	Адгезия гидрогеля на поверхности из эквивалентного материала: – 4%-ная концентрация – 6%-ная концентрация	кгс	1,305 1,453
3	Динамическая вязкость	мПа/с	7893
4	Период времени, в течение которого влажность гидрогеля (4%-ного) с угольной пылью сохраняется выше 12% (для условий $t=21-23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi=30-32\%$): – при единовременно статически созданной интенсивности пылеотложения $19,9 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ – при единовременно статически созданной интенсивности пылеотложения $41,6 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$	сут.	3-3,5 1,5-2

Следовательно, экспериментально доказана возможность применения 4%-ого раствора суперабсорбента (гидрогеля) вышеуказанного состава в качестве средства пылевзрывозащиты, позволяющего снизить периодичность обработки горных выработок и последующего контроля по сравнению с осланцеванием, что позволит избежать рисков, вызванных некачественным проведением мероприятий по пылевзрывозащите.

Экспериментальное исследование по кинетике высыхания 4%-ого гидрогеля в рамках подготовки к шахтному эксперименту проводилось в ФГУП «ВГСЧ» (г. Санкт-Петербург). Методика эксперимента предусматривала приготовление 10 литров рабочего раствора и нанесение его на вертикальные и горизонтальные поверхности учебного штрека. Нанесение раствора осуществлялось на вертикальную (бока) учебного штрека размером 50х50, 70х70 см (рисунок 2.16, 2.17) и на горизонтальную поверхность (кровля) размером 50х50 см (рисунок 2.18), толщина нанесения соблюдалась в диапазоне 6-8 мм. Контроль за состоянием покрытия гидрогелем осуществлялся с периодичностью 8 часов до момента полного высыхания раствора гидрогеля. Микроклиматические условия варьировались в пределах: температура воздуха $7,7 \pm 0,5$ °С, относительная влажность воздуха $62,5 \pm 2\%$, атмосферное давление $100,73 \pm 0,5$ кПа.



Рисунок 2.16 – Нанесение гидрогеля на вертикальные стенки учебного штрека



Рисунок 2.17 – Нанесение гидрогеля на вертикальные стенки (бока) учебного штрека



Рисунок 2.18 – Нанесение гидрогеля на горизонтальную поверхность (кровлю) учебного штрека

Результаты наблюдений показали, что исследуемый 4%-ый гидрогель достиг полного высыхания через 78 часов после нанесения. При визуальном осмотре экспериментальной поверхности были замечены локальные зоны с остаточными скоплениями гидрогеля. Данные наблюдения полностью коррелируют с результатами предыдущих лабораторных исследований.

2.6 Выводы по главе 2

1. По результатам анализа различных составов гидрогелей отечественного и зарубежного производства целесообразно в качестве средства пылевзрывозащиты рассматривать водный раствор суперабсорбента на основе полипроп-2-еноат натрия, хлорида аммония и хлорида натрия торговой марки «Аквасин-П», отличающийся повышенной влагоудерживающей способностью, безопасностью и экологичностью.

2. В результате анализа паспортных характеристик и исследования химического состава суперабсорбента на основе полипроп-2-еноат натрия установлено, что концентрированный суперабсорбент является веществом малоопасным (4 класс по воздействию на организм человека и окружающую среду), что подтверждает возможность применения в шахтных условиях еще более безопасных слабоконцентрированных водных растворов на его основе.

3. В результате исследований текучести, вязкости и адгезии установлена рациональная концентрация рабочего раствора суперабсорбента на основе полипроп-2-еноат натрия (гидрогеля), составившая 4%.

4. Использование 4%-ого гидрогеля при интенсивности пылеотложения $19,9 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ позволяет удерживать влажность осевшей угольной пыли не менее 12% до 3-х суток, при интенсивности $41,6 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ – до 1,5 суток.

5. Проведенными исследованиями на базе АО «НЦ ВостНИИ» установлено отсутствие температуры воспламенения и самовоспламенения 4%-ого и 6%-ого гидрогелей, что подтверждает их пожаровзрывобезопасность и возможность применения в угольных шахтах опасных по газам и пыли.

6. Результаты исследований по определению химических, адгезионных, влагоудерживающих и пылеулавливающих свойств гидрогеля подтверждают безопасность, возможность и целесообразность его применения в качестве альтернативного осланцеванию способа пылевзрывозащиты для ряда горных выработок.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВИТАНИЯ, ПЫЛЕОСАЖДЕНИЯ И ПЫЛЕЗАКРЕПЛЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Для обеспечения пылевзрывобезопасности горных выработок необходимо иметь представление об основных факторах, влияющих на вероятность взрыва угольных частиц. Также важно учитывать особенности и закономерности пылераспределения в подземных горных выработках при различных интенсивностях проветривания, пылевыведения и пылепереноса.

3.1 Факторы, определяющие взрывчатость угольной пыли

Ключевые параметры, влияющие на взрывоопасность угольной пыли, включают: содержание летучих компонентов (выход летучих веществ), процентное содержание золы (зольность), уровень влажности, размер частиц (дисперсность), концентрация взвешенной в воздухе пыли [34,42].

Показатель выхода летучих веществ рассчитывается как процентное соотношение массы газообразных продуктов, выделяющихся при термическом разложении угля при температуре $t = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, к исходной массе, с учетом полного удаления золы и влаги (3.1) [8]:

$$V^{daf} = \frac{m_V}{M^{daf}} \cdot 100, \% \quad (3.1)$$

где m_V – масса летучих веществ, выделяющихся при нагревании пробы угля до $t = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, г,

M^{daf} – масса пробы угля, с учетом полного удаления золы и влаги, г.

Интенсивность выделения летучих компонентов при термической обработке угля служит важным индикатором его взрывоопасности. Чем больше газообразных продуктов образуется при нагреве, тем выше вероятность взрыва пылевого облака. В Российской Федерации к опасным по взрывам пыли относят угли с выходом летучих 15% и более или с меньшим выходом летучих при установлении взрывчатости пыли лабораторными испытаниями [66]. В других странах угольная пыль считается взрывчатой при ином выходе летучих веществ,

например, в Польше – 12-14%, в Великобритании – 20% [96]. При содержании менее 6% уголь считается неопасным по взрывам пыли.

Зольность пыли представляет собой показатель, учитывающий содержание зольных (минеральных) компонентов в угле, и определяется по формуле 3.2 [8]:

$$A^d = \frac{m_A}{M^d} \cdot 100, \% \quad (3.2)$$

где m_A – масса несгораемого остатка, образуемого при сжигании пробы угля, мг, M^d – масса пробы угля, пересчитанная на сухое состояние, мг.

Содержание негорючих минеральных веществ в угольной пыли существенно влияет на ее воспламеняемость. Минеральные компоненты могут служить в качестве теплопоглощающего эффекта, где частицы золы аккумулируют долю тепловой энергии от источника возгорания, тем самым уменьшая общий энергетический потенциал реакции. Также зольные компоненты участвуют в разбавлении концентрации угольной пыли, снижая объемную долю горючих компонентов в воздушной смеси. Важным фактором является способность золы подавлять процесс выделения летучих веществ при термическом разложении угля, что существенно замедляет цепную реакцию. При зольности угольной пыли 15% и содержании летучих веществ 21% нижний предел взрываемости смеси повышается до 80 г/м³[34].

Влажность пыли определяет содержание влаги в угле. По сравнению с негорючими минеральными примесями вода оказывает более значительное воздействие на взрывоопасные свойства пылевых частиц за счет своей высокой теплоемкости. Повышенное содержание влаги препятствует взметыванию осевшей пыли, не позволяя перейти во взвешенное состояние. При влажности 12% осевшая пыль не может перейти во взвешенное состояние, а также величина теплового импульса будет расходоваться на испарение этой влаги, а не на поддержание химической «взрывной» реакции.

Размер частиц пыли (дисперсность пыли). Наибольшую опасность представляют частицы размером 10 до 75 мкм. При уменьшении диаметра пылинок до 10 мкм их взрывоопасность увеличивается по следующим причинам: во-первых, мелкодисперсная пыль дольше сохраняется во взвешенном состоянии

из-за сниженной скорости седиментации; во-вторых, возрастает удельная поверхность контакта с кислородом, что ускоряет окислительные процессы; в-третьих, усиливается нагрев частиц и выделение летучих компонентов, что способствует развитию взрывной реакции. (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Продолжительность осаждения частиц пыли [8]

Наименование показателей	Значение показателей				
Диаметр частиц d	100 мкм	10 мкм	5 мкм	0,5 мкм	0,2 мкм
Продолжительность осаждения	1,3 с	2,2 мин	9,0 мин	180 мин	2760 мин

Менее выраженными взрывчатыми свойствами обладают тонкодисперсные частицы (размером менее 10 мкм) вследствие их склонности к образованию крупных агрегатов [96].

Концентрационный предел взрываемости. Взрыв угольной пыли может произойти только при условии ее перехода во взвешенное состояние и достижения определенного концентрационного предела при соблюдении перечисленных выше факторов взрывчатости. Концентрационный предел взрываемости зависит от свойств пыли углей, наиболее важным из которых является степень метаморфизма. Наименьший концентрационный предел для угольной пыли составляет 10 г/м³. Фактический концентрационный предел взрываемости взвешенной угольной пыли определяется количеством отложившейся на почве и боках горной выработки пыли и ее концентрационным пределом взрывчатости по формуле 3.3 [34]:

$$\sigma_{отл} = 1,4 \cdot \sigma_v \quad (3.3)$$

где σ_v – нижний предел взрываемости взвешенной угольной пыли, определяемый экспериментальным путем.

В связи с этим важно рассмотреть закономерности формирования взрывоопасных концентраций пыли по длине горных выработок.

3.2 Теоретические исследования пылевой динамики

Пылевой аэрозоль образуют взвешенные твердые частицы, форма и размеры которых являются случайными величинами. Чаще всего для

классификации аэрозоля по дисперсности частиц применяют усредненное значение одного параметра (диаметра), приводящего размер частицы к форме правильного шара. В нашей стране введено понятие – аэродинамический диаметр пылевой частицы, имеющей плотность 1 г/см^3 , находящейся в различных условиях, тем самым подтверждая то, что частицы любой формы и плотности имеют одинаковый аэродинамический диаметр, если скорости их осаждения равны.

Помимо этого, размеры угольных частиц пылевого аэрозоля могут выражаться через стоксовский диаметр, который, в отличие от аэродинамического, не зависит от плотности частицы [78].

Однако, выполнение всех параметров аэродинамического диаметра можетт составить известные трудности, так как невозможно определить плотность определенной частицы и привести ее к условной плотности 1 г/см^3 , а скорость осаждения частицы не может отслеживаться индивидуально. В основных методах исследований состава аэрозолей (микроскопический, ситовой) размеры частиц определяются по геометрическим показателям. В таком случае используются: диаметр Мартина – длина линии, разделяющей угольную частицу пополам, диаметр Ферета – максимальное расстояние между краями частицы, диаметр проектируемой поверхности – площадь круга, имеющего площадь, как видимая проекция частицы.

Современные исследования в области пылевой динамики в угольных шахтах позволили разработать комплекс математических моделей, описывающих поведение пылевых образований в горных выработках. В настоящее время существуют множество уравнений, которые с различной степенью точности описывают процессы распределения и осаждения пылевого облака или одной угольной частицы. [11,12,26,44,61,72,79,91,94].

Вопросы распределения угольной пыли по длине выработки и изменение ее концентрации стали предметом научных исследований и были рассмотрены в работах: В.Н. Воронин [12], М.И. Нецепляев [64], К.П. Медников [61], А.С. Бурчаков и А.И. Ксенофонтова [57].

Обобщенная формула для определения запыленности на участке от источника пылеобразования $C(x)$ приведена в работе [57] (3.4):

$$C(x) = C_j e^{-\frac{x}{R}(a+b)\frac{v_1}{v_{\text{возд}}}} + \dots + C_n e^{-\frac{x}{R}(a+b)\frac{v_n}{v_{\text{возд}}}}, \quad (3.4)$$

где C_j – начальная концентрация j -ой фракции пыли,

$v_{\text{возд}}$ – скорость воздуха в выработке, м/с,

R – гидравлический радиус выработки,

a, b – эмпирические коэффициенты,

v – скорость оседания частицы, м/с,

x – расстояние от точки замера первоначальной концентрации пыли, м;

В исследованиях В.Н. Воронина ключевым элементом модели стало замедление воздушного потока вблизи стенок горной выработки. Это явление вызывает уменьшение горизонтальной скорости и одновременно увеличение вертикальной. Согласно данной модели, вертикальный воздушный поток у поверхности выработок противодействует оседанию угольных частиц и способствует длительному нахождению их во взвешенном состоянии, при этом влияние турбулентности учитывается косвенно, без детального анализа вихревых структур. Важным аспектом модели является использование векторного сложения скорости воздушного потока и скорости свободного падения частиц под действием силы тяжести. Однако, такой подход справедлив лишь для ограниченного диапазона условий, определяемых соотношением масс частиц и скоростей среды. Важным моментом является то, что прямое векторное суммирование скоростей не учитывает инерционные свойства угольных частиц, что противоречит принципам механики, а, в частности, второму закону Ньютона. Помимо этого, данная модель не соответствует результатам стендовых и шахтных исследований, проведенные С.Б. Романченко с применением лазерного и электронно-микроскопического анализа витающей и отложившейся пыли.

В результате проведенных натурных исследований пылевой динамики на шахтах Кузбасса С.Б. Романченко, В.Н. Костеренко и Ю.Ф. Руденко предложили

наиболее объективную модель изменения концентрации угольной пыли по длине выработки по формуле 3.5 [1,78]:

$$C(x, v) = C_0 - \int_0^x \int_0^{d_{max}} (k_{t.o.} C_0 f(d_j) VST + \frac{M_x(d_j)}{\sigma_{d_j} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-L_{гор})^2}{\sigma_{d_j}^2} \right] d d d x \quad (3.5)$$

где $M_x(d_j)$ – масса витающей пыли размером d_j в рассматриваемом сечении на расстоянии x от источника, мг,

C_0 – концентрация пыли в начальной точке, мг/м³,

x – расстояние между точками, где определяется концентрации пыли, м,

$k_{t.o.}$ – коэффициент турбулентного осаждения взвешенной пыли диаметром d_j на расстоянии x , м/с,

$f(d_j)$ – плотность распределения частиц пыли размером d_j , %,

d_j – диаметр частиц пыли, мкм,

V – скорость воздуха в выработке, м/с,

S – площадь сечения выработки, м²,

T – время измерения, мин.,

d_{max} – максимальный диаметр частиц пыли, мкм,

$L_{гор.}$ – дальность полета частиц с диаметром d_j , м,

σ_{dj} – среднее квадратическое отклонение для частиц соответствующего диаметра,

dd – дифференциал по переменной величине d .

Движение угольных частиц под действием гравитационных и аэродинамических сил описывается дифференциальными уравнениями на основе второго закона Ньютона, в которых время t является независимой переменной. Координаты частиц (X , Y , Z) и скорость частиц (как первая производная координат по времени) являются функциями t (3.6 - 3.8) [78]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = X \left(t, x, y, z, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right); \quad (3.6)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = X \left(t, x, y, z, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right); \quad (3.7)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = X \left(t, x, y, z, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right); \quad (3.8)$$

где X , Y , Z – компоненты равнодействующей приложенных сил,

m – масса материальной частицы.

Траектория частицы определяется начальными условиями $t = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = H$, $z_0 = 0$, $v_x = v_{x0}$, $v_y = v_{y0}$, $v_z = v_{z0}$, где v_x , v_y , v_z – проекции на оси координат скорости частицы; v_0 – начальная скорость частицы; H – высота источника пылевыведения или высота начала движения рассматриваемой частицы.

В рамках теоретического анализа процессов осаждения угольных частиц рассмотрим турбулентное осаждение мелкодисперсного аэрозоля близкими по размеру частиц, которые обозначаются как d_j . Данные частицы с учетом критерия g^I , подразделяются на:

- витающие или турбулентно осаждаемые частицы, для которых сила тяжести полностью компенсируется аэродинамическими силами. В этом случае ускорение свободного падения g не превышает ускорения, сообщаемого частице подъемными аэродинамическими силами. С учетом направления вектора скорости осаждения (вниз) результирующее ускорение осаждения $g^I \leq 0$.

