

На правах рукописи

АБИЕВ Заур Агаддович



**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ИНГИБИРУЮЩИХ СОСТАВОВ
ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ**

*Специальность 25.00.20. – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор

Парамонов Геннадий Петрович

Официальные оппоненты:

Джигрин Анатолий Владимирович

доктор технических наук, ООО Геотехнология-взрывозащита, генеральный директор

Кобылкин Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Безопасность и экология горного производства», доцент

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Университет Государственной Противопожарной Службы МЧС РФ»

Защита состоится 12 декабря 2018 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а

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

Автореферат разослан 12 октября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Среди опасностей горного производства наиболее тяжелыми по своим последствиям по-прежнему остаются аварии, связанные с воспламенением метана и угольной пыли, которые в большинстве случаев носят характер катастроф.

В современную эпоху предупреждение и локализация взрывов в шахтах приобретает особую значимость, становится не только актуальной задачей, но и чуть ли не единственным способом жизнеобеспечения в шахтах и сохранения предприятия. Практика ведения горных работ в условиях шахт, опасных по газу и пыли, показывает, что, несмотря на достижения в разработке средств и способов предотвращения распространения горения и взрыва метано-пылевоздушных смесей (МПВС) происходят взрывы метана и угольной пыли, сопровождающиеся человеческими жертвами и значительным материальным ущербом. Последние трагические события, произошедшие 25 февраля 2016 г., связанные с взрывом метана и угольной пыли в АО «Воркутауголь» в шахте «Северная», унесшим жизнь 36 шахтеров, показывают, что средства локализации не всегда способны обеспечить требуемый уровень взрывобезопасности.

Проектирование средств и способов локализации взрывов ввиду более высокой чувствительности метано-воздушной смеси (МВС) к импульсу воспламенения, а также более низкой критической температурой её вспышки ведется с целью предотвращения взрыва метано-воздушных смесей. Тем не менее, оценка эффективности их действия производится в пылевоздушных смесях (ПВС).

Значительный вклад в исследование ингибирования газозвушных смесей внесли: Махин В.С., Рыжик А.Б., Дубнов Л.В. В работах М.Г. Годжелло представлены исследования взрывчатости промышленных пылей. Джигрин А.В. – один из авторов разработки автоматических системы взрывоподавления-локализации взрывов МПВС (АСВП-ЛВ). С.А. Калякин, в своих работах показавший наличие противоречий в общепризнанном механизме взрыва угольной пыли. Зарубежные исследователи: В. Барткнехт, К. Кэшдоллар, М. Сапко, А. Дастидар, в своих работах изучали влияние флегматизаторов на предотвращение распространения взрыва метановоздушных и пылегазовых смесей.

Тем не менее, анализ результатов расследования аварий показывает недостаточную эффективность существующих систем локализации взрыва метано-пылевоздушных смесей. Поэтому научные исследования, направленные на установление взаимосвязи между свойствами ингибирующих и флегматизирующих составов и условиями

горения и взрыва ПВС, и разработка рекомендаций по их применению для предотвращения распространения горения и взрыва МПВС являются важной задачей для горнодобывающей отрасли в научном и практическом плане.

Цель диссертационной работы. Предотвращение распространения взрыва угольной пыли при ведении горных работ в условиях шахт опасных по газу и пыли.

Идея диссертационной работы. Локализация взрывов угольной пыли на основе применения высокоэффективных ингибирующих составов в многофункциональных системах безопасности угольных шахт.

Основные задачи исследований:

1. Анализ современных представлений о механизме воспламенения и взрыва метана и угольной пыли при производстве горных работ на угольных шахтах.
2. Анализ действующих систем взрывоподавления и локализации взрывов.
3. Разработка лабораторной методики исследования влияния ингибирующих и флегматизирующих добавок на взрывчатость ПВС.
4. Экспериментальные исследования влияния различных флегматизаторов и ингибиторов на горение и взрыв ПВС.
5. Разработка рекомендаций по применению ингибиторов и флегматизаторов для локализации взрыва ПВС.

Методы научных исследований. При работе над диссертацией использован комплексный метод исследований, включающий системный анализ результатов научных исследований в области обеспечения безопасности производства горных работ в условиях шахт, опасных по газу и пыли, лабораторные испытания взрывчатых свойств угольной пыли и взрывоподавляющих составов, обработка полученных данных на ЭВМ.

Научная новизна:

1. Установлено, что большей взрывоопасностью среди исследованных образцов угольной пыли Кузнецкого бассейна обладает каменноугольная пыль ш. им. Дзержинского ($V^{daf} - 35,5\%$, $W - \text{менее } 1\%$, $A^d - 3\%$). Определено, что большим максимальным давлением взрыва обладают фракции пыли дисперсностью 63-94 мкм при концентрации пыли 100 г/м³.
2. Установлена закономерность влияния флегматизирующего состава на основе хлористого калия и карбамида в зависимости от его дисперсности и концентрации на локализацию взрыва угольной пыли, также установлено, что наибольшая взрывоподавляющая эффективность состава на основе хлористого калия и карбамида достигается при массовом соотношении частей 1 к 3 и дисперсностью не более 40 мкм.

Защищаемые положения:

1. При выборе огнетушащих порошковых составов для автоматических систем взрывоподавления следует учитывать время их разложения при прохождении фронта пламени продуктов горения угольной пыли.

2. Локализация взрыва угольной пыли достигается применением ингибирующего/флегматизирующего состава на основе смеси хлористого калия и карбамида дисперсностью до 40 мкм и концентрацией 150 г/м³.

3. При использовании в системах взрывоподавления типа АСВП-ЛВ.1М предотвращение распространения взрыва угольной пыли в горной выработке площадью сечения $S=13 \text{ м}^2$ достигается за счёт применения взрывоподавляющего порошка на основе смеси хлористого калия и карбамида массой 30 кг.

Практическая значимость работы:

1. Предложена новая рецептура огнетушащего порошкового состава на основе хлористого калия и карбамида для локализации взрывов угольной пыли.

2. Разработаны рекомендации к использованию предлагаемого состава для применения в автоматических системах взрывоподавления-локализации взрывов.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современной аппаратуры и методов исследований, поддерживаемых соответствующим метрологическим обеспечением с верификацией качества проведения измерений, значительным объемом экспериментальных данных, удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных данных с результатами других исследователей, апробацией полученных результатов в периодической печати.

Апробация работы. Содержание и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в науке» (г. Уфа, 2017 г.), на научно-технических советах Санкт-Петербургского горного университета (Санкт-Петербург, 2014-2017 г.), а также на заседаниях кафедры взрывного дела.

Личный вклад автора:

Сбор и анализ данных ранее проводимых исследований; постановка цели и задач исследований; непосредственное участие в экспериментальных исследованиях; обработка полученных данных на ЭВМ; обобщение и сравнительный анализ полученных результатов; разработка практических рекомендаций.

Реализация результатов работы.

1. Разработанный ингибирующий состав рекомендован к применению в автоматических системах взрывоподавления для обеспечения пожаровзрывобезопасности угольных шахт, опасных по газу и пыли.

2. Научные и практические результаты работы могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении занятий по дисциплинам «Химия взрывчатых веществ», «Теория горения и взрыва».

Публикации. Основные результаты диссертационной работы содержатся в 4 научных статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения библиографического списка и приложений, изложенных на 129 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 24 таблицы и список литературы из 125 наименований.

Автор приносит искреннюю благодарность научному руководителю профессору Парамонову Геннадию Петровичу, развитие идей которого, постоянное внимание и помощь способствовали успешному выполнению работы; доценту Чернобаю Владимиру Ивановичу, за помощь в интерпретации полученных результатов, и другим сотрудникам кафедры ВД за содействие в сборе материалов и практические советы при написании диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены вопросы, касающиеся актуальности рассматриваемой проблемы, сформулированы цель, идея, основные задачи исследований, методология и методы исследований, научная новизна работы, основные положения, выносимые на защиту. Рассмотрены вопросы достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, практической значимости работы, реализации и апробации результатов работы, личного вклада. Приведена информация о публикациях, объеме и структуре работы.

В первой главе представлен анализ современных представлений о механизме воспламенения и взрыва метано-пылевоздушных смесей при производстве горных и взрывных работ, проведен анализ известных способов и средств предотвращения воспламенения и взрыва метано-пылевоздушных сред, проведена оценка эффективности автоматических заслонов, выполнен обзор существующих составов ингибирования и флегматизации взрывов метано-пылевоздушных смесей.

Во второй главе приведены системы оценки взрывопожароопасности гибридных смесей, проведен анализ отечественных и зарубежных методик экспериментального исследования ингибирования и флегматизации взрывов угольной пыли, освещены современные проблемы лабораторных исследований, а также представлена разработанная методика проведения экспериментальных исследований по определению минимальной флегматизирующей концентрации пламегасящих составов.

Третья глава включает экспериментальные результаты и их обсуждение: обоснован выбор методики исследования, обоснован выбор энергии зажигания угольной пыли пиротехническими воспалмителями, обоснован выбор марки угля для проведения эксперимента, выбор его дисперсности и концентрации, далее, на основе полученных данных, приведены испытания для сравнения эффективности различных взрывоподавляющих агентов и, впоследствии, проведен анализ полученных экспериментальных данных.

Четвертая глава посвящена разработке научно-обоснованных рекомендаций по применению флегматизаторов и ингибиторов в составе средств локализации взрывов ПВС. Обоснован выбор системы АСВП-ЛВ в качестве средства локализации взрывов ПВС, основанный на анализе технических характеристик системы, обосновано применение состава на основе хлористого калия и карбамида для снаряжения систем АСВП-ЛВ путем проведения исследовательских испытаний и оценки его эффективности по результатам проведенных исследований.

В заключении приводятся основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты исследований отражены **в защищаемых положениях:**

1. При выборе огнетушащих порошковых составов для автоматических систем взрывоподавления следует учитывать время их разложения при прохождении фронта пламени продуктов горения угольной пыли.

Основными компонентами огнетушащих порошковых составов (ОПС) на сегодняшний день являются фосфорно-аммонийные соли, сульфат аммония и бикарбонат натрия (таблица 1).

Таблица 1 - Порошковые огнетушащие составы.