- гравиметрически или турбулентно-гравиметрически осаждаемые частицы угольной пыли, движение которых определяется преимущественно силой тяжести ($g^I > 0$). Критерий g^I определяется как разница двух неотрицательных величин, одна из которых близка к величине свободного падения.

Для фракций частиц с диаметром, у которых $g^I < 0$ скорость осаждения не имеет физического смысла, поскольку основная масса угольных частиц находится во взвешенном состоянии довольно длительное время без гравитационного осаждения. Однако при движении аэрозоля вдоль горных выработок данные фракции подвергаются непрерывному осаждению под действием силы турбулентной диффузии $F_{t,d}$, начиная с участком пылевыведения и пылеобразования.

В случае гравиметрически осаждаемых фракций ($g^I > 0$) сила $F_{t,d}$ также оказывает влияние на кинетику осаждения, время пребывания частиц в аэрозольной фазе (время витания) и дальность их горизонтального переноса.

Для описания дисперсного состава пылевого аэрозоля применяют интегральную $f(d)$ и (или) дифференциальную $F(d)$ функции распределения [11], которые подчиняются нормальному закону распределения (3.9):

$$f(d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(d-m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.9)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение,

d – диаметр частицы пыли,

m – параметр нормального закона распределения, соответствующий d (50).

При проведении анализа научных трудов [76-81] определено, что особое внимание при оценке дисперсного состава угольной пыли обращается на построение кривых по гранулометрическому составу и расчет основных численных характеристик (мат. ожидания, среднего квадратического отклонения σ и дисперсии σ^2).

В настоящее время для исследования пылединамических процессов широко применяют инструменты компьютерного моделирования в программных комплексах ANSYS FLUENT и FlowVision [43,89]. Также некоторыми исследователями изучаются процессы пылеотложения в условиях реальных горных выработок с использованием подложек и задействованием современной приборной базы по измерению запыленности, однако недостаточно изучены процессы пылеотложения и пылераспределения в горных выработках при изменении не только скоростей воздушного потока, но и интенсивности пылеотложения, тем более не проводились исследования пылединамических процессов при обработке выработок гидрогелями. В связи с этим целесообразно проведение полномасштабных стендовых испытаний пылединамических процессов в новых условиях. Для соблюдения подобия процессов, протекающих в лабораторном стенде (модели) и в натуре был проведен анализ особенностей пылераспределения и пылеотложения на ряде шахт Кузбасса, которые рассмотрены в разделе 3.3.

3.3 Анализ параметров пылеотложения на шахтах Кузбасса

Проведен подробный анализ интенсивностей пылеотложения в горных выработках семи шахт АО «СУЭК-Кузбасс». Интенсивность пылевыноса и величина пылеотложения весьма вариативны в зависимости от условий ведения горных работ, свойств массива или угольного пласта в отдельно взятой выработке

на конкретной шахте. Под условиями ведения работ понимается, в первую очередь, совокупность факторов, определяющих уровень запыленности в забое, из которого пыль воздушными потоками разносится по выработкам: тип и производительность комбайна, состояние резцов на исполнительном органе, скорость движения воздуха и его влажность, сечение горной выработки. Среди свойств массива или угольного пласта, определяющих процессы пылеобразования и пылепереноса, следует выделить их прочностные характеристики, влажность, зольность, состав минеральной и органической части, плотность, смачиваемость водой и растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Фактическая интенсивность пылеотложения P_t варьируется в пределах от 0,1 до 1,3 г/м³·сут. в общешахтных выработках (путевых и конвейерных уклонах, вентиляционных и конвейерных квершлагах и штреках и др.), от 0,1 до 21,6 г/м³·сут. в проходческих забоях, от 0,2 до 42,2 г/м³·сут. в конвейерных выработках и от 0,1 до 21,0 г/м³·сут. в выработках с вентиляционной струей воздуха, исходящей из очистного забоя (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Интенсивность пылеотложения в горных выработках угольных шахт Кузбасса [46]

№ шахты	Интенсивность пылеотложения, P_t , г/м ³ ·сут.			
	Общешахтные выработки	Проходческие забои	Конвейерные выработки	Выработки с исходящей вентиляционной струей из очистного забоя
1	0,1-0,11	0,7-21,6	1,2-42,2	0,1-14,4
2	0,2-1,3	1,2-17,2	1,2	0,2-4,6
3	0,1-0,8	5,1-15,2	1,4-2,8	3,3-18
4	0,08-1,29	0,1-12,33	0,2-12,7	0,1-12,7
5	0,1-0,65	1,2-3,5	1,2	0,2-4,5
6	0,4	21,2	1,2	1,5-16,4
7	0,1-0,24	0,2-2,2	1,2-1,46	1,2-21,0

На основании анализа данных предложена укрупненная классификация горных выработок по параметру интенсивности пылеотложения (таблица 3.3)

Таблица 3.3 – Классификация горных выработок угольных шахт по интенсивности пылеотложения и периодичность их обработки инертной пылью

Классификация горных выработок угольных шахт по интенсивности пылеотложения		
Выработки	Интенсивность пылеотложения, P_b , г/м ³ ·сут.	Периодичность проведения осланцевания
Общешахтные выработки	0,1-1,2	1 раз в три месяца – 1 раз в месяц
Конвейерные выработки	1,2-10	1 раз в месяц – 1 раз в трое суток
Выработки с исходящей вентиляционной струей из очистного забоя	10-13	1 раз в трое суток – 1 раз в сутки
Проходческие и очистные забои	13-42	1 раз в сутки – 3 раза в сутки

Следует отметить, что больше всего сосредотачивается пыли в проходческих и очистных забоях, прилегающим к ним на расстоянии 25-150 м участках, в местах перегрузки угля в конвейерных выработках. При этом в ряде конвейерных выработок первой из рассматриваемых шахт в местах перегрузки горной массы значение интенсивности пылеотложения превышает нижний предел взрываемости (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Пределы взрываемости угольной пыли, отложившейся в горных выработках угольных шахт Кузбасса

№ шахты	Нижний предел взрываемости отложившейся угольной пыли, $\sigma_{отл}$, г/м ³			
	Общешахтные выработки	Проходческие забои	Конвейерные выработки	Выработки с исходящей вентиляционной струей из очистного забоя
1	34-36	36	34-36	42
2	34-45	34-45	34-45	28-34
3	32-40	40	32-40	40
4	34	34	34	34
5	35	35	35	35
6	23	26	23	23
7	34-41	34-41	34-41	34-41

Так при $\sigma_{отл} = 36 \text{ г/м}^3$, $P_t = 36,7 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$, при $\sigma_{отл} = 34 \text{ г/м}^3$, $P_t = 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ При такой интенсивности пылеотложения мероприятия по приведению выработок в пылевзрывобезопасное состояние осуществляются с периодичностью 3-4 раза в сутки. Проведенный анализ позволил получить исходные данные по интенсивности пылеотложения и параметрам горных выработок, необходимых для проведения моделирования пылединамических процессов в лабораторных условиях.

3.4 Стендовые исследования пылеосаждения по длине выработки

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 3.1, 3.2).

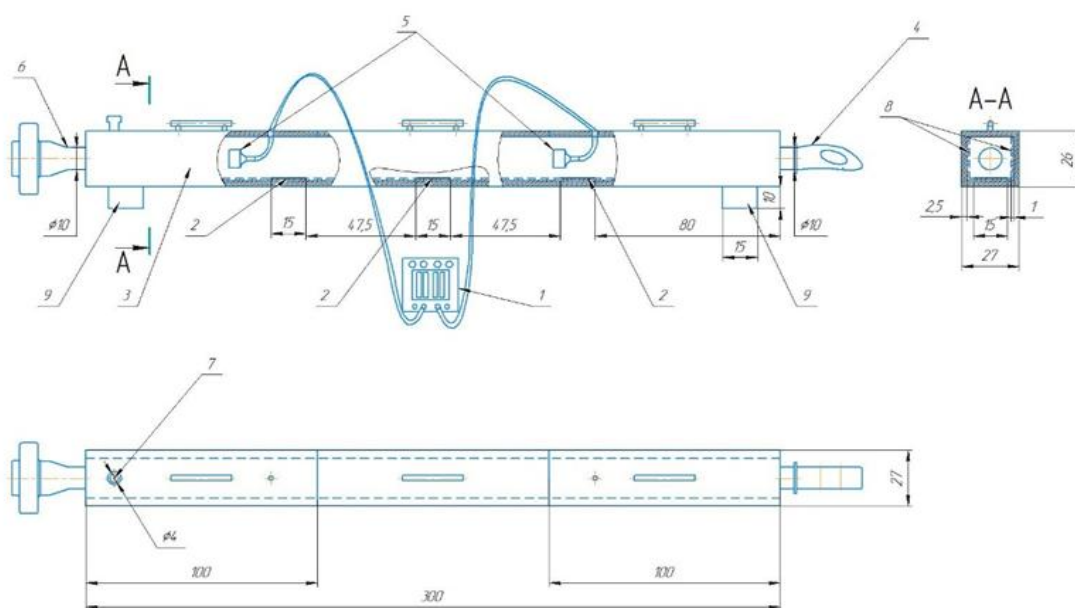


Рисунок 3.1 – Схема разработанной физической модели горизонтальной горной выработки

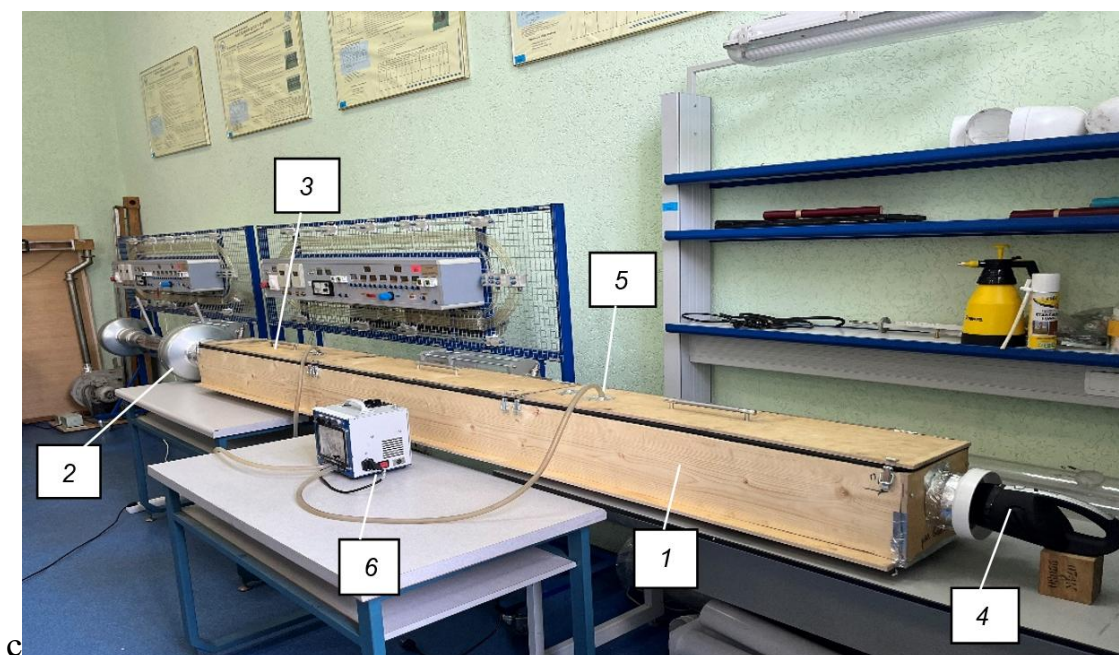


Рисунок 3.2 – Лабораторный стенд по изучению процессов пылепереноса и пылеосаждения, эффективности связывания угольной пыли гидрогелем: 1 – деревянный короб, облицованный изнутри эквивалентным материалом; 2 – вентилятор «DEVENT LT 160»; 3 – место установки загрузочного устройства для подачи угольной пыли; 4 – пылесборник; 5 – входные отверстия для гибких трубок аспиратора; 6 – четырехканальный аспиратор «АПВ-4» [48]

Параметры модели определялись с учетом геометрического, кинематического, аэродинамического (Рейнольдса и Эйлера) критериев подобия. На основе натурных данных для моделирования пылединамических процессов выбран участок горной выработки с параметрами (площадь сечения выработки $2,5 \text{ м}^2$ и протяженностью 30 метров. Для выполнения аэродинамического и кинематического подобия был проведен расчет чисел Рейнольдса по формуле 3.10 и Эйлера по формуле 3.11 для реальной горной выработки и проектируемого стенда с геометрическими параметрами [48]:

$$Re = \frac{v \cdot D_r}{\mu} \quad (3.10)$$

где v – скорость движения воздуха, м/с,

D_r – гидравлический диаметр, м,

μ – кинематическая вязкость воздуха $= 15,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Полученные результаты числа Рейнольдса для различных скоростей воздушного потока 0,5, 1, 2, 4 м/с составляет от 8272 до 66181 свидетельствуют о турбулентном движении воздуха в экспериментальном стенде.

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot v^2} \quad (3.11)$$

где ΔP – полная депрессия в стенде, Па,

v – скорость движения воздуха, м/с,

ρ – плотность воздуха = 1,184 кг/м³, при $t = 24^\circ\text{C}$.

Полученный результат числа Эйлера составляет 1,953.

Геометрическое подобие подтверждается соотношением параметров реальной горной выработки и стенда, описываемых одинаковым коэффициентом $K = 10$, полученным благодаря формуле 3.12 [48]:

$$K = \frac{l_{1,н}}{l_{1,м}} = \frac{l_{2,н}}{l_{2,м}} = \frac{l_{3,н}}{l_{3,м}} \quad (3.12)$$

где $l_{1,н}$, $l_{2,н}$, $l_{3,н}$, $l_{1,м}$, $l_{2,м}$, $l_{3,м}$ – линейные размеры трех измерений натуре и модели, K – масштаб моделирования.

Дополнительно рассматривалась возможность применения критерия Стокса, однако при моделировании пылединамических процессов в горных выработках с турбулентным движением воздуха он не применим [32].

Каждый эксперимент параллельно проводился 4 раза для получения достоверных показаний.

Основу стенда составляет прямоугольный деревянный короб квадратного сечения (поз. 1, рисунок 3.1) шириной (высотой) 0,25 м и длиной 3 м, поделенный на три отсека, каждый из которых имел сверху откидную крышку для доступа к внутренней поверхности. На внутренние поверхности стенда был нанесен слой эквивалентного материала, состоящего из песка, эпоксидной смолы ЭД-20 и полиэтиленполиамина, который позволил учесть физико-механические свойства горного массива и шероховатость поверхностей реальных горных выработок. В начале стенда установлен центробежный вентилятор «DEVENT LT 160» (поз. 2, рисунок 3.1) с механическим регулятором, позволяющим изменять скорость

движения воздуха в диапазоне от 0,5 до 4 м/с и обеспечивающим максимальную подачу до 755,00 м³/час. Вентилятор работал на нагнетание. На удалении 0,2 м по горизонтали от вентилятора на верхней части стенда располагалось загрузочное устройство с принудительной подачей угольной пыли (поз. 3, рисунок 3.1), предварительно отобранной из горных выработок действующей шахты. В конце стенда устанавливался пылесборник (поз. 4, рисунок 3.1), служащий для улавливания наиболее мелких и легких частиц угольной пыли, а также очистки воздуха, выбрасываемого в атмосферу лаборатории. С целью фиксирования запыленности внутри стенда по центру сечения устанавливались аллонжи с предварительно взвешенными фильтрами «АФА-ВП-20». Через отверстия, сделанные в крышке (поз. 5, рисунок 3.1), аллонжи соединялись гибкими трубками с входными штуцерами четырехканального аспиратора «АПВ-4» производства «НИКИ МЛТ» (поз. 6, рисунок 3.1). Запыленность определялась в 2-х точках: 1 – на расстоянии 0,8 м от начала стенда, 2 – на расстоянии 0,8 м от конца стенда. Расход прокачиваемого аспиратором воздуха выставлялся регулировочным вентилем и измерялся с помощью ротаметров, для 1-й замерной точки принимался равным 0,8 л/мин, для 2-й – 16 л/мин.