Название ОПС	Основной компонент	Область применения
ПФ	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
ПИРАНТ-А	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
ПИРАНТ-АН	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
ПИРАНТ-АК	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
П-1А	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
Р-11-24	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
П-4АП	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С классов
ПСБ	Бикарбонат натрия	Тушение пожаров В, С классов
ПСБ-2	Бикарбонат натрия	Тушение пожаров В, С классов
ПСБ-3	Бикарбонат натрия	Тушение пожаров В, С классов
ИСТО-1	Фосфат аммония, сульфат аммония	Тушение пожаров А, В, С, Е классов
П-АГС	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С, Е классов
ВЕКСОН	Фосфат аммония, сульфат аммония	Тушение пожаров А, В, С, Е классов
Феникс АВС-40	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С, Е классов
Феникс АВС-70	Фосфат аммония	Тушение пожаров А, В, С, Е классов

Гетерогенное ингибирование является сложнейшим фактором воздействия на пламя. Исходя из этого, при тушении пламени стоит применять комбинированные порошково-пенные средства, чтобы охладить очаг пеной после подавления ингибитором горения. Однако, это не применимо к условиям взрыва, так как для его локализации отводится не более 100 мс. Для условий угледобывающих предприятий особый интерес представляют такие вещества, которые могут совмещать пламегасящие и локализирующие свойства. Такими веществами являются взрывоподавляющие порошки. Основная область их применения –

снаряжение автоматических систем взрывоподавления. На сегодняшний день в отечественных и зарубежных источниках нет каких-либо сведений о серийном производстве и применении специальных взрывоподавляющих порошков. Автоматические системы взрывоподавления снаряжают серийными огнетушащими порошками общего назначения. Для того чтобы оценить эффективность такого решения, необходимо помнить, что физико-химические процессы горения решительным образом отличаются от процессов, происходящих при взрыве. В условиях температур до 2000 °С в связи с изменением причин образования свободных радикалов, обычного эффекта ингибирования, являющегося основой огнетушащих порошков, уже не достаточно для локализации очага.

В таком случае, необходимо очень быстро отвести из реакционной зоны химическую часть энергии, и для этих целей лучше всего использовать химические агенты, обладающие большой скоростью разложения.

Таким образом, сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, применяемый при пламегашении за счёт высокого показателя теплопоглощения (4,5 кДж/г) будет не так эффективен при локализации взрыва, т.к. его кинетические параметры, а именно скорость разложения, гораздо ниже, чем, скажем, у бикарбоната натрия (NaHCO_3) и карбамида ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). Тем самым за время, которое необходимо $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ чтобы поглотить 4,5 кДж теплоты, NaHCO_3 успеет поглотить 900 кДж.

При проведении научно-исследовательской работы применена методика, разработанная с учетом как требования методики испытания взрывчатости аэрозолей принятой в Европейском Союзе, так требования и рекомендации других международных стандартов.

Непосредственно перед проведением испытания проводилась подготовка образцов угольной пыли и исследуемого ОПС. Она включала в себя измельчение и рассев на фракции и сушку полученных фракций в вакууме при 50 °С. Внешний вид установки, и схема основного блока представлены на рисунке 1.

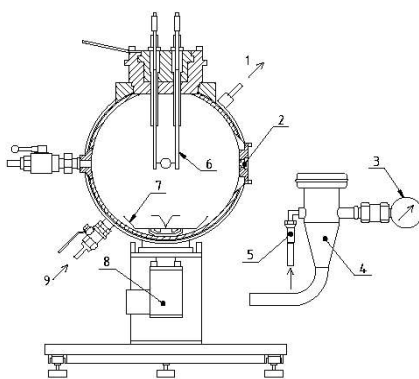
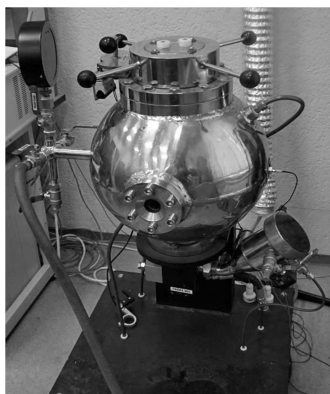


Рисунок 1 - Внешний вид установки и рисунок основного блока. Слева внешний вид установки (СПб Горный университет). Справа основной блок: 1 - выход воды, 2 - датчик давления, 3 - манометр, 4 - пылеотборник объемом 0,6 дм³, 5 - воздухозаборник, источник воспламенения, 7 - рикошетное сопло, 8 - быстродействующий клапан, 9 - водозаборник, 10 - выходное отверстие воздуха и продуктов реакции.

Общий алгоритм проведения лабораторного исследования заключается в том, что в закрытой камере сгорания установки представленной на рисунке 1, формируется аэрозоль каменноугольной пыли подаваемой одновременно с помощью сжатого воздуха, под давлением 2МПа.

Пробоподготовка ингибирующих и/или флегматизирующих добавок включает в себя их диспергирование и ситовой рассев для получения фракций аналогичных по составу основному образцу, т.е. имеющему тот же дисперсионный состав в который их планируют добавлять.

Разработанное автором, инициирующее устройство включает в себя навеску химического воспламенителя, общей массой 2,4 г, размещаемого в рабочей емкости. В качестве рабочей емкости лучше всего зарекомендовали себя пробирки Эппендорфа. Для такого количества химического воспламенителя использовали пробирку Эппендорфа объемом 1,5 мл. Примененный химический воспламенитель по своему составу состоит из: 0,96 г циркониевого порошка; 0,72 г Ва(NO₃)₂ (нитрата бария); 0,72 г ВаО (оксида бария).