Внутри стенда по всей длине на почве была уложена пленка для сбора осаждаемой угольной пыли, а также в 3-х контрольных точках разложены подложки, выполненные из матового оргстекла и имеющие размеры 0,15×0,15 м. Крайние подложки располагались на расстоянии 0,8 м от начала и конца стенда соответственно, между 1-й и 2-й, а также 2-й и 3-ей подложками выдержано расстояние 0,475 м. Для контроля скорости движения воздуха в стенде использовались приборы «АПР-2» и «ТАММ-20». Постоянство скорости воздушного потока обеспечивалось выставлением механического регулятора в положение, соответствующее определенной частоте вращения лопаток вентилятора и выдаваемое на ЖК-дисплей. Также проводились измерения величины создаваемой в стенде депрессии, избыточного и атмосферного давлений. Для этой цели использовали воздухомерные трубки Пито, электронный и жидкостный микроманометры – «МБГО-2» и «ММН-2400» соответственно и

барометр-анероид. При проведении экспериментов фиксировали с помощью приборов различного принципа действия микроклиматические и атмосферные условия: температуру (t_b) и относительную влажность воздуха (φ_b), а также атмосферное давление ($p_{\text{атм}}$) в лаборатории. Дополнительно к указанным выше комбинированным приборам использовали ртутный термометр и термогигрометр «testo 625».

Методика проведения экспериментов предусматривала два этапа: 1 – моделирование аэро- и пылединамических процессов, протекающих при различных скоростях воздушного потока и интенсивностях пылеотложения ($0,1 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$, $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$, $2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$, $13 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$, $42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$), создаваемых подачей в стенд различных масс угольной пыли соответствующего дисперсного состава; 2 – определение эффективности пылезакрепления гидрогелем, нанесенным на внутреннюю поверхность стенда. При проведении первого этапа экспериментов оценивалось распределение угольной пыли по длине и поверхностям стенда в зависимости от интенсивности пылеотложения, определялась критическая скорость срыва пылевых частиц, что необходимо учитывать при планировании периодичности мероприятий пылевзрывозащиты горных выработок с целью снижения профессиональных рисков травмирования и гибели работников. Эксперименты проводились в следующих условиях: $t_b = 23,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$; $\varphi_b = 21,5 \pm 1 \%$; $p_{\text{атм}} = 100,2 \pm 1,5 \text{ кПа}$ [48]. По указанной методике проводились серии 4 опытов для 3-х состояний внутренней поверхности стенда: естественной, обработанной гидрогелем и обработанной инертной пылью.

Методика исследований, проводимых в несколько этапов, заключалась в следующем:

1. Проводились расчеты масс навесок угольной пыли, которые необходимо было подать в стенд при разных скоростях создаваемого воздушного потока, чтобы интенсивность пылеотложения (P_t) внутри модели соответствовала реальным значениям интенсивностей пылеотложения в различных типах горных выработок действующих угольных шахт и принятых равными $0,1$; $1,2$; $2,4$; 13 и $42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$.

2. Осуществлялась постепенная равномерная подача навесок угольной пыли в стенд в течение 10 минут каждая при установлении скорости воздушного потока 0,5, 1, 2, и 4 м/с. При этом параллельно работало пробоотборное устройство (аспиратор) с выставленными расходами воздуха.

3. По окончании загрузки пыли в стенд выключался вентилятор и аспиратор, фильтры с осевшей на них угольной пылью вынимались из аллонжей и взвешивались. Весовым методом определялась масса угольной пыли, осевшей на каждой из подложек, на почве за исключением подложек, а также масса пыли, попавшей в контейнер пылесборника.

4. Проводились расчеты по распределению осевшей угольной пыли на разных поверхностях моделируемой выработки (почве, боках и кровле не обработанных и обработанных гидрогелем), составлялся баланс поступившей в стенд и осевшей пыли, рассчитывались значения запыленности.

Полученный баланс пылераспределения по стенду при различных аэро- и пылединамических нагрузках представлен на рисунках 3.3 и 3.4. Исходные данные для проведения опытов приведены в таблице 3.5.

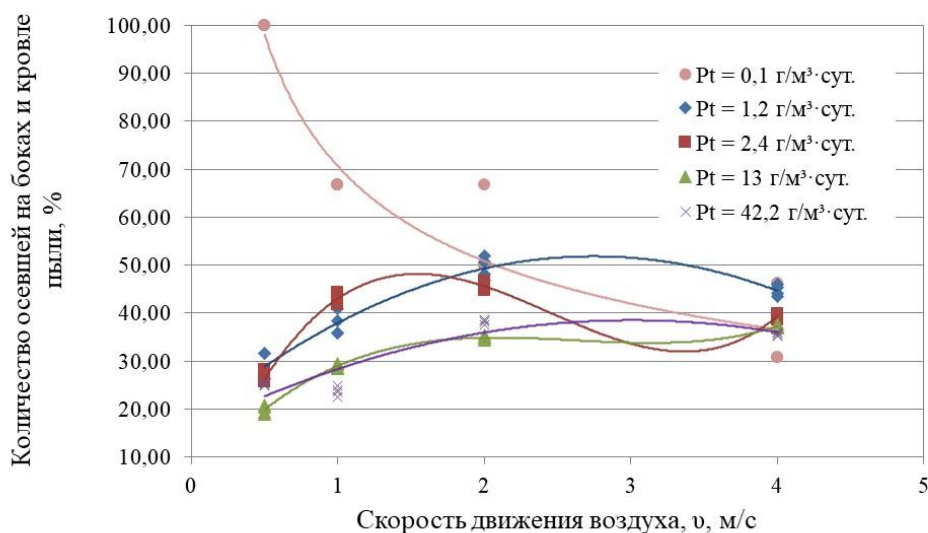


Рисунок 3.3 – Зависимость количества пыли, осевшей на боках и кровле модели выработки, от скорости движения воздуха при различных значениях интенсивности пылеотложения [48]

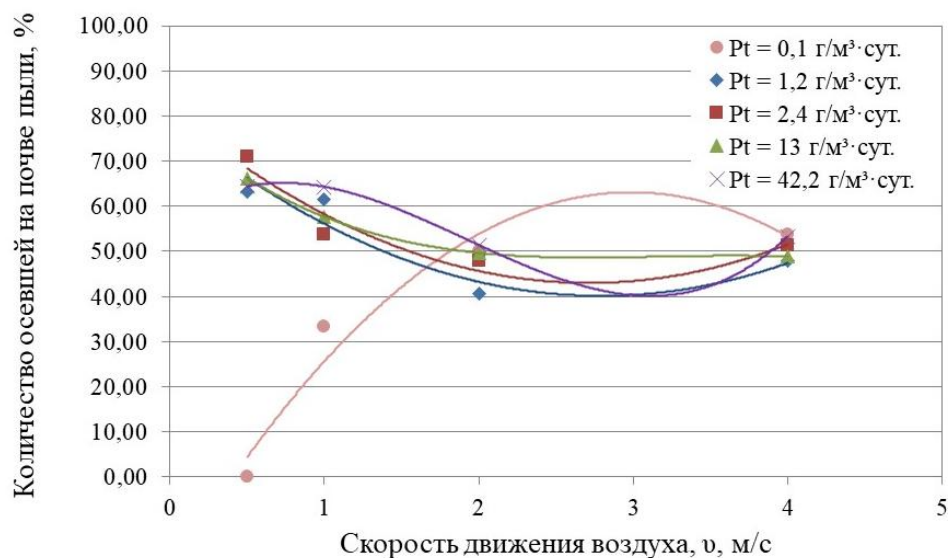


Рисунок 3.4 – Зависимость количества пыли, осевшей на почве модели выработки, от скорости движения воздуха при различных значениях интенсивности пылеотложения [48]

Таблица 3.5 – Расчет массы навески угольной пыли подаваемой в стенд

№ эксперимента	Интенсивность пылеотложения	Скорость, подаваемая в стенд, м/с	Масса исходной навески, мг	Расход воздуха, м³/мин	Время измерения, мин
1	0,1 г/м³·сут	0,5	0,5	1,2	10
2		1	1,5	2,4	10
3		2	3	4,8	10
4		4	6,5	9,6	10
1	1,2 г/м³·сут	0,5	9,5	1,2	10
2		1	19,5	2,4	10
3		2	39,5	4,8	10
4		4	79,5	9,6	10
1	2,4 г/м³·сут	0,5	19,5	1,2	10
2		1	39,5	2,4	10
3		2	79,5	4,8	10
4		4	159	9,6	10
1	13 г/м³·сут	0,5	108	1,2	10
2		1	216	2,4	10
3		2	432,5	4,8	10
4		4	865,50	9,6	10
1	42,2 г/м³·сут	0,5	351,5	1,2	10
2		1	703	2,4	10
3		2	1406	4,8	10
4		4	2812,5	9,6	10

Исходя из приведенных результатов следует несколько выводов:

- при малой концентрации пылевых частиц в воздухе, соответствующей минимальной величине интенсивности пылеотложения ($P_t = 0,1 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$) и минимальной скорости движения воздуха, равной 0,5 м/с, частицы практически сразу после выхода из загрузочного отверстия во внутреннее пространство стенда попадают на боковые поверхности модели, не достигнув почвы; по мере увеличения скорости воздушного потока от 1 до 4 м/с и массы пыли, подаваемой в стенд с учетом сохранения постоянства величины интенсивности пылеотложения (P_t), отмечается рост массы осевшей на почве пыли при пропорциональном снижении ее количества на боках и кровле;
- при интенсивностях пылеотложения от 0,1 до 42,2 г/м³·сут., наблюдается единый характер распределения пылевых частиц;
- при увеличении скорости воздуха от 0,5 до 2 м/с доля частиц, закрепившихся на боках и кровле постепенно увеличивается, при скоростях более 2-3 м/с доля осевшей на почве пыли резко возрастает, что свидетельствует о срыве частиц, ранее закрепившихся на боках и кровле.

Исследование пылевой динамики по длине модели показало в высокой степени корреляцию полученных авторами результатов с теоретическими и экспериментальными данными других ученых [31,96]. Масса пыли, выпадающей из запыленного воздуха в первой трети части стенда и, в частности, на первой подложке ($r = 0,9 \text{ м}$), при различных варьируемых параметрах (изменении скорости воздушной струи и количестве подаваемой пыли) была стабильно больше по сравнению с массой пыли, оседающей на последующих участках ($r = 1,4$ и $r = 2 \text{ м}$).

3.5 Исследование процессов пылезакрепления по длине выработки, обработанной гидрогелем

Для оценки эффективности пылезакрепляющих свойств гидрогеля были проведены серии экспериментов по ранее описанной методике при максимальной скорости воздушного потока 4 м/с и высоких значениях интенсивности

пылеотложения – 2,4; 13 и 42,2 г/м³·сут. По окончании опытов определялась масса пыли, которая оседала по всей площади почвы модели, включая пылеотложение на подложках, и которая попадала в пылесборник, расположенный за пределами основной части стенда, а также на фильтры. Из уравнения баланса рассчитывалась масса пыли, осевшей на боках и кровле выработки (3.13) [48]:

$$M_{\text{нав.}} = M_{\text{подл.}} + M_{\text{почв.}} + M_{\text{фил.}} + M_{\text{пылесбор.}} + M_{\text{бок.кр.}} \quad (3.13)$$

где $M_{\text{нав.}}$ – масса исходной навески угольной пыли, взятой для проведения эксперимента и подаваемой в стенд, мг,

$M_{\text{подл.}}$ – суммарная масса пыли, осевшей на разложенных подложках, мг,

$M_{\text{почв.}}$ – масса пыли, собранной с почвы модели за исключением пыли, осевшей на подложках, мг

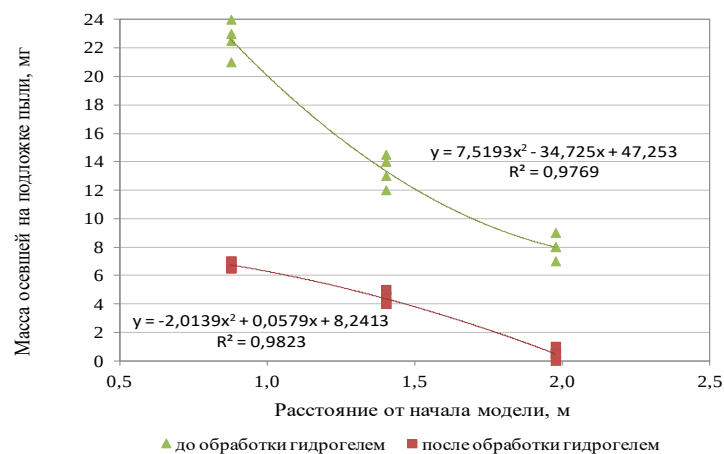
$M_{\text{фил.}}$ – масса пыли, осевшей на фильтрах для измерения концентрации пыли, расположенных в двух сечениях, мг,

$M_{\text{пылесбор.}}$ – масса пыли, осевшей в пылесборнике, мг,

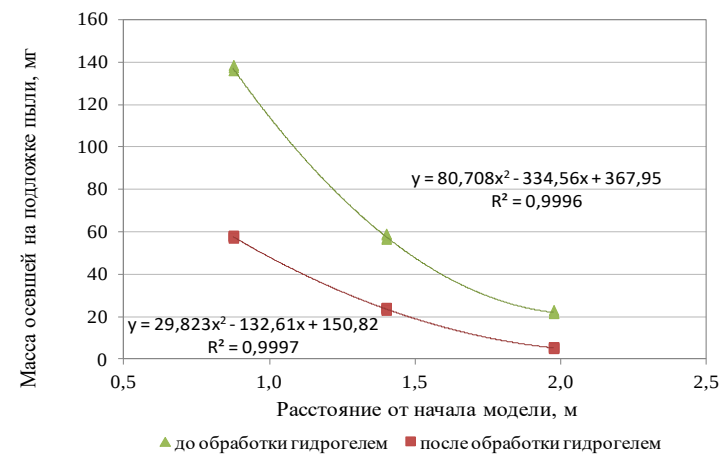
$M_{\text{бок.кр.}}$ – масса пыли, закрепившейся на боковых поверхностях и кровле модели, мг.

На рисунке 3.5 и в таблице 3.6 приведены результаты экспериментов, отражающих положительную динамику в снижении количества пыли, оседающей на почве и отдельно взятых подложках, расположенных по длине стенда, при обработке поверхностей модели гидрогелем.

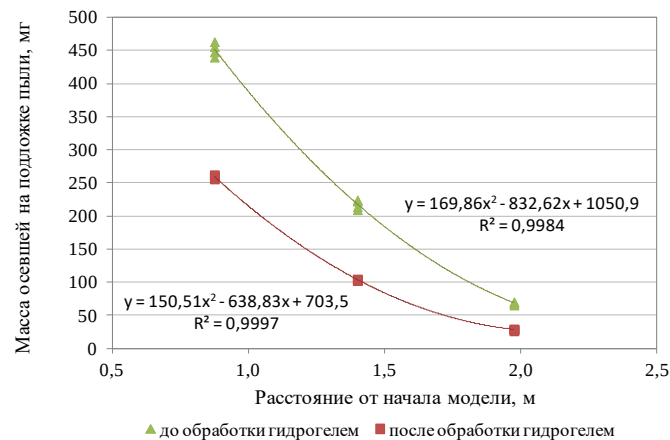
На основании сравнения средних значений массы пыли, осевшей на внутренних поверхностях стенда, до его обработки гидрогелем и после можно сделать вывод, что в зависимости от интенсивности пылеотложения масса пыли, выпадающей из воздуха на почву, при обработке внутренних стенок стенда (за исключением почвы) 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. Приведенные данные свидетельствует о достаточно высокой эффективности предлагаемого к использованию гидрогеля в отношении пылезакрепления.