Каждое устройство при электровоспламенении выделяет 10 кДж энергии. Давление, создаваемое двумя такими воспламенителями составит

$P_{\text{воспл}} = (0,19 \pm 0,01)$ МПа. Далее проводится воспламенение пылевоздушной смеси с задержкой 60 мс. Результаты воспламенения образовавшейся внутри рабочей камеры аэрозоля заданной концентрации, давление взрыва и скорость нарастания давления взрыва автоматически фиксируются системой обработки данных. Если избыточное давление ($P_{\text{изб}}$) превысило созданное воспламенителем давление ($P_{\text{воспл}}$) на 0,02 МПа, то считается, что взрыв угольной пыли произошёл.

На первом этапе проводились исследования взрывоопасных характеристик образцов каменного угля Кузнецкого бассейна, отобранных из очистного забоя сверхкатегорийной шахты им. Дзержинского (образец 1), шахты 3 категории Котинская (образец 2) и сверхкатегорийной шахты им. 7 ноября (образец 3). Все шахты опасные по взрывам каменноугольной пыли. Полученные результаты обрабатывались на прикладном программном обеспечении. По полученным данным строились графики зависимости давления взрыва пылевоздушной смеси от концентрации и дисперсности угольной пыли (рисунок 2) и времени детонационного горения пылегазовой смеси (рисунок 3).

Зона 1, выделенная на графике, это зона равенства давлений взрыва, фракций дисперсности 56-63 и 63-94 мкм, при концентрации пыли в области 76 – 80 г/м³.

Результаты визуализации экспериментальных данных, отражающих зависимость изменения давления взрыва от времени сгорания угольного аэрозоля, приведены на рисунке 3.

Для сравнения пламегасящей эффективности составов была использована каменноугольная пыль шахты им. Дзержинского (Кузнецкий бассейн) дисперсностью 63-94 мкм и концентрацией 100 г/м³.

Результаты экспериментальных данных, полученных при сравнении взрывоподавляющей эффективности огнетушащего порошка общего назначения торговой марки «ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль» (Патент РФ №2159138, А62D1/00, 2000), на основе аммофоса (моно- и диаммонийфосфата) и сульфата аммония с составом на основе хлорида калия (имеющего высокие ингибирующие свойства) и карбамида (обладающего высокой скоростью разложения), показывают значительное преимущество последнего (таблица 2).

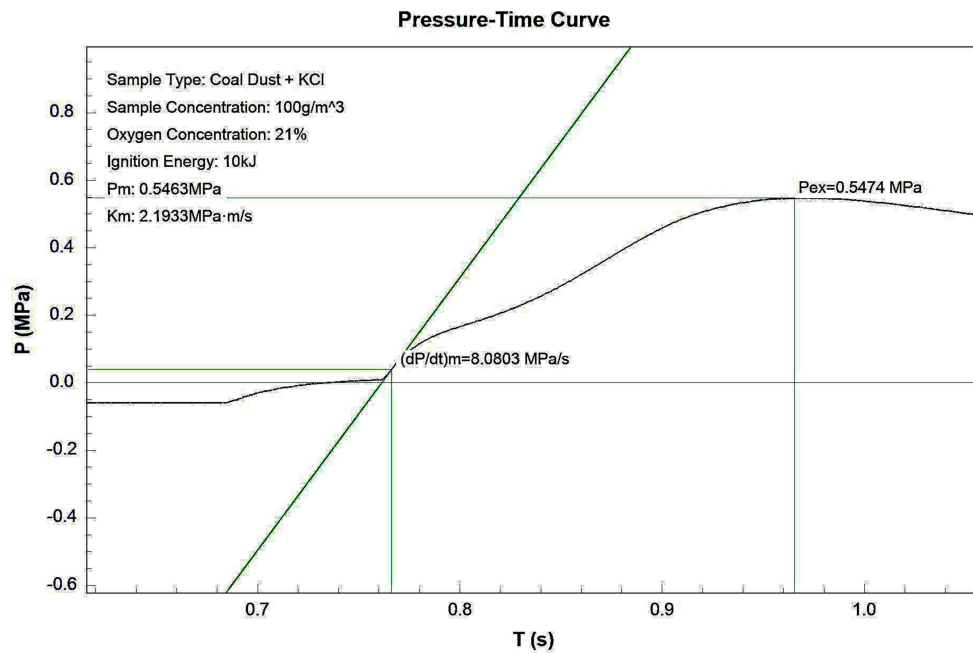


Рисунок 6 - Результат проведения единичного испытания – $C_{\text{уг}} - 100 \text{ г/м}^3$, $C_{\text{инг. (KCl)}} - 75 \text{ г/м}^3$.

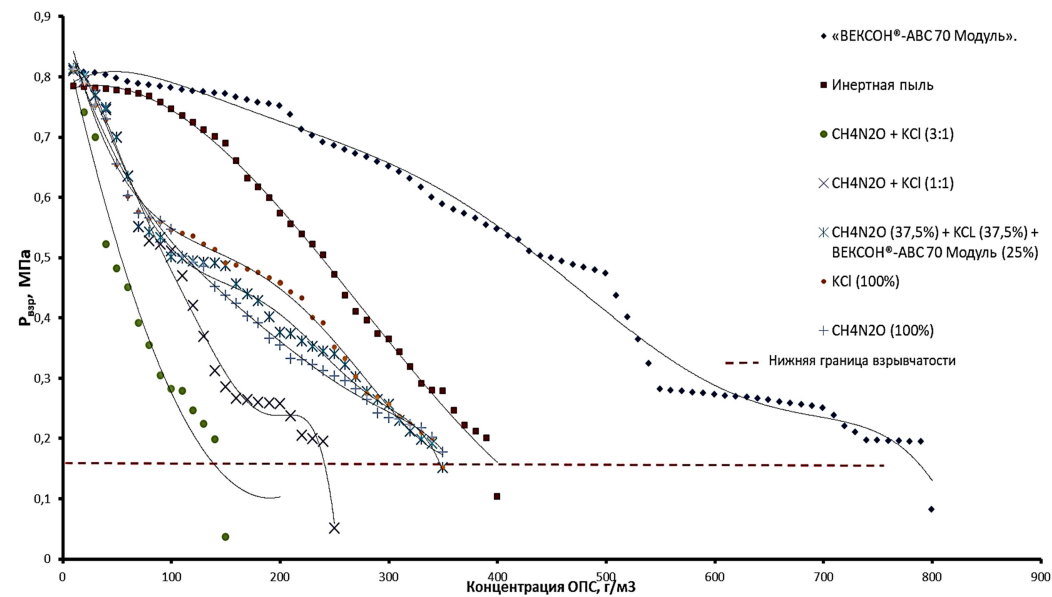


Рисунок 7 - График зависимости давления взрыва от концентрации ОПС.

Таблица 2 - Пламегасящая эффективность ОПС «ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль»

№ опыта	Масса ОПС, г	Концентрация ОПС, г/м ³	«ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль»		KCl + CH ₄ N ₂ O	
			P _{ex} , МПа	(dP/dt) _m , МПа/с	P _{ex} , МПа	(dP/dt) _m , МПа/с
1	1,5	75	0,7724	24,2409	0,5315	6,9822
2	3	150	0,6899	19,1289	0,2258	4,6173
3	4	200	0,5734	7,0909	0,0360	3,0102
4	6	300	0,3644	4,9471	—	—
5	8	400	0,1038	4,6173	—	—

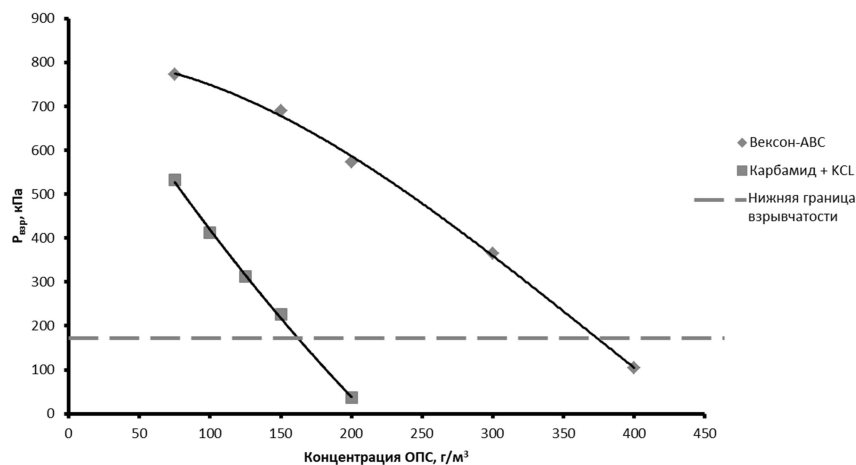
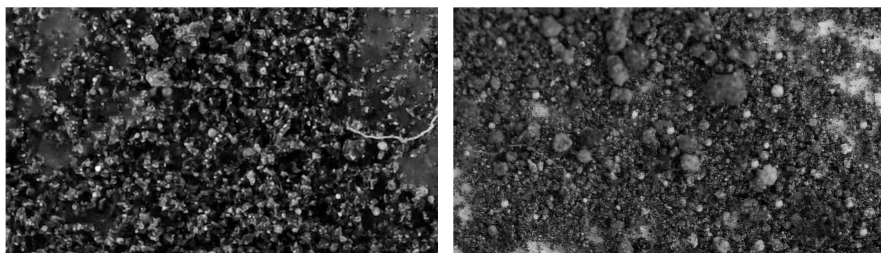


Рисунок 4 - График зависимости давления взрыва угольной пыли от концентрации ОПС.

Стоит также отметить, что в условиях быстропротекающего процесса взрывного горения или детонации угольной пыли, ОПС на основе аммофоса теряют одно из своих важных преимуществ в гашении пламени – способность изолировать твёрдую тлеющую поверхность частиц угольной пыли от доступа кислорода вязкой плёнкой плава. Полимеризация низших фосфатов до соединений типа $\text{NH}_4\text{H}_6\text{P}_5\text{O}_{16}$, образующих вязкие плёнки не успевает произойти.



а)

б)

Рисунок 5 - Каменноугольная пыль после: а) взрывного горения в лабораторной установке с добавлением ОПС «ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль»
б) горения в лабораторной печи с последующим тушением ОПС «ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль».