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 – Зависимость массы пыли, осевшей на почве модели выработки, от расстояния и обработанности стенда гидрогелем [48]: а) при $P_t = 2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$; б) при $P_t = 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$; в) при $P_t = 42,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$

Таблица 3.6 – Результаты оценки пылезакрепляющих свойств гидрогеля [48]

№	Интенсивность пылеотложения, P_t , (г/м ³)·сут.	Масса пыли, осевшей на почве модели, мг		Массы пыли, осевшей на боках и кровли модели, мг	
		до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем	до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем
1	2,4	81,5	30,5	61,5	128,0
2	2,4	78,0	32,5	63,0	125,5
3	2,4	81,0	29,0	62,0	129,0
4	2,4	78,0	31,5	63,5	126,5
5	13,0	430,5	182,5	322,5	674,0
6	13,0	426,0	177,0	326,5	680,0
7	13,0	435,5	180,0	320,0	676,5
8	13,0	429,5	179,5	321,5	677,5
9	42,2	1498,0	853,0	999,0	1798,5
10	42,2	1511,0	865,0	1011,0	1777,0
11	42,2	1502,0	862,5	1016,5	1795,0
12	42,2	1515,0	874,0	989,0	1766,5

Концентрация пыли в стенде, измеренная практически сразу после обработки его внутренних поверхностей гидрогелем, заметно снизилась – на 79,1-83,3% – при подаче в стенд относительно небольшого количества пыли, определяемого величиной $P_t = 2,4$ г/м³·сут. (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Результаты измерения запыленности в физической модели до и после обработки ее гидрогелем [48]

№	Интенсивность пылеотложения, P_t , (г/м ³)·сут.	Среднее значение запыленности в 1-ом сечении C_1 , мг/м ³		Среднее значение запыленности во 2-ом сечении C_2 , мг/м ³	
		до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем	до обработки гидрогелем	после обработки гидрогелем
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

Увеличение интенсивности пылепоступления до значений, характерных для наиболее «пыленагруженных» участков в шахтах (выработок с исходящей воздушной струей, непосредственно прилегающих к очистным забоям, проходческих забоев, мест перегрузки углей на ленточных конвейерах), приводит к более 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% соответственно.

Для оценки пылеулавливающих и пылезакрепляющих свойств гидрогеля с учетом его постепенного высыхания в естественных условиях и забивания угольной пылью была проведена еще одна серия опытов. На внутренние поверхности стенда наносился слой гидрогеля и после его подсыхания в течение 4 часов осуществляли по ранее описанной методике подачу в стенд угольной пыли и проводили соответствующие измерения. При этом, каждый последующий эксперимент проводился уже без зачистки слоя гидрогеля, частично «напитавшегося» угольной пылью. Данный методический подход был обусловлен стремлением получения более объективных данных о пылеудерживающих свойствах гидрогеля, на который в условиях реальных горных выработок будет оказываться постоянное аэро- и пылединамическое воздействие. Исходя из анализа полученных результатов, приведенных в таблице 3.8, следует отметить, что при $P_t = 2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ даже по истечению 4 часов с момента первоначальной обработки стенда и повторных пылевых нагрузках сохраняется высокий пылеулавливающий и пылезакрепляющий эффект.

Таблица 3.8 – Результаты измерения запыленности в стенде по истечении 4 ч после обработки его гидрогелем и повторных пылевых нагрузках [48]

№	Интенсивность пылеотложения, P_t , (г/м ³)·сут.	Среднее значение запыленности		Эффективность снижения запыленности, %
		в 1-ом сечении, C_1 , мг/м ³	во 2-ом сечении, C_2 , мг/м ³	
1	2,4	62,5	3,1	79,1– 83,3
2	13	500,0	21,9	37,8 – 43,9
3	42,2	1 671,9	48,5	21,3 – 27,8

При $P_t = 13,0$ г/м³·сут. эффективность снижения запыленности несколько уменьшилась по сравнению с первоначальными значениями и составила 37,8-43,9%. При $P_t = 42,2$ г/м³·сут. пылеулавливающий эффект самый минимальный – концентрация пыли после обработки стенда гидрогелем, который подсыхал в течение 4 часов в естественных условиях, ниже по сравнению с запыленностью в необработанном стенде на 21,3-27,8%.

Исходя из понимания того, что в шахтных условиях преимущественно постоянные пылединамические нагрузки, а не циклические, как при проведении стендовых испытаний, был сделан вывод о нецелесообразности применения гидрогеля для обработки горных выработок с чрезвычайно высокой запыленностью и интенсивностью пылеотложения, превышающей 13 г/м³·сут.

3.6 Выводы по главе 3

1. Основными факторами, влияющими на взрывчатость угольной пыли, являются: выход летучих веществ, зольность, влажность, дисперсность, а также концентрация взвешенной в воздухе угольной пыли. Нижний концентрационный предел взрываемости определяется степенью метаморфизма угольной пыли, влияющей на выход летучих веществ, а его достижение определяется особенностями пылеотложения и пылераспределения в горных выработках.

2. Существующие данные теоретических исследований пылединамических процессов не отражают особенности пылераспределения при вариативности параметров интенсивности пылеотложения и в условиях обработки горных выработок гидрогелем.

3. При интенсивностях пылеотложения от 0,1 до 42,2 г/м³·сут. наблюдается единый характер распределения пылевых частиц – при увеличении скорости воздуха от 0,5 до 2 м/с доля частиц, закрепившихся на боках и кровле постепенно увеличивается, при скоростях более 2-3 м/с доля осевшей на почве пыли резко возрастает, что свидетельствует о срыве частиц, ранее закрепившейся на боках и кровле. Скорость 2-3 м/с можно считать критической скоростью, при которой происходит срыв пылевых частиц, влияющий на пылераспределение в горных выработках и формирование наиболее взрывоопасных зон. Данный параметр рекомендуется учитывать при расчете периодичности обработки горных выработок инертной пылью или пылесвязывающими составами.

4. Эффективность пылезакрепления гидрогелем подтверждается сокращением массы пыли, осевшей на почве физической модели на 42,7-61,2%, увеличением массы пыли на боковых поверхностях и кровле на 43,7-52,3% (в 1,8-2,1 раза) и снижением запыленности в стенде на 21,3-27,8% (после подсыхания гидрогеля через 4 часа) - 79,1-83,3% (в свежеобработанной выработке).

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ

4.1 Натурные испытания эффективности применения гидрогеля в условиях шахт АО «СУЭК-Кузбасс»

На основании ранее проведенного анализа интенсивности пылеотложения все горные выработки шахт АО «СУЭК-Кузбасс» по данному параметру можно разделить на 4 основные группы: 1 - с низкой интенсивностью пылеотложения 0,1-1,2 г/м³·сут. (общешахтные выработки), 2 – со средней интенсивностью пылеотложения 1,2-10 г/м³·сут. (конвейерные выработки), 3 – с высокой интенсивностью пылеотложения 10-13 г/м³·сут. (выработки, прилегающие к очистному забою с исходящей вентиляционной струей), 4 – с очень высокой интенсивностью пылеотложения 13-42 г/м³·сут. (проходческие и очистные забои, места перегрузки и прилегающие к забою участки длиной до 50 м).

Для определения рациональной области применения гидрогеля в угольных шахтах были проведены натурные испытания в шахте им. А.Д. Рубана. Поле шахты имени А.Д. Рубана расположено в северо-западной части Красноярского геологического участка, входящего в структуру северо-восточной зоны Ленинского геолого-экономического района Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасс). Данное горнодобывающее предприятие, ранее именовавшееся шахтой «Красноярская» (до 2013 года), входит в состав АО «СУЭК-Кузбасс» и административно относится к территории Ленинск-Кузнецкого и Беловского районов Кемеровской области. В пределах шахтного поля отрабатываются угольные пласты Надбайкаимский, Байкаимский и Полысаевский II. По показателю относительной метанообильности шахта является сверхкатегорийной. На шахте им. А.Д. Рубана добывается уголь марок Д и ДГ, пыль которых является взрывоопасной.

Методика шахтных испытаний включала приготовление на поверхности угольной шахты 4%-ого гидрогеля, его доставку в подземные горные выработки и

проведение обработки небольших участков (размером примерно 2×3 м) на боках выработок. Для проведения экспериментов выбирались различные типы горных выработок, отличающиеся интенсивностью пылеотложения, расположением источников пылевыведения и микроклиматическими параметрами. В местах проведения опытов проводились замеры температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, атмосферного давления и запыленности. Для определения микроклиматических параметров и атмосферного давления использовали приборы «ТГО-2МП» и «АПР-2М». Определялась средняя максимально-разовая концентрация (МРК) в начале (C_n) и конце (C_k) участка протяженностью 40 метров, в пределах которого обрабатывались гидрогелем секторы с ранее указанными размерами. Также замеры запыленности проводились в 0,4-0,6 метрах от бока выработки в сечении, расположенном на удалении 5 метров от конца, обработанного гидрогелем участка ($C_{p.t.n.}$ и $C_{p.t.k}$ соответственно до и после обработки гидрогелем). Для проведения замеров запыленности применялись прибор «ПКА-01», также анализировались данные, снятые с мульти измерительных комплексов «МИК-01», входящих в МФСБ. После нанесения слоя гидрогеля в последующие дни осуществлялось наблюдение за состоянием его поверхности, а также систематически отбирались пробы для контроля влажности смеси «угольная пыль + гидрогель» и определения массы осевшей углепородной пыли. В связи с этим для проведения шахтных испытаний, были выбраны участки в тех горных выработках, где интенсивность пылеотложения не превышала указанного значения. В частности, были взяты 4 экспериментальных участка:

№ 1 – в конвейерном наклонном стволе (КНС) на расстоянии 350 м от выхода на поверхность и в 20 м от сопряжения с конвейерным бремсбергом (рисунок 4.1);

№ 2 – в конвейерном бремсберге в 25-30 м от сопряжения с магистральным вентиляционным штреком (МВШ) (рисунок 4.2);

№ 3 – в магистральном вентиляционном штреке в 25-30 м от сопряжения с фланговым конвейерным уклоном (ФКУ) (рисунок 4.3);

Рисунок 4.2 – Экспериментальный участок №2



Результаты проведенных испытаний сведены в Таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты шахтных испытаний

Наименование параметра	Опытный участок			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Атмосферное давление, $p_{\text{атм}}$, кПа	100,533 - 100,930	101,381- 101,586	101,566 101,599	101,585 101,603
Температура воздуха, $t_{\text{в}}$, °C	13,6 -14,4	15,2-15,8	14,3-14,8	14,6-15,6
Относительная влажность, $\varphi_{\text{в}}$, %	66,8-79,1	67,5-78,9	71,1-77,0	78,7-88,8
Средняя по сечению скорость движения воздуха, $\vartheta_{\text{ср.}}$, м/с	5,869-6,045	2,556-2,742	2,630 -3,077	1,377-1,518
Скорость движения воздуха возле боковой стенки выработки, $\vartheta_{\text{пов.}}$, м/с	4,565-4,741	2,233-2,462	2,427-2,849	0,857-1,174
Средняя МРК в сечениях S_1 и S_2 , $C_{\text{н}}/C_{\text{к}}$, мг/м ³	5,7 / 5,1	12,8 / 12,6	13,0/12,6	19,7/15,4
Средняя МРК в 0,4-0,6 м от бока выработки до и после ее обработки гидрогелем $C_{\text{р.т.н.}}/C_{\text{р.т.к.}}$, мг/м ³	5,6 / 4,9	12,6 / 10,8	12,8 / 11,0	18,6 / 15,4
Тип обрабатываемой поверхности	Монолитная 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 1 неделю	91,45 86,20 – 78,50	91,76 90,55 – 77,12	91,92 86,87 – 84,68	– 94,70 92,10 –
Интенсивность пылеотложения, $P_{\text{т}}$, г/м ³ ·сут.	1,29	2,29	2,46	13,44
Периодичность осланцевания, сут.	20	11	10	2
Периодичность обработки гидрогелем	21-40	21-40	21-40	4-6
Средняя МРК в сечениях S_1 и S_2 , $C_{\text{н}}/C_{\text{к}}$, мг/м ³	5,7 / 5,1	12,8 / 12,6	13,0/12,6	19,7/15,4

Проведение шахтных экспериментов позволило уточнить ряд выводов, сделанных на основании анализа результатов ранее проведенных лабораторных и стендовых испытаний.

В частности, подтверждена высокая адгезионная, влаго- и пылеудерживающая способность гидрогеля. За все время проведения экспериментов, составившее более 1 недели, слой гидрогеля, толщиной от 4-6 до (местами) 10-12 мм, не только держался на различных вертикальных поверхностях (относительно ровных, но шероховатых (например, бетонной), неровных, но относительно гладких – угольного массива), но и удерживал оседающую на нем угольную пыль. Стоит отметить, что в условиях различных пылевых нагрузок не наблюдалось формирования на поверхности гидрогеля «корочки» или слоя из «сухой пыли». Напротив, слой гидрогеля постепенно абсорбировал пылевидные частицы внутрь с внешней поверхности, таким образом обеспечивая должный уровень пылевзрывозащиты. Влажность смеси за одну неделю снизилась не более чем на 19%, исходя из чего можно предположить, что при средней интенсивности пылеотложения, равной $P_t = 2,4 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ и приведенных выше микроклиматических параметрах «пылевзрывозащитный эффект» сохранится на протяжении 3-5 недель, что в 2-3,5 раза дольше по сравнению с продолжительностью эффекта от осланцевания. Даже с учетом повышения температуры воздуха в летний период и снижения влажности, предполагается, что гидрогель сохранит свой защитный эффект дольше осланцевания. Для участков выработок со средней интенсивностью пылеотложения $P_t = 13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ продолжительность действия гидрогеля будет определяться в большей степени не его влажностью, а степенью забивания угольной пылью. Как показали исследования 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 при этом приближался к максимальному. В данном случае срок «эффективного действия» гидрогеля составляет 4-6 суток, что больше, чем в 2 раза по сравнению с осланцеванием. Следует отметить, что нормативная 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. Также следует отметить, что прилегающие к лаве участки выработок протяженностью до 50 м, имеют недолгий срок службы, не более 5-9 дней с учетом скорости подвигания очистного забоя 9,5-6 м/сут. В данных условиях применение гидрогеля будет предпочтительным. Что касается горных выработок с более высокой интенсивностью пылепоступления и пылеотложения более $13,0 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$, то их обработка гидрогелем вместо осланцевания будет неэффективной вследствие быстрого «забивания» пылью. В общешахтных выработках с малой интенсивностью пылеотложения (менее $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$) и высокими скоростями воздушного потока 4,5-7 м/с применение гидрогеля также нецелесообразно по причине необходимости повторного нанесения гидрогеля или его увлажнения с периодичностью выше частоты нанесения инертной пыли, так как для таких выработок осланцевание проводится 1 раз в 21-40 дней, при этом эффект применения инертной пыли по истечению этого срока в связи с низкой интенсивностью пылеотложения может оставаться еще дольше.

Анализ данных по запыленности позволяет отметить незначительное локальное ее снижение в диапазоне 12,5-14,3% при использовании гидрогеля на участках с интенсивностью пылеотложения $P_t = 1,29-2,46 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ и на 17,2% на участке с $P_t = 13,44 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ Для того, чтобы сделать однозначные выводы по эффективности снижения запыленности, требуется проведение масштабных замеров на участках выработок, обработанных по всему периметру гидрогелем и значительно большей протяженности.

Таким образом, применение гидрогеля в указанных условиях позволяет снизить периодичность обработки горных выработок и контроля за их состоянием по сравнению с осланцеванием, что снижает трудоемкость процесса и повышает надежность пылевзрывозащиты, за счет чего достигается более высокий уровень обеспечения безопасности труда работников угольных шахт.

Для выработок с очень высокой интенсивностью пылеотложения свыше $13 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ (4 группа), замена осланцевания применением гидрогеля нецелесообразна из-за относительного быстрого накопления пыли в вязком слое и потерей им абсорбирующей способности.

В общешахтных выработках с малой интенсивностью пылеотложения (1 группа) и высокими скоростями воздушного потока $4,5-7 \text{ м/с}$ применение гидрогеля также нецелесообразно по причине необходимости повторного нанесения гидрогеля или его увлажнения с периодичностью выше частоты нанесения инертной пыли.

По итогам проведенных шахтных испытаний можно рекомендовать применение гидрогеля вместо осланцевания для подземных горных выработок, оснащенных ленточными конвейерами, и выработок, прилегающих к очистному забою, при учете микроклиматических условий и интенсивности пылеотложения от $1,2 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ до $13 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ Исходя из этого, что общий объем указанных типов выработок составляет более 50% от общего числа выработок, то реализация предложенного технического решения представляется целесообразной и позволит значительно повысить безопасность труда.

4.2 Параметры, техника и технология нанесения гидрогеля на поверхность горной выработки

Для широкомасштабного применения в условиях угольных шахт была разработана и предложена технология приготовления и нанесения гидрогеля, предусматривающая как ручной, так и механизированный способы реализации. Процесс приготовления концентрированных растворов гидрогелей осуществляется в поверхностном комплексе на стандартном оборудовании (например, в контактном чане с мешалкой или еврокубе с мембранным насосом). Транспортировка гидрогеля в подземные выработки угольных шахт и его механизированное нанесение осуществляется с помощью дизель-гидравлических локомотивов (ДГЛ), оборудованных автоматизированной системой подачи (разбрызгивания), принцип действия которой аналогичен устройству «Буран» для процессов осланцевания (рисунок 4.5).