Приведенные на рисунке 5 результаты макросъёмки угольной пыли, свидетельствуют об отсутствии в условиях взрывного горения оплавленных (светлые скруглённые точки на фото) частичек угольной пыли, присутствующих при тушении горения угольной пыли в печи, что в свою очередь подтверждает утверждение, отмеченное ранее.

Анализ результатов, полученных в ходе проведенных исследований по сравнению взрывоподавляющей эффективности огнетушащего порошка на основе аммофоса и предлагаемого состава на основе хлористого калия и карбамида, подтверждает, что благодаря более высокой, по сравнению с аммофосом, скоростью разложения во фронте пламени продуктов взрыва угольной пыли, предлагаемый состав обладает лучшими взрыволокализирующими характеристиками. Таким образом, подтверждается необходимость учёта времени разложения ОПС во фронте пламени при их выборе для снаряжения в автоматических системах взрывоподавления.

2. Локализация взрыва угольной пыли достигается применением ингибирующего/флегматизирующего состава на основе смеси хлористого калия и карбамида дисперсностью до 40 мкм и концентрацией 150 г/м³.

По описанной выше методике были проведены лабораторные испытания по определению эффективности действия ингибирующих и флегматизирующих добавок. Испытания включают в себя следующую последовательность операций: в угольную пыль, фракционный состав и концентрация которой соответствуют максимальному давлению взрыва,

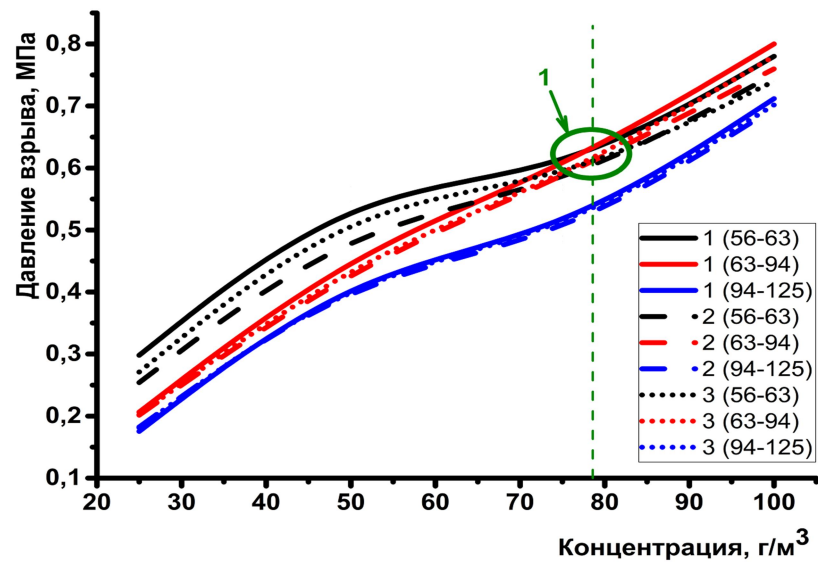


Рисунок 2 - График зависимости давления взрыва пылевоздушной смеси от концентрации и дисперсности угольной пыли.

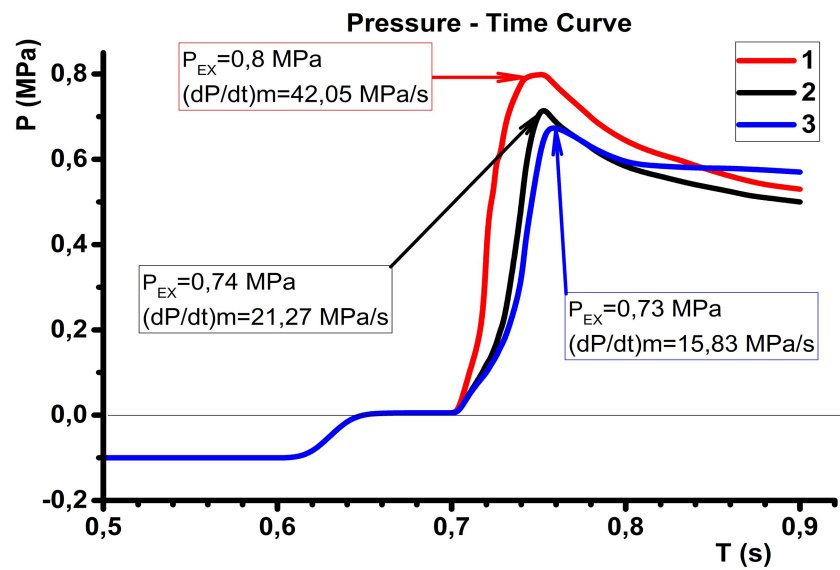


Рисунок 3 - График зависимости изменения давления взрыва (P , МПа) от времени (t , с) детонационного горения пылегазовой смеси во взрывной камере: 1 – образец 1 ш. им. Дзержинского; 2 – образец 2 – ш. Котинская и 3 – образец 3 ш. им. 7 Ноября.

поочередно (путём тщательного перемешивания) добавляют различные виды ингибиторов (флегматизаторов), выбранные для исследования. С каждым из выбранных ингибиторов производят по 10 попыток воспламенения угольной пылевоздушной смеси с шагом концентрации в ней ингибитора 10% от массы угольной пыли.