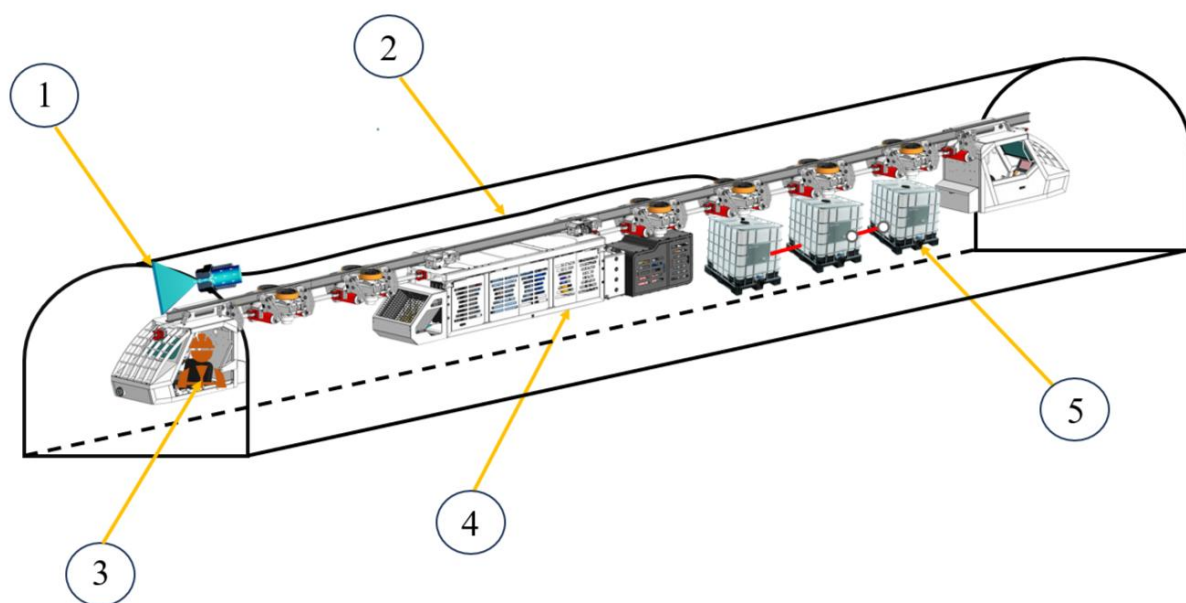


Рисунок 4.5 – Схема нанесения гидрогеля автоматизированным способом:

1 – распылительная форсунка; 2 – система подачи гидрогеля;

3 – машинист дизелевоза; 4 – дизелевоз; 5 – еврокубы с гидрогелем

Отличительной особенностью данного способа является возможность одновременного размещения на ДГЛ необходимого количества еврокубов с гидрогелем и соединения их в единую систему, в то время как для осланцевания требуется постоянное проведение погрузочно-разгрузочных операций «бигбэгов» ручным способом, тем самым снижается тяжесть труда шахтеров. Альтернативный ручной способ обработки выработок гидрогелем предполагает нанесение его с помощью стандартного рукава и насосного оборудования, подключенного к емкости с гидрогелем. Осланцевание, в свою очередь, проводимое ручным способом, также характеризуется высокой тяжестью процесса, предполагающего постоянное перемещение и подъем мешков с инертной пылью массой 50 кг. Сравнивая оба процесса, можно сделать вывод, что осланцевание, проводимое как ручным, так и автоматизированным способом, сопряжено со значительными физическими нагрузками, обусловленными необходимостью постоянного перемещения и погрузки тяжелых мешков с инертной пылью. Предлагаемая технология нанесения гидрогеля и ее потенциальное внедрение на производство демонстрирует существенное снижение трудоемкости процесса.

Работоспособность предлагаемой технологии ручного нанесения гидрогеля доказана проведением испытаний с подобранным насосным оборудованием в ООО «Карьерпроект». Установлено, что для распыления раствора гидрогеля могут быть использованы мембранные или бочковые насосы винтового типа (рисунок 4.6) с производительностью до 60 л/мин и максимальным напором до 6 Бар. В основе принципа действия мембранных насосов лежат возвратно-поступательные движения гибкой мембраны, приводимой в действие гидравлическим или механическим приводом. В свою очередь, бочковые насосы относятся к роторно-объемным насосам, в которых перекачивание жидкости осуществляется за счет вращения винта в статоре. Одним из преимуществ этих насосов является то, что срок службы довольно длителен, что при правильном техническом обслуживании обеспечит бесперебойное использование его в условиях угольных шахт.



Рисунок 4.6 – Бочковой насос винтового типа

В частности, для нанесения гидрогеля ручным и автоматизированным способом может быть использован насос GTB4-LLA10-1100, стоимость которого составляет 190 тыс. руб., что существенно ниже затрат на автоматизированные системы нанесения инертной пыли и делает его экономически выгодным решением для промышленного применения.

Методика эксперимента подразумевала приготовление в емкости объемом 50 литров гидрогеля рабочей концентрации, прокачивание гидрогеля в различных режимах насосным оборудованием различного типа и различными

характеристиками. Прокачка гидрогеля осуществлялась через гибкий шланг в двух режимах: без насадки (для оценки базовых характеристик потока) и с насадкой (для увеличения напора и изучения дисперсности распыла) (рисунок 4.7).

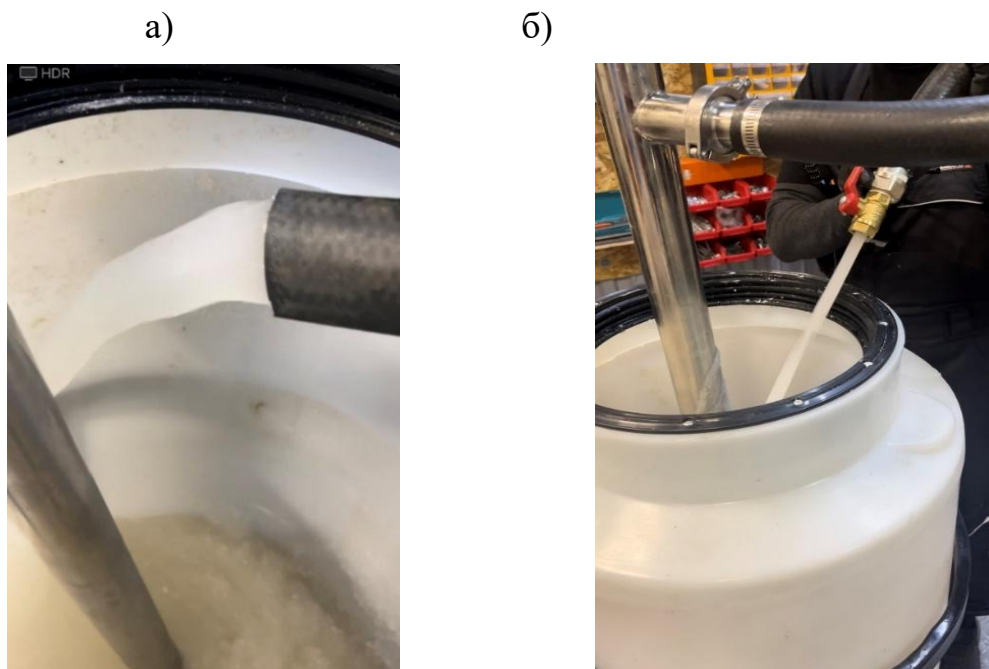


Рисунок 4.7 – Подача гидрогеля а) без насадки; б) с насадкой

В ходе эксперимента регистрировались скорости подачи раствора, равномерность распределения гидрогеля и влияние конструктивных особенностей насадки на формирование струи. Использование бочкового винтового насоса обусловлено его способностью работать с высоковязкими средами без значительного снижения коэффициента полезного действия (КПД). Полученные данные позволяют оценить перспективность применения данного типа насосов для нанесения гидрогелевых растворов в условиях угольных шахт. Предлагаемая технологическая схема приготовления и использования гидрогеля в подземных горных выработках с применением подобранного насосного оборудования позволит существенно снизить трудоемкость технологического процесса по сравнению с традиционным методом осланцевания. Ключевым преимуществом разработанной технологии нанесения гидрогеля ручным способом является модульная конструкция распылительного узла, предусматривающая возможность

установки различных сменных насадок на выходном рукаве с целью увеличения площади обрабатываемой поверхности и расстояния, что важно учитывать при обработке выработок, оснащенных ленточными конвейерами.

4.3 Оценка снижения профессиональных рисков при замене сланцевой пыли гидрогелем

При оценивании потенциального риска возникновения взрыва угольной пыли в выработках, обработанных инертной пылью и гидрогелем, необходимо учитывать эксплуатационные характеристики средств пылевзрывозащиты, включая эффективность их действия и требуемую периодичность нанесения. Эффективность взрывоподавления при использовании инертной пыли составляет 95-99% при условии соблюдения нормы и периодичности осланцевания. Эффективность действия гидрогеля в отношении предотвращения взрывов угольной пыли будет несколько выше по сравнению с осланцеванием, что обусловлено повышенным пылесвязывающим и увлажняющим эффектом, а также отсутствием значительного влияния на защитные свойства гидрогеля повышенной влажности воздуха. В случае с инертной пылью попадание влаги в нее критично, т.к. приведет к слеживаемости инертной пыли и не позволит создать «облако» с достаточной для гашения теплового импульса концентрацией, что повышает вероятность взрыва угольной пыли. Снижение профессиональных рисков при замене осланцевания горных выработок угольных шахт на обработку их гидрогелем достигается за счет в т.ч. повышения надежности организационных мероприятий по проведению указанных процедур. Рассмотрим данный аспект более подробно. В выработках угольных шахт с интенсивностью пылеотложения от 1,2 до 10 г/м³·сут. осланцовка должна проводиться с периодичностью один раз в 20-30 дней для минимального значения и один раз в трое суток для максимального. В случае более интенсивного пылеотложения (10-13 г/м³·сут.) обработка инертной пылью проводится с периодичностью один раз в трое суток и один раз в сутки соответственно. На практике периодичность осланцевания может несколько варьироваться в зависимости от степени взрывоопасности угольной

пыли, определяемой выходом летучих веществ, зольностью и, как следствие, нижним концентрационным пределом взрываемости, а также от концентрации метана, прогнозируемой в горных выработках. Для условий шахты им. А.Д. Рубана согласно данным проекта комплексного обеспыливания и данным проведенных шахтных измерений при фактической величине интенсивности пылеотложения $1,29 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ периодичность осланцевания составляет один раз в 20 дней, при интенсивности пылеотложения $2,29\text{-}2,46 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ – один раз в 10-11 дней, при интенсивности пылеотложения $13,44 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ – один раз в двое суток. Как показывает анализ статистики нарушений в области пылевзрывозащиты на угольных шахтах, отраженных в отчетных материалах Ростехнадзора, и исходя из практики, отмечается расхождение между проектными требованиями нормативных документов и фактическим графиком проведения противопылевых мероприятий. Вследствие дефицита трудовых ресурсов, загруженности внутришахтного транспорта, высокой трудоемкости процесса осланцевания, о чем ранее было уже сказано, отмечается отклонение фактической периодичности обработки выработки от нормированной в два-три раза. Например, те выработки, которые должны осланцовываться еженедельно или один раз в две недели, по факту подвергаются обработке с периодичностью один раз в 3 недели – 1 месяц, а в некоторых случаях и реже. Как показали шахтные исследования, использование гидрогеля вместо осланцевания для выработок с интенсивностью пылеотложения от $1,2$ до $13 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$ позволит сократить периодичность их обработки в 2-3 раза. Следовательно, при условии допущения примерно одинаковой эффективности в отношении взрывоподавления гидрогеля и инертной пыли, а также принимая во внимание возможность сохранения существующих организационных нарушений в проведении мероприятий пылевзрывозащиты, сокращение периодичности обработки выработок при внедрении гидрогеля позволит снизить вероятность взрыва угольной пыли и сопутствующие профессиональные риски травмирования. Вероятность нахождения выработок во взрывоопасном состоянии по причине нарушения графика проведения мероприятий пылевзрывозащиты

(осланцевания или обработки выработок гидрогелем) может быть определена по формулам 4.1 и 4.2:

$$P_{\text{нар. осл.}} = 1 - \frac{n_{\text{осл.}}}{N_{\text{осл.}}}, \quad (4.1)$$

где $P_{\text{нар. осл.}}$ – вероятность нахождения выработок во взрывоопасном состоянии из-за несоблюдения нормированного графика осланцевания, д. ед.,

$n_{\text{осл.}}$ – количество фактически проведенных осланцеваний за рассматриваемый период, шт.,

$N_{\text{осл.}}$ – нормативное количество осланцеваний по проекту комплексного обеспыливания за рассматриваемый период, шт.

$$P_{\text{нар. гель}} = 1 - \frac{n_{\text{гель}}}{N_{\text{гель}}}, \quad (4.2)$$

где $P_{\text{нар. гель}}$ – вероятность нахождения выработок во взрывоопасном состоянии из-за несоблюдения нормированного графика обработки выработок гидрогелем, д. ед.,

$n_{\text{гель}}$ – количество фактически проведенных обработок выработок гидрогелем за рассматриваемый период, шт.,

$N_{\text{гель}}$ – нормативное количество обработок гидрогелем за рассматриваемый период, шт.

Снижение вероятности нахождения выработок во взрывоопасном состоянии при их обработке гидрогелем вместо осланцевания с учетом допущения возможного несоблюдения графика проведения мероприятий пылевзрывозащиты ($\Delta P_{\text{нар. обр.}}$) определим по формуле (4.3):

$$\Delta P_{\text{нар. обр.}} = P_{\text{нар. осл.}} - P_{\text{нар. гель}} \quad (4.3)$$

На вероятность взрыва угольной пыли влияют также технические и физико-химические факторы, определяющие:

– вероятность отложения на поверхностях горных выработок угольной пыли во взрывоопасных количествах (превышающих нижние концентрационные пределы взрываемости (НКПВ)) с последующей угрозой перехода во взвешенное состояние и образованием взрывоопасных смесей ($P_{\text{НКПВ}}$, %);

– вероятность взрыва метана, приводящего к образованию ударной волны, взметывающей пыль (P_{CH_4} , %);

– вероятность возникновения теплового импульса, достаточного для инициирования взрыва угольной пыли ($P_{\text{имп.}}$, %).

Следовательно, вероятность взрыва угольной пыли в горных выработках, которые подвергаются осланцеванию ($P_{\text{взр. пыли (осл.)}}$) и которые будут обработаны гидрогелем ($P_{\text{взр. пыли (гель)}}$), можно рассчитать по формулам (4.4) и (4.5) соответственно:

$$P_{\text{взр. пыли (осл.)}} = P_{\text{нар. осл.}} \cdot P_{\text{НКПВ}} \cdot P_{\text{CH}_4} \cdot P_{\text{имп.}} \quad (4.4)$$

$$P_{\text{взр. пыли (гель)}} = P_{\text{нар. гель}} \cdot P_{\text{НКПВ}} \cdot P_{\text{CH}_4} \cdot P_{\text{имп.}} \quad (4.5)$$

Величина риска травмирования работников угольной шахты ($R_{\text{травм. осл.}}$), опасной по взрыву газа и пыли, определяется величиной риска аварии – взрыва угольной пыли ($P_{\text{взр. пыли}}$) и вероятностью нахождения работника (ов) в зоне распространения фронта пламени и ударной волны ($P_{\text{нахожд. раб.}}$) (4.6 – 4.7):

$$R_{\text{травм. (осл.)}} = P_{\text{взр. пыли (осл.)}} \cdot P_{\text{нахожд. раб. (осл.)}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

$$R_{\text{травм. (гель)}} = P_{\text{взр. пыли (гель)}} \cdot P_{\text{нахожд. раб. (гель)}} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

где $R_{\text{травм. (осл.)}}$ – риск травмирования работника (ов) в случае взрыва угольной пыли в осланцованных горных выработках, %,

$R_{\text{травм. (гель)}}$ – риск травмирования работника (ов) в случае взрыва угольной пыли в горных выработках, обработанных гидрогелем, %,

$P_{\text{нахожд. раб. (осл.)}}$ и $P_{\text{нахожд. раб. (гель)}}$ – вероятность нахождения работника (ов) в осланцованных горных выработках и выработках, обработанных гидрогелем.

Величину снижения риска травмирования персонала ($\Delta R_{\text{травм.}}$) при учете вероятности взрыва угольной пыли в выработках, подвергаемых осланцеванию, и в выработках, рекомендуемых к обработке гидрогелем, определим по разности величин соответствующих рисков (4.8):

$$\Delta R_{\text{травм.}} = R_{\text{травм. (осл.)}} - R_{\text{травм. (гель)}} \quad (4.8)$$

При условии замены осланцевания горных выработок на обработку их гидрогелем и с учетом равенства $P_{\text{НКПВ}}$, P_{CH_4} , $P_{\text{имп.}}$, $P_{\text{нахожд. раб.}}$ для выработок,

обработанных инертной пылью и выработок, обработанных гидрогелем, расчет величины снижения риска травмирования персонала ($\Delta R_{\text{травм.}}$) сведется к определению разницы вероятностей нахождения выработок во взрывоопасном состоянии из-за несоблюдения нормированного графика проведения соответствующих мероприятий пылевзрывозащиты (4.9):

$$\Delta R_{\text{травм.}} = (P_{\text{нар. осл.}} - P_{\text{нар. гель}}) \cdot 100\% \quad (4.9)$$

Приведем пример расчета снижения профессионального риска травмирования работников, обусловленного снижением вероятности взрыва угольной пыли в горных выработках, предполагаемых к обработке гидрогелем.

Рассмотрим, горные выработки с интенсивностью пылеотложения $P_v = 1,29 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут.}$. Выберем для наблюдения период времени равный $T = 120$ дней. За это время при периодичности проведения пылевзрывозащитного мероприятия – осланцевания один раз в 20 дней общее нормативное количество осланцеваний должно быть $N_{\text{осл.}} = 6$. При условии снижения периодичности обработки до одного раза в 40 дней фактическое количество проведенных процедур по осланцеванию составит $n_{\text{осл.}} = 3$. Исходя из этого $P_{\text{нар. осл.}} = 0,5$. При обработке выработок гидрогелем, опираясь на экспериментально определенный параметр требуемой периодичности нанесения – один раз в 30 дней нормативное количество обработок составит $N_{\text{гель}} = 4$. Несмотря на то, что процедура обработки выработок является менее трудоемкой по сравнению с осланцеванием, примем фактическое количество

обработок гидрогелем горных выработок равным фактически проведенному количеству осланцеваний $N_{\text{гель}} = 3$. Тогда вероятность нахождения выработок во взрывоопасном состоянии из-за несоблюдения нормированного графика обработки выработок гидрогелем составит $P_{\text{нар. гель}} = 0,25$. Величина риска травматизма работников снизится на $\Delta R_{\text{травм.}} = 25 \%$.

Аналогичным способом проводилась оценка снижения профессионального риска травмирования работников в горных выработках с другими вышеуказанными фактическими значениями интенсивности пылеотложения. Приведенные расчеты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка снижения профессионального риска травмирования работников при замене осланцевания горных выработок на их обработку гидрогелем

Наименование параметра	Значение			
Интенсивность пылеотложения в горной выработке, P_b , г/м ³ ·сут.	1,29	2,29	2,46	13,44
Периодичность осланцевания, T , сут.	20	11	10	2
Периодичность обработки гидрогелем, T , сут.	30	30	30	4-6
Нормативное количество осланцеваний за 120 дней, $N_{осл.}$, шт.	6	12	12	60
Фактическое количество осланцеваний за 120 дней, $n_{осл.}$, шт.	3	6	6	30
Нормативное количество обработок выработок гидрогелем за 120 дней, $N_{гель.}$, шт.	4	4	4	30
Фактическое количество обработок выработок гидрогелем за 120 дней, $n_{гель.}$, шт.	3	4	4	30
Снижение риска травмирования персонала при учете вероятности взрыва угольной пыли в выработках, подвергаемых осланцеванию, и в выработках, рекомендуемых к обработке гидрогелем, $\Delta R_{травм.}$, %	25	50	50	50

Таким образом, в случае замены осланцевания горных выработок на обработку их гидрогелем величина риска травмирования работников в случае реализации потенциальной угрозы взрыва угольной пыли по причине несоблюдения нормированного графика обработки снизится на 25-50 % в зависимости от типа выработки по параметру интенсивности пылеотложения. Если учитывать более высокую эффективность действия гидрогеля по сравнению с инертной пылью, то величина снижения профессионального риска травмирования будет более 50 %.

Дополнительным эффектом от использования гидрогеля в качестве средства пылевзрывозащиты горных выработок является снижение концентрации, взвешенной в них фиброгенной угольной пыли. Уменьшение запыленности позволит не только снизить негативное воздействие на горношахтное оборудование и уменьшить вероятность травоопасных ситуаций, но и, прежде всего, сократить пылевую нагрузку на органы дыхания работников. Снижение объемов вдыхаемой фиброгенной пыли позволит уменьшить профессиональный риск развития легочных заболеваний и заболеваний бронхов.

Для оценки профессионального риска, обусловленного систематическим попаданием углепородной пыли в легочную ткань и бронхи шахтеров, была взята формула (1.4), предложенная В.В. Ткачевым.

Рассчитаем величину указанного профессионального риска для работников, находящихся в тех горных выработках, для обеспечения пылевзрывобезопасности которых рекомендуется применять 4%-ный гидрогель. В частности, речь идет о механиках, электрослесарях, машинистах дизель-гидравлических локомотивов, горнорабочих, находящихся в выработках, оснащенных ленточными конвейерами (конвейерные бремсберги, магистральные вентиляционные штреки, конвейерные штреки и уклоны), а также в выработках, прилегающих к очистному забою со стороны исходящей струи воздуха (путевые и конвейерные штреки, прилегающие к лавам).

Для расчета возьмем следующие исходные данные:

– возраст рабочего 55 лет, общий стаж трудовой деятельности которого составляет 30 лет, количество лет, которые он провел в контакте с АПФД (углепородной пылью) составляет 27 лет;

– коэффициент, учитывающий содержание свободного диоксида кремния, $L_1=1$ (для угольной пыли с содержанием SiO_2 от 10 до 70%); коэффициент, учитывающий дисперсный состав частиц ингалируемой пыли, ее минеральный состав и концентрацию в воздухе рабочей зоны, $L_2 = 2,3$ (для угольной пыли с содержанием SiO_2 от 10 до 70%); коэффициент, учитывающий тяжесть труда $L_3 = 1,5$ (для категории тяжести работ II-а).

Запыленность выработок принималась исходя из данных шахтных экспериментов (Таблица 4.1) и результатов стендовых испытаний по определению эффективности пылезакрепления. Для условий конвейерных выработок, где интенсивность пылеотложения $P_t = 2,46 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$, величина риска в баллах, определяемая по таблице 1.1, при осланцевании составит 1478,82, при обработке гидрогелем с учетом снижения запыленности равна 1439,08 баллов (4.10 – 4.11):

$$R = 8,6 \cdot 55 + 6,0 \cdot 30 + 19,4 \cdot 28 \cdot 1 + 6,4 \cdot 12,8 \cdot 2,3 \cdot 1,5 = 1478,82 \quad (4.10)$$

$$R = 8,6 \cdot 55 + 6,0 \cdot 30 + 19,4 \cdot 28 \cdot 1 + 6,4 \cdot 11 \cdot 2,3 \cdot 1,5 = 1439,08 \quad (4.11)$$

По шкале, приведенной в таблице 1.1 величина риска составила 60% и 50% соответственно. Для выработок, прилегающих к очистному забою, где интенсивность пылеотложения $P_t = 13,44 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$, величина риска в баллах при осланцевании = 1606,88, при обработке гидрогелем = 1536,23 или 90% и 70% соответственно (4.12 – 4.13):

$$R = 8,6 \cdot 55 + 6,0 \cdot 30 + 19,4 \cdot 28 \cdot 1 + 6,4 \cdot 18,6 \cdot 2,3 \cdot 1,5 = 1606,88 \quad (4.12)$$

$$R = 8,6 \cdot 55 + 6,0 \cdot 30 + 19,4 \cdot 28 \cdot 1 + 6,4 \cdot 15,4 \cdot 2,3 \cdot 1,5 = 1536,23 \quad (4.13)$$

Величина снижения риска составила 20%.

С учетом результатов, полученных на экспериментальном стенде, где запыленность в среднем снижается на 40%, величина риска при обработке гидрогелем выработок с интенсивностью пылеотложения $P_t = 2,46 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ и $P_t = 13,44 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ будет равна 40% и 50% соответственно (4.14 – 4.15):

$$R = 8,6 \cdot 55 + 6,0 \cdot 30 + 19,4 \cdot 28 \cdot 1 + 6,4 \cdot 7,68 \cdot 2,3 \cdot 1,5 = 1365,77 \quad (4.14)$$

$$R = 8,6 \cdot 55 + 6,0 \cdot 30 + 19,4 \cdot 28 \cdot 1 + 6,4 \cdot 11,16 \cdot 2,3 \cdot 1,5 = 1442,61 \quad (4.15)$$

Снижение величины риска для выработок с интенсивностью пылеотложения $P_t = 2,46 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ составила 20%, с интенсивностью пылеотложения $P_t = 13,44 \text{ г/м}^3 \cdot \text{сут}$ – 40%.

Проведенные расчеты демонстрируют, что применение гидрогеля в подземных горных выработках угольных шахт обеспечивает комплексное решение проблемы профессиональных рисков. Реализация данного способа снижает риск развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии у работников шахты на 10-40% в зависимости от расположения рабочего места и величины запыленности.

4.4 Технико-экономическое обоснование разработанных мероприятий

При разработке экономической модели применения гидрогеля в шахтных условиях был проведен детальный анализ всех составляющих затрат. Основное внимание уделено расходам на закупку и обслуживание специализированного

оборудования для приготовления рабочего раствора, включая затраты на монтаж и ввод в эксплуатацию. Существенную часть расходов занимают расходы на сырьевые компоненты, при этом учитывалась необходимость их транспортировки к месту применения. Отдельно проанализированы текущие эксплуатационные расходы: потребление электроэнергии, воды, техническое обслуживание оборудования и амортизационные отчисления.

Расчеты затрат на приобретение, техническое обслуживание технологического оборудования, основные экономические показатели для использования гидрогеля и инертной пыли представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Основные экономические показатели внедряемых проектов

Название	Стоимость оборудования и его обслуживания	
	Для инертной пыли	Для гидрогеля
Стоимость установки	1 000 000 руб.	207 000 руб.
Амортизационная группа	5	5
СПИ	7 лет	7 лет
Дополнительный тариф страхового взноса	4%	4%
Стоимость материала	6 руб/кг	580 руб/кг
Вода	58 руб/м ³	58 руб/м ³
Энергия (по региону Кемеровской области)	3,02 руб/кВт·ч	3,02 руб/кВт·ч
Постоянные расходы по себестоимости (амортизационные отчисления, ФОТ рабочего)	172 700 руб.	163 300 руб.
Эксплуатационные затраты в неделю (вода, энергия, материалы)	593 500 руб.	302 900 руб.

В представленной таблице приводится детальный экономический анализ двух технологических решений для задач пылевзрывозащиты в горных выработках. Рассматриваются как капитальные, так и операционные затраты, что позволяет провести комплексную оценку экономической эффективности каждого

метода. Капитальные затраты на оборудование для автоматического нанесения инертной пыли на примере осланцевателя ОГ-1 «Буран» составляет 1 млн. руб., тогда как для гидрогелевой системы необходимо 3 еврокуба стоимостью 9 тыс. руб. и бочковой насос стоимостью 180 тыс. руб., где разница составляет 811 тыс. руб., что уже демонстрирует снижение экономических затрат по сравнению с традиционным способом. Оба технологических решения относятся к 5-й амортизационной группе (ОКОФ), что подразумевает срок полезного использования (СПИ) – 7 лет. Материальные затраты на закупку инертной пыли составляет 6 руб./кг, а гидрогеля 580 руб./кг. Промышленный тариф на воду для предприятий угольной промышленности составляет 58 руб./м³., а тариф на энергопотребление для Кемеровской области составляет 3,02 руб./кВт·ч. Для нанесения гидрогеля автоматизированным способом требуется 1 горнорабочий, когда для осланцевания необходимо 2 человека, так как подготовка «бигбэгов» массой в 50 кг довольно трудоемки для 1 человека. Численность работников определялась исходя из фактического участия шахтеров при проведении мероприятий пылевзрывозащиты. Учитывая объемы нанесения и дефицит трудовых ресурсов работу выполняет только один шахтер. Фонд оплаты труда одного рабочего составляет 160 800 рублей, который складывается из оклада, страховых взносов и дополнительный тариф в объеме 4% за класс вредности условия труда (3.2).

Срок окупаемости предлагаемого технического решения применения гидрогеля составляет 111 дней. Чистая прибыль, полученная уже во втором году эффективного применения гидрогеля, составляет 5 млн. 200 тыс. руб. для выработки длиной 1 км выработки с площадью сечения 24 м². Чистый дисконтированный доход составит 33 миллиона рублей за 7 лет внедрения предлагаемой технологии.

4.5 Выводы по главе 4

1. Проведенные шахтные эксперименты подтвердили возможность, целесообразность и эффективность применения гидрогеля вместо инертной пыли

для взрывозащитной обработки горных выработок с интенсивностью пылеотложения от 1,2 до 13 г/м³·сут.

2. Обработку горных выработок гидрогелем рекомендуется осуществлять преимущественно механизированным способом с задействованием дизель-гидравлических локомотивов, оснащенных буферными емкостями (еврокубами), соединенными в единую систему, и автоматизированными распылителями.

3. При замене осланцевания горных выработок на обработку их гидрогелем величина риска травмирования работников в случае реализации потенциальной угрозы взрыва угольной пыли по причине несоблюдения нормированного графика обработки снизится на 25-50 %.

4. Величина снижения риска развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии у персонала, задействованного при проведении работ в горных выработках с интенсивностью пылеотложения от 2,46 и 13,44 г/м³·сут. составит 10 и 40% соответственно.

5. Разработана технология приготовления, доставки и нанесения гидрогеля автоматизированным и ручным способом в шахтных условиях, произведены ее технологический расчет и экономическая оценка, доказывающие целесообразность применения гидрогеля в подземных условиях для выработки площадью 2000 м². Срок окупаемости капитальных затрат составил 111 дней, а чистый дисконтированный доход в течение 7 лет внедрения технологии составит 33 млн.руб.

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 витания и закрепления угольной пыли в горных 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айруни, А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. М.: «Горное дело» – 2011. – 261 с.
2. Апарина, Н. Ф. К вопросу о традиционных профессиональных рисках угледобычи на угольных предприятиях Кемеровской области - Кузбасса / Н. Ф. Апарина // Уголь. – 2023. – № 2(1164). – С. 45-51.
3. Баловцев, С. В. Анализ состояния безопасности в угольной промышленности России / С. В. Баловцев, О. В. Воробьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № S17. – С. 3-10.
4. Баловцев, С. В. Многофункциональные системы промышленной безопасности в угледобывающей отрасли / С. В. Баловцев, О. В. Воробьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1. – С. 31-38.
5. Баловцев, С. В. Управление производственными рисками на угольных шахтах на основе ранжирования требований безопасности / С. В. Баловцев, О. В. Воробьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 15-20.
6. Баловцев, С. В. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах / Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.
7. Болезни органов дыхания / Общая заболеваемость населения по классам, группам болезней и отдельным заболеваниям, зарегистрированным в лечебно-профилактических учреждениях. Информационно-аналитический центр Министерства здравоохранения России. – Москва, 1998.
8. Булгаков, Ю.Ф. Пылевая опасность угольного производства / Ю.Ф. Булгаков, В.Л. Овчаренко. Донецк: ООО «Цифровая типография». – 2017. – 234 с.
9. Бухтияров, И. В. Гигиенические проблемы улучшения условий труда на горнодобывающих предприятиях / Бухтияров, И. В., Чеботарев А. Г. // Горная промышленность. – 2018. – № 5. – С. 33–36. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-5-141-33-35.

10. Бюллетень «Состояние условий труда работников организаций Российской Федерации по отдельным видам экономической деятельности в 2023 году». Том 1. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), Главный межрегиональный центр (ГМЦ), опубликовано 26.04.2024.

11. Вентцель, Е.С. Теория вероятности и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, – 1988. – 480 с.

12. Воронин, В.Н. Параметры вентиляционной струи для выноса пыли из горных выработок. Борьба с силикозом. / В.Н. Воронин // Сб. статей, – М.: Изд-во АН СССР. – 1953. – Т. 1. – С. 97-114.