Результатом проведенного единичного испытания является кривая давления-времени (рисунок 6), позволяющая определить давление взрыва и скорость его нарастания. Значение скорости нарастания давления характеризует скорость высвобождения энергии взрыва и применяется при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010.

Затем по данным значений, полученных в результате испытаний, строят график зависимости (рисунок 7) давления взрыва (P , МПа) от концентрации ингибитора (C , %). Анализ графика позволяет определить наиболее эффективный из исследуемых ингибиторов и его оптимальную концентрацию.

Из-за охлаждения и эффектов давления, вызванных химическими воспламенителями в 20-литровой камере по сравнению со стандартной камерой в 1 м^3 , измеренное сверхдавление взрыва P_{ex} пересчитывают по следующей формуле, и таким образом получают скорректированное сверхдавление взрыва:

$$P_m = 0,755 \cdot P_{ex}^{1.15},$$

Объектами исследования были выбраны следующие пламегасящие составы:

1. Огнетушащий порошок общего назначения торговой марки «ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль» (ТУ 2149-238-10968286-2011).
2. Инертная пыль (ГОСТ Р 51569-2000).
3. Калий хлористый химически чистый (ГОСТ 4234-77)
4. Карбамид (ГОСТ 2081-2010)
5. Состав на основе карбамида и хлористого калия (в соотношении 1:3)
6. Состав на основе карбамида и хлористого калия (в соотношении 1:1)
7. Состав на основе хлористого калия, карбамида и огнетушащего порошка «ВЕКСОН®-ABC 70 Модуль»

Согласно полученным данным наибольшей взрывоподавляющей эффективностью обладает состав на основе карбамида и хлористого калия (в соотношении 1:3). Кроме того, анализ графических данных позволяет сделать вывод о пороговом характере процесса взрывоподавления, таким образом, для локализации взрыва на всём защищаемом объёме должна быть достигнута минимальная взрывоподавляющая концентрация пламегасящего состава.

Как известно, пламегасящая эффективность порошковых составов увеличивается с увеличением удельной площади поверхности частиц ОПС, т.е. с уменьшением фракции порошка. Проведенные испытания (рисунок 8) показали, что максимальная дисперсность предлагаемого порошкового состава не должна превышать 40 мкм.

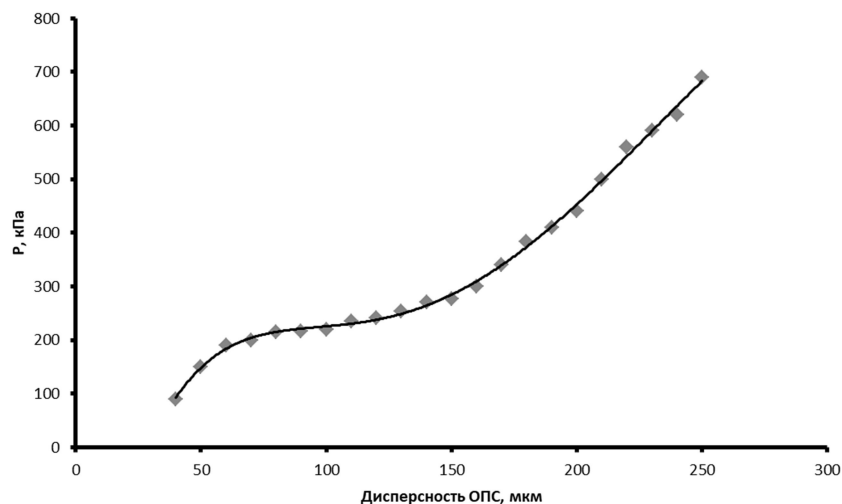


Рисунок 8. График зависимости давления взрыва от дисперсного состава ОПС.

В результате проведенных исследований установлено, что минимальная взрывоподавляющая концентрация добавки огнетушащего порошкового состава на основе карбамида и хлористого калия, надёжно локализирующая взрыв угольной пыли должна составлять не менее 150 г/м^3 при дисперсности до 40 мкм.

3. При использовании в системах взрывоподавления типа АСВП-ЛВ.1М предотвращение распространения взрыва угольной пыли в горной выработке площадью сечения $S=13 \text{ м}^2$ достигается за

счёт применения взрывоподавляющего порошка на основе смеси KCl и карбамида массой 30 кг.

Для определения эффективности применения пламегасящего состава на основе хлористого калия и карбамида для снаряжения автоматических систем взрывоподавления и локализации взрывов (АСВП-ЛВ) были проведены исследовательские испытания.

Характеристики испытуемого пламегасящего состава представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Краткая характеристика пламегасящего порошка.

№ п/п	Наименование показателя	Фактическое содержание
1	Массовая доля карбамида ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), %	72
2	Массовая доля хлористого калия (KCl), %	27
3	Гидрофобизирующая добавка (аэросил), %	1
4	Массовая доля влаги, %, не более	0,35
5	Количество частиц размером менее 40 мкм, %	70

С целью определения взрывоподавляющей эффективности испытуемого состава, а также возможности его применения в автоматических системах взрывоподавления был выполнен анализ испытаний, проведенных в лаборатории рудничной пыли МакНИИ, целью которых было определение величины добавки пламегасящего порошка, необходимого для нейтрализации взрываемости угольной пыли.