13. Воропаева, Е.В. Влияние гидрогеля "Аквасин" и микробиологического препарата "Экстрасол" на рост и развитие декоративных растений в условиях оранжереи / Е. В. Воропаева, И. В. Ельшаева // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2(63). – С. 84-91. – DOI:10.24412/2078-1318-2021-2-84-91. – EDN NHIFAN.

14. Галкин, С. В. Анализ опыта применения предварительно сшитых полимерных гелей при разработке высокообводненных эксплуатационных объектов в условиях низкотемпературных нефтяных пластов / Галкин С. В. Рожкова Ю. А. // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 55-64.

15. Галлямова, Д. Р. Использование гидрогелей в сельском хозяйстве: их эффективность и будущий потенциал / Д. Р. Галлямова, П. В. Комарова // XII Конгресс молодых ученых: сборник научных трудов, – Санкт-Петербург: – 2023. – С. 191-193. – EDN OPVKIQ.

16. Гендлер, С. Г. Особенности формирования у подземного персонала угольных шахт устойчивых навыков безопасной работы на основе риск ориентированного подхода / С. Г. Гендлер, А. М. Гришина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 49. – С. 401-41

17. Гендлер, С. Г. Оценка влияния на профзаболеваемость и травматизм рабочих угольных шахт г. Воркуты техногенных и социально-экономических факторов / С. Г. Гендлер, Н. Н. Даль, Е. А. Кочеткова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 217-221.

18. Гендлер, С. Г. Оценка совокупного влияния производственного травматизма и профессиональных заболеваний на состояние охраны труда в угольной промышленности / Гендлер С. Г., Прохорова Е. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-2. – С. 105-116. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105.

19. Гендлер, С. Г. Обоснование технических решений по снижению производственного травматизма в лавах угольных шахт / Гендлер, С. Г., Габов В. В., Бабырь Н. В., Прохорова Е. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 1. – С. 5-19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

20. Глебова, Е. В. Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК / Глебова, Е. В., Волохина А. Т., Вихров А. Е. // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 68–78. DOI: 10.31897/PMI.2023.12.

21. Голоскоков, С. И. Выбор оптимальной концентрации растворов поверхностно-активных веществ по отношению к пыли угольных шахт для борьбы с запыленностью / С. И. Голоскоков, Н. М. Недосекина, М. С. Сазонов, Е. И. Голоскоков, Н. А. Терентьева // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 2. – С. 5-9.

22. Голоскоков, С.И. Состояние и основные направления снижения крупных аварий на угольных шахтах / С.И. Голоскоков, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2012. - № 1. - С. 122-130.

23. Голоскоков, С. И. Метод определения смачивающей способности угольной, углепородной пыли растворами поверхностно-активных веществ / С. И. Голоскоков, Н. М. Недосекина, М. С. Сазонов, Е. И. Голоскоков, 120 Н. А. Терентьева // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 99-102.

24. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» Дата введения 01.01.1991 – М.: МВД СССР. – 1991. – 100 с.

25. ГОСТ Р 58196-2018 «Горное дело. Борьба с пылью на угледобывающих предприятиях. Термины и определения» Дата введения 01.01.2019 – М.: «ЗАО Трансуглемаш». – 2018. – 19 с.

26. Гращенков, Н.Ф. Рудничная вентиляция: справ. / Н.Ф. Гращенков, А.Э. Петросян, М.А. Фролов // М.: Недра, – 1988. – 440 с.

27. Гридина, Е. Б. Актуальность комплексной оценки негативного воздействия опасных и вредных производственных факторов на безопасность и здоровье трудящихся горнодобывающих компаний / Е. Б. Гридина, В. Ю. Гришин, З. Н. Черкай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 431-436.

28. Гридина, Е. Б. Комплексный подход и реализация принципов обеспечения промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях / Е. Б. Гридина, В. Ю. Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 437-443.

29. Гридина, Е. Б. Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе / Гридина Е. Б., Боровиков Д. О. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 114-128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.

30. Данилов, А. Г. Свойства и параметры, определяющие взрывчатость угольной пыли / Данилов А. Г., Грачев Э. А., Кульчицкий С. В., Галиев М. Г. // Евразийский Научный Журнал №8. – 2015. – С. 12-17.

31. Ермолаев, А. М. Анализ и пути снижения смертельного травматизма в угольной промышленности / Ермолаев, А. М., Кобылянский М. Т. // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2017. – № 2. – С. 91-100.

32. Зуев, Ю. В. Об использовании критерия Стокса при математическом моделировании двухфазных струйных течений / Ю. В. Зуев // Ученые записки

Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2019. – Т. 161, № 3. – С. 341-354. – DOI 10.26907/2541-7746.2019.3.341-354. – EDN QAMNTF.

33. Иванов, Ю. М., Анализ травматизма работников, обусловленного трудовым стажем. Оценка рисков травматизма / Иванов, Ю. М., Куракина Н. В., Фомин А. И., Ли Хи Ун, Ворошилов А. С. // Уголь. – 2022. – № 2. – С. 37–40. DOI:10.18796/0041-5790-2022-2-37-40.

34. Инструкция по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли. Приложение к § 262,268, 270, 271 Правил безопасности в угольных шахтах. //Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200080791> (дата обращения: 26.01.2024).

35. Ищук, И.Г. Анализ состояния запыленности воздуха в очистных забоях угольных шахт Кузбасса / И.Г. Ищук, Д.В. Ботвенко, С.В. Панов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S12. – С. 222-223

36. Ищук, И.Г. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий / И.Г. Ищук, Г.А. Поздняков // – М.: Недрa – 1991. – 153 с.

37. Кабанов, Е. И. Определение допустимого профессионального риска травмирования работников угледобывающих предприятий / Е. И. Кабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 167-180.

38. Кабанов, Е. И. Совершенствование матричного метода оценки риска для решения задач управления охраной труда / Е. И. Кабанов, А. Н. Панькин, Г. И. Коршунов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 23. – С. 31-42.

39. Кабанов, Е.И. Обоснование метода комплексной оценки и прогноза профессионального риска травмирования персонала угольных шахт при взрывах метана и пыли: дис. ...к.т.н. 05.26.01 / Кабанов Евгений Игоревич. – Санкт-Петербург. – 2018. – 159 с.

40. Кирин, Б.Ф. Концептуальные основы пылевого контроля на горных предприятиях / Б.Ф. Кирин, В.И. Дрёмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1992. – № 1. – 12-19 с.

41. Кислицына В.В., Корсакова Т.Г., Мотуз И.Ю. Особенности условий труда и профессионального риска работников, занятых при открытой добыче угля // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №4. – С. 52-55; URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=3518> (дата обращения: 25.03.2025).

42. Кобылкин, А. С. Исследование распределения частиц угольной пыли по горным выработкам / А. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S49. – С. 208-214.

43. Кобылкин, А.С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна / А.С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – 6-1. – С. 65-73. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73

44. Кобылкин, А. С. Распределение пыли различного дисперсного состава в горных выработках, в зависимости от расположения источника пылевыведения / А. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 6. – С. 291-302.

45. Конабе, К. Композиция для связывающей пыль обработки: Патент №2391375, Рос. Федерация: МПК C09K 3/22 / К. Конабе, М. Кавазое; заявитель и патентообладатель: Дюпон-Мицуи Флюорокемикалз КО., ЛТД. – 2008103204/02; заявл. 29.06.2005; опубл. 10.06.2010, – 12 с.

46. 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.

47. 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.

48. 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.

49. Корнев, А.В. Исследование дисперсного состава витающей углепородной пыли в очистных забоях угольных шахт Кузбасса / А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S6. – С. 120-131.

50. Корнев, А.В. Современные методы оценки смачивающей способности шахтных составов для пылеподавления / А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 4 (5-1). – С. 93-102.

51. Корнева, М.В. Разработка и обоснование мероприятий по снижению концентрации тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле угольных шахт: дис. ...к.т.н. 05.26.01 / Корнева Мария Валерьевна. – Санкт-Петербург, 2020. – 175 с.

52. Коробейникова, Е. А. Взрыв на шахте «Листвяжная»: рассуждения и выводы / Коробейникова Е. А., Панарина А. В., Куксова К. Д., Пудовкина А. А. // Наука России – будущее страны: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – 2022. – С. 230-235.

53. Коршунов, Г. И. Разработка инновационных технологий обеспыливания в очистных и проходческих забоях угольных шахт / Г. И. Коршунов, С. Б. Романченко // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 339-344.

54. Коршунов, Г. И. Эффективность применения поверхностно-активных веществ для борьбы с угольной пылью / Г. И. Коршунов, Е. В. Мазаник, А. Х. Ерзин, А. В. Корнев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 3. – С. 55-60.

55. 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.

56. 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.

57. Ксенофонтова, А.И. Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах / А.И. Ксенофонтова, А.С. Бурчаков. М.: Недра, 1965. – 231 с.

58. Курносков, И. Ю. Оценка влияния параметров орошения на скорость пылеосаждения в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 150–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_150.

59. Левкин, Н. Б. Предотвращение аварий и травматизм в угольных шахтах Украины. – Донецк: Донбасс. – 2002. – 392 с.

60. Литвинов, А. Р. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности в 2010-2015 годах / Литвинов А. Р., Коликов К. С., Ишхнели О.Г. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 2. – С. 6-17.

61. Медников, К.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозоля / К.П. Медников. М.: Наука, – 1987. – 174 с.

62. Мешков, Г.В. Итоги работы угольной промышленности России за январь-июнь 2024 года / Мешков Г.В., Петренко И.Е., Губанов Д.А. // Уголь. – 2024. – № 9. – С. 5-16. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-5-16.

63. Мохначук, И.И. Смертность на рабочем месте на предприятиях угольной промышленности России / Мохначук И.И., Пиктушанская Т. Е., Брылева М. С., Бетц К. В. // Медицина труда и промышленная экология. – 2023. – № 63(2). – С. 88–93. DOI: 10.31089/1026-9428- 2023-63-2-88-93.

64. Нецепляев, М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин. М.: Недра, 1992. – 298 с.

65. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р [Электронный ресурс] / Техэксперт. URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf>.

66. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: Приказ Ростехнадзора от 08 декабря 2020 г. №507 // Техэксперт. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573140209> (дата обращения: 29.01.2023).

67. Петренко, И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь – июнь 2022 года // Уголь – 2022. – № 9 – С. 7-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-7-22>.

68. Петренко, И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь-март 2024 года // Уголь. – 2024. – № 6. – С. 5-13. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-5-13.

69. Плаkitкина, Л.С. Мировые тенденции развития угольной отрасли / Л.С. Плаkitкина, Ю.А. Плаkitкин, К.И. Дьяченко // Горная промышленность. – 2019. – №1 (143). – С. 24-29.

70. Подображин, С. Н. Пути обеспечения комплексной безопасности горных работ / С. Н. Подображин, А. Г. Бабенко, В. И. Шилов // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 8. – С. 20-23.

71. Поздняков, Г.А. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности / Г.А. Поздняков, Б.Ф. Кири́н, Е.И. Воронцова, Е.И. Онтин М.: Недра, – 1982. – 233 с.

72. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст. – М.: – 1987 – 280 с.

73. Реймерс, Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. – М.: – 1990. – 637 с.

74. Романченко, С. Б. Полномасштабные исследования взрывов угольной пыли и критерии эффективности средств локализации / Романченко С. Б.,

Костеренко В. Н. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 6-20.

75. Романченко, С. Б. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок / Романченко С. Б., Нагановский Ю. К., Корнев А. В. // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 927-936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

76. Романченко, С.Б. Комплексное исследование фракционного состава угольной пыли / С.Б. Романченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 13. № 12. – С. 157-165.

77. Романченко, С.Б. Процессы седиментации взрывоопасных аэрозолей при современных технологиях добычи угля / С.Б. Романченко В.Н. Костеренко А.А. Трубицын С.С. Кубрин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 2. – С. 6–15.

78. Романченко, С.Б. Пылевая взрывоопасность горного производства / С.Б. Романченко, К.А. Лебецки. М.: Горное дело, – 2012. – 463 с.

79. Романченко, С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах / С.Б. Романченко, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», – 2011. – 256 с.

80. Романченко, С.Б. Совершенствование системы контроля пылевых нагрузок с применением гравиметрического прибора СР-10 / С.Б. Романченко, К.А. Лебецки, И.Г. Ищук // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. – № S12. – С. 256-264.

81. Романченко, С.Б. Современные методы анализа формы и дисперсного состава угольной пыли / С.Б. Романченко, И.Г. Ищук // Техника и технология открытой и подземной разработки месторождений: Науч. сообщ. / ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. – 2007. – № 333. – С. 270-286.

82. Россия в цифрах. 2023. Краткий статистический сборник / Росстат – М.: 2023. – 701 с.

83. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах»,

утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 276 от 25.07.2023. – 60 с.

84. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса Критерии и классификация условий труда Руководство Р 2.2.2006-05, утвержденное Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 29 июля 2005 г. Введен 01.11.2005. – 142 с.

85. СанПиН 2.2.3.570-96 «Гигиенические требования к предприятиям угольной промышленности и организации работ», утвержденных приказом №44 Минздрав России от 31.10.1996. Введен 01.07.1998 – 68 с.

86. СанПиН 2.2.4.548-96.2.2.4. «Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»; Введен 01.10.2001 – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России – 2001. – 20 с.

87. 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». – EDN JFIYJB.

88. Скопинцева, О. В. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах / Скопинцева О. В., Вертинский А. С., Иляхин С. В., Савельев Д. И., Прокопович А. Ю. // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 17–20.

89. Смирняков, В. В. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока / Смирняков В. В., Родионов В. А., Смирнякова В. В., Орлов Ф. А. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71-81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

90. Тарзанов, И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2016 года / И.Г. Тарзанов // Уголь. – 2017. – № 3. – С. 36-50.

91. Трубицын, А. А. Разработка системы мониторинга интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха / А. А. Трубицын, С. Н. Подображин, В. В. Скатов, Я. С. Ворошилов, С. Н. Мусинов, Д. А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 6-1

92. Трубицына, Д. А. Разработка системы непрерывного автоматического контроля запыленности и интенсивности пылеотложения как подсистемы многофункциональной системы безопасности угольной шахты / Д.А. Трубицына // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 12. – С. 58-64. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-12-58-64.

93. Трубицына, Д. А., Умные системы непрерывного автоматического контроля отложений пыли по сети горных выработок угольных шахт / Трубицына, Д. А., Подображин С. Н. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 3. – С. 6–17. 35.

94. Ушаков, К.З. Рудничная аэрология горных предприятий / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, И.И. Медведев. – М.: – Недра, – 1978. – 440 с.

95. Фомин, А. И. Анализ условий и охраны труда на предприятиях угольной отрасли Кузбасса / А.И. Фомин // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2020. – № 3. – С. 57-61. – DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.53.88.007.

96. Фомин, А. И. Исследование влияния угольной пыли на безопасность ведения горных работ / Фомин, А. И., Ворошилов Я. С., Палеев Д. Ю. // Горная промышленность. – 2019. – № 1 (143). – С. 33. – DOI: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-33-36.

97. Харченко, В. Ф. Исследование пылеотложения в горных выработках угольных шахт / В.Ф. Харченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № S30. – С. 17-23. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-17-23.

98. Хоссейни, А. Определение подходящего расстояния между скважинами дегазации метана на механизированной угольной шахте Табас (Иран)

на основе теоретических расчетов и полевых исследований / Хоссейни А., Наджафи М., Моршеди А. Х. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 1050-1060.

99. Цивилева, А.Е. Влияние санкций на работу предприятий угольной промышленности / Цивилева А.Е., Голубев С.С. // Уголь. – 2022. – № 8. – С. 84-91. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-84-91>.

100. Чеботарев, А. Г. Риски развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии у работников горнорудных предприятий / А.Г. Чеботарев // Горная промышленность. – 2018. – № 3. – С. 66–72. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-3-139-66-70.

101. Чеботарёв, А.Г. Пылевой фактор и патология органов дыхания работников горнодобывающих предприятий / А.Г. Чеботарёв // Горная Промышленность. – 2012. – № 3 (103). – С. 24-27.

102. Чеботарев, А.Г. Условия труда, профессиональная заболеваемость и медико-профилактическое обслуживание работников горнодобывающих предприятий / А.Г. Чеботарев, Г.А. Лагутина // Горная Промышленность. – 2014. – № 6 (118). – С. 75-80.