Результаты взрываемости смеси угольной пыли с нейтрализующей добавкой в виде ингибитора ПВХ-1 приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты взрываемости смеси угольной пыли с порошком ПВХ-1.

Добавка в % к угольной пыли	Результаты взрывания
40	н/в., н/в., н/в., н/в., н/в.,
25	взр., взр.,
26	взр., взр.,
27	взр., взр., н/в., н/в.,
28	н/в., взр., взр., н/в., взр.,
30	взр., н/в., взр., н/в., н/в.,
31	н/в., взр., н/в., взр., н/в.,
32	н/в., взр., н/в., н/в., н/в.,
33	взр., н/в., н/в., н/в., н/в.,
34	н/в., н/в., н/в., взр., н/в.,
35	н/в., н/в., н/в., н/в., н/в., н/в., н/в., н/в.,

Испытания, проведенные в лаборатории физики взрыва (Санкт-Петербург, Горный университет) для аналогичных условий с использованием в качестве нейтрализующей добавки исследуемого пламегасящего состава на основе хлористого калия и карбамида приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты взрываемости смеси угольной пыли с порошком на основе хлористого калия и карбамида.

Добавка в % к угольной пыли	Результаты взрывания (в % от числа опытов)
10	100% взрыв
15	100% взрыв
17	100% взрыв
20	90% взрыв
23	70% взрыв
25	50% взрыв
27	30% взрыв
30	10% взрыв
33	0% (взрывчатые свойства полностью нейтрализованы)

В результате проведенных испытаний установлено:

1. Величина добавки пламегасящего порошка на основе карбамида и хлористого калия, надежно нейтрализующая её способность к взрываемости составляет 33% по массе угольной пыли и более.

2. Доказана взрывоподавляющая эффективность исследуемого порошкового состава. Состав рекомендован для снаряжения систем АСВП-ЛВ для локализации взрывов угольной пыли.

Также в результате проведенных исследований установлено, что согласно техническим характеристикам системы, пламегасящий состав массой 30 кг, снаряженный в АСВП-ЛВ, способен надёжно локализовать взрыв угольной пыли в горной выработке площадью сечения до 13 м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе предложена новая научно-обоснованная рецептура огнетушащего порошкового состава на основе хлористого калия и карбамида, имеющая существенное значение для повышения взрывобезопасности при добыче полезных ископаемых в условиях шахт, опасных по взрывам угольной пыли. В работе содержатся новые решения актуальной задачи по локализации взрывов угольной пыли.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. Разработана методика исследования влияния ингибирующих и флегматизирующих добавок на воспламеняемость и взрывчатость угольной пыли, позволяющая количественно оценить наиболее значимые параметры воспламенения и взрыва угольной пылевоздушной смеси;

2. Разработано инициирующее устройство из химического воспламенителя, дающее возможность полноценно заменить стандартные промышленные воспламенители и снизить трудозатраты на лабораторные испытания. При этом применение разработанных воспламенителей позволяет регулировать энергию взрыва в широком диапазоне, настраивая испытываемую камеру под задачи исследователя;

3. Обоснован выбор энергии зажигания пиротехнических воспламенителей для проведения испытаний. Показано, что использование пиротехнического воспламенителя с $Q_{\text{воспл}} = 5 \text{ кДж}$ входит в область стабильного воспламенения и взрыва угольной пыли и является наиболее оптимальным вариантом для проведения лабораторных испытаний в сферической взрывной камере объемом 20 литров.

4. Экспериментально исследованы взрывоопасные характеристики каменноугольной пыли и установлено, что большей взрывоопасностью среди исследованных образцов обладает каменноугольная пыль ш. им. Дзержинского. Определено, что большим максимальным давлением взрыва обладают фракции пыли дисперсностью 63-94 мкм при концентрации пыли 100 г/м^3 .

5. Экспериментально установлено, что из ряда исследованных пламегасящих составов наибольшей взрывоподавляющей эффективностью обладает состав на основе карбамида и хлористого калия (в соотношении 1:3).

6. Доказано, что пламегасящий состав на основе карбамида и хлористого калия концентрацией 150 г/м^3 и дисперсностью не более 40 мкм эффективно предотвращает взрыв угольной пыли.

7. По результатам испытаний разработанный порошковый состав рекомендован для применения в автоматических системах взрывоподавления (АСВП).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Абиев З.А. Методика исследования процессов горения и детонации каменноугольной пыли в горных выработках / В.А. Родионов, З.А. Абиев, С.Я. Жихарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. Вып. 1, Т. 17, 2018. С.50-59.

2. Абиев З.А. Исследование взрывчатых свойств каменноугольной пыли глубоких шахт Кузнецкого бассейна / З.А. Абиев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. 2018. С. 73-82.

3. Абиев З.А. Методика исследования влияния ингибирующих и флегматизирующих добавок на воспламеняемость и взрывчатость угольной пыли / З.А. Абиев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Вып. 5. 2018. С. 26-34.

4. Абиев З. А. Современные тенденции экспериментального исследования закономерностей процесса флегматизации и ингибирования, воспламенения и взрыва газо-пылевоздушных смесей / З.А. Абиев, Г. П. Пармонов, В. И. Чернобай // Взрывное дело. Вып.114/71. С. 337-349.