103. Чеботарёв, А.Г. Специальная оценка условий труда работников горнодобывающих предприятий / А.Г. Чеботарёв // Горная Промышленность – 2019. – №1 (143). – С. 42-46.

104. Balovtsev, S. V. Higher rank aerological risks in coal mines / Balovtsev S. V. // Mining Science and Technology (Russia). – 2022. – 7(4). – pp. 310–319. DOI:10.17073/2500-0632-2022-08-18.

105. Borowski, G. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry / Borowski G., Smirnov Y. D., Ivanov A. V., Danilov A. S. // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2020. – vol. 1. – no. 1. – pp. 1–13. DOI: 10.1080/19392699.2020.1841177.

106. Colinet, J. F. The impact of black lung and a methodology for controlling respirable dust / J. F. Colinet // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2020. – vol. 37. – no. 49. – pp. 1847–1856. DOI: 10.1007/s42461-020-00278-7.

107. Colinet, J.F. Best Practices for Dust Control in Coal Mining / J.F. Colinet, J.P. Rider, J.M. Listak, J.A. Organiscak, A.L. Wolfe // DHHS (NIOSH) Publication – 2010. – 110. – 70 p.

108. Dai, H. Experimental investigation on the inhibition of coal dust explosion by the composite inhibitor of carbamide and zeolite / Dai H., Liang, G., Yin, H., Zhao, Q., Chen, X., He, S. – Fuel 308. – 2022. – 121981. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121981.

109. Friedman, R. Inhibition of Opposed-jet Methane-Air Diffusion Flame / Friedman, R. Levy J.B. // The Effects of Alkali Metal Vapours and Organic Halides, Combustion and Flame. – 7. – 1963. – p. 195.

110. Gridina, E. B. Hazard mapping as a fundamental element of OSH management systems currently used in the mining sector / Gridina E. B., Kovshov S. V., Borovikov D. O. – 2022. – vol. 1. – pp. 107-115.

111. Harris, M. L., Sapko M. L. Floor dust erosion during early stages of coal dust explosion development / Harris M. L., Sapko M. L. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – vol. 29. – pp. 825-830. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.09.001.

112. Harteis, S. P. Review of Rock Dusting Practices in Underground Coal Mines. / Harteis S. P., Alexander D. W., Harris M. L., Sapko M. J., Weiss E. S. // PA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication. – 2017. – vol. 101. – IC 9530. – 97 p.

113. Hoebbel, C. L. Exploring worker experience as a predictor of routine and non-routine safety performance outcomes in the mining industry / Hoebbel C. L., Haas E.J., Ryan M. E. // Mining Metallurgy and Exploration. – 2022. – vol. 39. – no. 2. – pp. 485–494. DOI: 10.1007/s42461-021-00536-2.

114. Jiang, Z. Preparation and characterization of chitosan grafting hydrogel for mine-firefighting / Jiang Z., Dou G. // ACS Omega. – 2020. – vol. 5. – no. 5, pp. 2303–2309. DOI: 10.1021/acsomega.9b03551.

115. Kabanov, E. I. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings / Kabanov E. I.,

Korshunov G. I., Magomet R. D. // Journal of Applied Science and Engineering. – 2020. – vol. 24. – no. 1. – pp. 105–110. DOI: 10.6180/jase.202102_24(1).0014.

116. Korshunov, G. I. Reduction of respirable dust-induced impact on open pit mine personnel in large-scale blasting / Korshunov G. I., Karimov A. M., Magamedov G. S., Tyulkin S. A. // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2023. – no. 7. – pp. 132–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_132.

117. Liao, X. Experimental study on the wettability of coal with different metamorphism treated by surfactants for coal dust control / Liao, X., Wang B., Wang L., Zhu J., Chu P., Zhu Z., Zheng S. // ACS Omega. 2021. – vol. 6. – no. 34. – pp. 21925–21938. DOI: 10.1021/acsomega.1c02205.

118. Liu, Y. Research on flame propagation and explosion overpressure of oil shale dust explosion suppression by NaHCO_3 . / Liu Y., Zhang Y., Meng X., Yan K., Wang Z., Liu J., Wang Z., Yang P., Dai W., Li F. – Fuel 314. – 2022. – 122778. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122778.

119. Liu, Y. Preparation of dopamine-modified sea squirt cellulose hydrogel dust-fixing agent to prevent raising of dust / Liu Y., Wei Z., He M., Zhao W., Wang J., Zhao Ju. // Environmental Research. – 2023. – vol. 237. – part 1. – article 116803. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116803.

120. Luo, Y. Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions / Luo Y., Wang D., Cheng J. // International Journal of Coal Science and Technology. – 2017. – vol. 4 (2). – pp. 102-109. DOI: 10.1007/s40789-017-0168 z.

121. Maier, P. Laboratory Scaled Coal Dust Explosions and Physical Test Results for CFD Explosion Models / Maier P., Hartlieb P., Brune J. F. // Berg Huettenmaenn Monatsh. – 2020. – vol. 165. – no. 6. – pp. 265-269. DOI:10.1007/s00501-020-00985-0.

122. Mazurek, J.M. Coal workers' pneumoconiosis – attributable years of potential life lost to life expectancy and potential life lost before age 65 years / Mazurek J.M., Wood J., Blackley D.J. Weissman D.N. – United States. – 1999-2016. – 2018 – vol. 67. – pp. 819-824. DOI:10.15585/mmwr.mm6730a3

123. Mitchell, D.W., & Nagy, J.V. (1962). Water as an inert for neutralizing the coal dust explosion hazard.

124. Patra, S. K. Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing water productivity under water deficit condition / Patra S. K., Poddar R., Brestic M., Acharjee P. U., Bhattacharya P., Sengupta S., Pal P., Bam N., Biswas B., Barek V., Ondrisik P., Skalicky M., Hossain A. // Hindawi International Journal of Polymer Science. – 2022. – vol. 2022. – article 4914836. DOI: 10.1155/2022/4914836.

125. Ren, X. Novel sodium silicate polymer composite gels for the prevention of spontaneous combustion of coal / Ren X., Xue D., Li Y., Hu X., Shao Z., Cheng W., Dong H., Zhao Y., Xin L., Lu W. // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – vol. – 371, pp. 643–654. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.041.

126. Smirnyakov, V. V. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia / Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – vol. 10. – iss. 02. – pp. 1917-1929.

127. Statistical Review of World Energy, 2024 [Электронный ресурс] // URL: www.energyinst.org/statistical-review (дата обращения: 26.02.2025).

128. Thakur, P. Respirable Coal Dust, Combustible Gas and Mine Fire Control. / Thakur, P. // Advanced Mine Ventilation. – 2019. – pp. 377-398. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00023-7.

129. Tsai, Y.-T. Comparison of the inhibition mechanisms of five types of inhibitors on spontaneous coal combustion / Tsai Y.-T., Yang Y., Wang C., Shu C.-M., Deng J. // International Journal of Energy Research. – 2018. – vol. 42. – no. 3. – pp. 1158–1171.

130. Ukeles, S. D. Drilling Fluids / S. D. Ukeles, B. Grinbaum // KirkOthmer Encyclopedia of Chemical Technology. – USA: – 2004. – DOI: 10.1002/0471238961.0418091203120118.a01.pub2.

131. Wu, Y. Experimental study on the suppression of coal dust explosion by silica aerogel / Wu Y., Meng X., Zhang Y., Shi L., Wu Q., Liu L. – Energy 2023. – 267 – 126372. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126372.

132. Zhang, H., Han W., Xu Y., Wang Z. Analysis on the Development Status of Coal Mine Dust Disaster Prevention Technology in China / Zhang H., Han W., Xu Y., Wang Z. // Journal of Healthcare Engineering. 2021. – vol. 2021. – article 5574579. – pp. 1-9. DOI: 10.1155/2021/5574579.

133. Zhao, Q. Suppression mechanisms of ammonium polyphosphate on methane/coal dust explosion: based on flame characteristics, thermal pyrolysis and explosion residues / Zhao Q., Chen X.F., Li Y., Dai H.M. – Fuel 326. – 2022. –125014. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023683904

**Программа для расчета комплексного обеспыливания и
пылевзрывозащиты**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Корнев Антон Владимирович (RU), Кольвах
Константин Андреевич (RU), Спицын Андрей
Александрович (RU)*

Заявка № **2023681925**
Дата поступления **24 октября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **10 ноября 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения



СУЭК
СИБИРСКАЯ УГОЛЬНАЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ

АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО
«СУЭК-КУЗБАСС»

РОССИЯ, 652507, КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛ.,
г. ЛЕНИНСК-КУЗНЕЦКИЙ
УЛ. ВАСИЛЬЕВА, 1
ТЕЛ: (38456) 9-33-11
ФАКС: (38456) 9-34-59
E-MAIL: suek-kuzbass@suek.ru

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор
АО «СУЭК-Кузбасс»
/ Н.Л. Галсанов /
«03» 04 2025г.

АКТ

о внедрении / использовании результатов кандидатской диссертации
Спицына Андрея Александровича
по научной специальности 2.10.3 «Безопасность труда»

Специальная комиссия АО «СУЭК-Кузбасс» в составе:

Председатель: Н.Л. Галсанов, технический директор АО «СУЭК-Кузбасс»

Члены комиссии: Н.В. Ледяев, начальник управления по противоаварийной устойчивости технической дирекции АО «СУЭК-Кузбасс»

М.В. Карпов, главный специалист (по технологии обеспыливания) АО «СУЭК-Кузбасс»

А.Н. Жданов, главный инженер ПЕ «Шахта им. А.Д. Рубана» ШУ им. А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс»

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Спицына А.А. на тему: «Повышение безопасности труда работников угольных шахт по пылевому фактору с применением гидрогеля», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, представляют значительный практический интерес для Компании и могут быть применены в рамках мероприятий, проводимых в направлении совершенствования и повышения эффективности пылевзрывозащиты и комплексного обеспыливания на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

Обработка горных выработок с более высокой интенсивностью пылеотложения более 13,0 г/м³·сут. гидрогелем вместо осланцевания будет не эффективной вследствие быстрого «забивания» пылью.

В общешахтных выработках с малой интенсивностью пылеотложения ($P_t \leq 1,2$ г/м³·сут) и высокими скоростями воздушного потока 4,5-7 м/с применение гидрогеля нецелесообразно по причине необходимости повторного нанесения гидрогеля или его увлажнения с периодичностью соизмеримой с частотой нанесения инертной пыли или выше нее.

Использование водных растворов суперабсорбентов (гидрогелей) представляется перспективным решением по обеспечению надежной пылевзрывозащиты горных выработок с интенсивностью пылеотложения от 1,2 г/м³·сут до 13,0 г/м³·сут, что позволит в ряде случаев отказаться от осланцевания, тем самым снизив потребление инертной пыли и связанные с ним эксплуатационные расходы, снизить запыленность в подземных горных выработках и повысить безопасность труда.

Члены комиссии:

Начальник управления по противоаварийной устойчивости технической дирекции АО «СУЭК-Кузбасс» Н.В. Ледяев

Главный специалист (по технологии обеспыливания) АО «СУЭК-Кузбасс» М.В. Карпов

Главный инженер ПЕ «Шахта им. А.Д. Рубана» ШУ им. А.Д. Рубана АО «СУЭК-Кузбасс» А.Н. Жданов



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Протокол испытаний по определению температуры воспламенения

Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли»
(АО «НЦ ВостНИИ»)
Юридический и фактический адрес: 650002, РОССИЯ, Кемеровская область - Кузбасс, г.о. Кемеровский, г. Кемерово, ул. Институтская, зд. 3, помещ. 1
тел. 8 (384-2) 64-30-99, E-mail: main@nc-vostnii.ru

Лаборатория борьбы с пылью и пылевзрывозащиты
Адрес места осуществления деятельности: 650002, РОССИЯ, Кемеровская область - Кузбасс, г.о. Кемеровский городской округ, город Кемерово,
улица Институтская, здание 3, помещение 1
тел. 8 (384-2) 64-29-35, E-mail: m.korotkev@nc-vostnii.ru
Уникальный номер записи в реестре аккредитованных лиц в национальной системе аккредитации № RA.RU.213M21

Таблица результатов испытаний

Дата: 29.11.2024
Условия испытаний:
температура, °C 22,7
атмосферное давление, кПа 99,2
относительная влажность, % 33,9

Номер образца для испытания	Скорость нагревания образца, °C/мин	Температура испытания, °C	Результат испытания на воспламенение	Температура воспламенения, °C	Особенности испытания	
1	5,5	91,4	воспламенение отсутствует	-	кипение	
2	5,5	90,5	воспламенение отсутствует	-	кипение	
3	5,5	91,2	воспламенение отсутствует	-	кипение	
Регистрационный номер пробы лаборатории	Наименование образца	Определяемый показатель	Единицы измерений	Документы, устанавливающие правила и методы испытаний	Результат испытаний	Погрешность ±Δ, при P=0,95
326	4%-ный водный раствор (гидрогеля) суперабсорбента на основе полипроп-2-еноат натрия, хлорида аммония и хлорида натрия (суперабсорбента пылеподавителя «Аквасин-П»)	температура воспламенения	°C	ГОСТ 12.1.044-89 (п 4.6)	отсутствует	-

Протокол не должен быть воспроизведен не в полном объеме без разрешения лаборатории борьбы с пылью и пылевзрывозащиты АО «НЦ ВостНИИ».
Полученные результаты относятся только к пробам, предоставленным заказчиком. Лаборатория не несет ответственность за отбор проб.

Протокол № 195-24-П от 17.12.2024, оформлен в 3-х экземплярах

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Протокол испытаний по определению температуры самовоспламенения

Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли»
(АО «НЦ ВостНИИ»)
Юридический и фактический адрес: 650002, РОССИЯ, Кемеровская область - Кузбасс, г.о. Кемеровский, г. Кемерово, ул. Институтская, зд. 3, помещ. 1
тел. 8 (384-2) 64-30-99, E-mail: main@nc-vostnii.ru

Лаборатория борьбы с пылью и пылевзрывозащиты
Адрес места осуществления деятельности: 650002, РОССИЯ, Кемеровская область - Кузбасс, Кемеровский городской округ, город Кемерово,
улица Институтская, здание 3, помещение 1
тел. 8 (384-2) 64-29-35, E-mail: m.koritev@nc-vostnii.ru

Уникальный номер записи в реестре аккредитованных лиц в национальной системе аккредитации № RA.RU.213M21

Таблица результатов испытаний

Дата: 11.12.2024
Условия испытаний:
температура, °C 21,2
атмосферное давление, кПа 99,8
относительная влажность, % 45,4

Номер пробы вещества	Количество вещества в пробе, см³	Температура колбы, °C			Период индукции, с	Результат испытания		
		верх	середина	низ				
1	0,6	348,1	348,0	349,4	348,7	самовоспламенение отсутствует		
2	0,8	402,2	401,9	403,1	402,5	самовоспламенение отсутствует		
3	1,0	498,0	494,9	498,9	496,9	самовоспламенение отсутствует		
4	1,0	504,0	502,2	504,9	503,6	самовоспламенение отсутствует		
5	1,0	649,9	649,1	650,0	649,6	самовоспламенение отсутствует		
6	0,6	649,8	649,5	649,9	649,7	самовоспламенение отсутствует		
7	0,8	650,0	648,9	650,0	649,5	самовоспламенение отсутствует		
8	1,0	649,9	649,6	650,0	649,8	самовоспламенение отсутствует		
9	1,0	649,7	649,3	649,8	649,6	самовоспламенение отсутствует		
Регистрационный номер пробы лаборатории	Наименование образца	Определяемый показатель			Единицы измерений	Документы, устанавливающие правила и методы испытаний	Результат испытаний	Погрешность ±Δ _n при P=0,95
326	4%-ный водный раствор (гидрогеля) суперсорбента на основе полипроп-2-еноат натрия, хлорида аммония и хлорида натрия (суперсорбента пылеподавателя «Аквасин-П»)	температура самовоспламенения			°C	ГОСТ 12.1.044-89 (п 4.8)	отсутствует	-

Протокол не должен быть воспроизведен не в полном объеме без разрешения лаборатории борьбы с пылью и пылевзрывозащиты АО «НЦ ВостНИИ».
Полученные результаты относятся только к пробам, предоставленным заказчиком. Лаборатория не несет ответственность за отбор проб.