

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

ХАРЧЕНКО Владимир Федорович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ
ВЗРЫВОПОДАВЛЕНИЯ-ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ
КАК ЭЛЕМЕНТА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ**

**Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(в горной промышленности)**

Автореферат

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

Научный руководитель:

**доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехнологии освоения недр»
ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»
ЕФИМОВ Виктор Иванович**

Москва - 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На угольных шахтах России значительную опасность представляют аварии, связанные со взрывом метанопылевоздушных смесей. При этом участие во взрыве угольной пыли в сети горных выработок приводит к значительному числу погибших горняков (шахты «Ульяновская», «Юбилейная», «Воркутинская», «Распадская», «Северная»).

Пылевзрывобезопасность горной выработки, характеризуется количеством отложившейся угольной пыли в расчете на единицу объема горной выработки, способной перейти во взвешенное состояние при взрыве.

В соответствии с требованиями «Правил безопасности в угольных шахтах» многофункциональная система безопасности (МФСБ) шахты должна содержать подсистему контроля запыленности воздуха и пылевых отложений, а также подсистему контроля и управления средствами взрывозащиты горных выработок. Однако, на сегодняшний день подсистемы надежного автоматического контроля и управления пылевзрывобезопасностью отсутствуют.

Для определения путей дальнейшего повышения эффективности существующих и разрабатываемых способов и средств борьбы с пылью необходимо изучить процесс образования, переноса и отложения угольной пыли в условиях интенсивной разработки угольных пластов. Необходимо обеспечить непрерывный автоматический контроль интенсивности отложения угольной пыли, что позволит получать информацию о взрывоопасном состоянии горной выработки и оперативно реагировать на предаварийные ситуации в рамках МФСБ шахты. Знание процессов пылевой динамики позволит выделить существенные факторы, влияющие на эффективность средств пылевзрывозащиты шахты, выявить резервы ее повышения и указать практические способы реализации.

Поэтому тема диссертационной работы, направленной на решение задачи повышения эффективности средств взрывозащиты шахты, прежде всего автоматизированной системы взрывоподавления-локализации взрывов как подсистемы МФСБ шахты, является актуальной.

Целью работы является повышение безопасности ведения горных работ, на основе исследования процессов пылевой динамики в горных выработках для разработки эффективных средств пылевзрывозащиты, в том числе автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов как подсистемы взрывозащиты МФСБ шахты.

Идея работы заключается в использовании датчиков непрерывного контроля интенсивности отложения угольной пыли в конструкции автоматических систем взрывоподавления-локализации взрывов (АСВП-ЛВ), для текущей оценки степени пылевзрывоопасности выработок, а также управления АСВП-ЛВ и оценки эффективной области их применения.

Методы исследования включают в себя анализ литературных источников по теме пылевзрывоопасности, аналитические исследования, шахтные эксперименты, методы статистической обработки результатов экспериментов.

Задачи исследований:

1. Исследование влияния горнотехнических условий на процесс пылеобразования в очистном забое, определение удельного пылевыведения для выбора средств предотвращения пылеобразования.

2. Исследование распространения угольной пыли в горных выработках шахты для определения параметров средств пылеподавления и оценки их эффективности.

3. Исследование процесса осаждения угольной пыли в горной выработке и перехода ее в аэрозольное состояние в рудничную атмосферу для определения параметров средств пылевзрывозащиты.

4. Исследование параметров распространения взрыва угольной пыли в зависимости от горнотехнических факторов, с целью выбора эффективного средства его подавления и локализации.

5. Разработка требований к функциональной структуре автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов как подсистемы МФСБ угольной шахты.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Ожидаемая запыленность воздуха в очистном забое прямо пропорциональна удельному пылевыведению, с учетом установленных коэффициентов, отражающих влияние конструктивных параметров комбайна и скорости движения воздуха в забое, - и обратно пропорциональна количеству воздуха, проходящего по лаве.

2. Угольная пыль, которая отложилась в выработках с исходящей струей воздуха из высокопроизводительных очистных забоев, по своему составу является мелкодисперсной, с весовой долей фракций 50 мкм более 94%. При этом среднее модальное значение эквивалентного диаметра отложившихся частиц угольной пыли составляет 8-21 мкм. Рост доли тонкодисперсной фракции в пыли способствует увеличению протяженности взрывоопасной зоны горной выработки.

3. При обработке выработки смачивающе-связывающими веществами изменение средней по сечению концентрации пыли с удалением от источника описывается экспоненциальной зависимостью, позволяющей рассчитывать ожидаемую эффективность пылеподавления по заданной протяженности обработки или рассчитывать необходимую протяженность обработки для достижения желаемой эффективности снижения запыленности воздуха.

4. Использование автоматической системы подавления-локализации взрыва (АСВП-ЛВ) с датчиком дистанционного контроля интенсивности пылеотложения в горных выработках являющейся подсистемой взрывозащиты многофункциональной системы безопасности шахты, позволяет контролировать количество отложившейся угольной пыли в расчете на единицу объема выработки и определять эффективную область применения АСВП-ЛВ, когда она гарантированно предотвращает распространение взрыва угольной пыли по сети горных выработок.

Достоверность научных положений, защищаемых в работе подтверждаются:

- достаточным объемом стендовых и шахтных исследований;
- удовлетворительной сходимостью результатов аналитических исследований распространения угольной пыли в горных выработках и результатов исследования процесса осаждения угольной пыли и перехода ее в аэрозольное состояние в рудничную атмосферу с результатами шахтных исследований;
- положительными результатами стендовых и шахтных испытаний многофункциональной автоматической системы взрывоподавления-локализации взрыва (АСВП-ЛВ.МФ) с датчиком контроля интенсивности пылеотложения (ДИП-1).

Научная новизна заключается в следующем:

- установлена количественная зависимость определения ожидаемой запыленности воздуха в очистном забое;
- установлена закономерность распределения дисперсного состава отложившейся угольной пыли при высокопроизводительной комбайновой выемке;
- разработана методика расчета параметров обработки выработок смачивающе-связывающими веществами для снижения запыленности;
- разработана методика расчета параметров распространения взрыва (скорость распространения фронта пламени) в зоне до 40 м от эпицентра взрыва, где учитывается влияние источника воспламенения пыли и в зоне до 300 м, где взрыв происходит вследствие термического пиролиза угольной пыли, отложившейся в выработке;
- разработаны требования к функциональной структуре автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов, как подсистемы взрывозащиты МФСБ угольной шахты.

Научное значение работы заключается в разработке научно-методических положений по проведению исследований распространения угольной пыли в очистных забоях и сети горных выработок при различных горнотехнических условиях пылеобразования и использовании данных интенсивности пылеотложения для оценки эффективной области применения автоматических систем взрывоподавления-локализации взрыва в проектах комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты угольных шахт.

Практическое значение работы состоит в разработке системы контроля интенсивности пылеотложения и управления средствами пылевзрывозащиты горных выработок в части диспетчерского контроля и повышения качества осланцевания выработок, а также разработке рекомендаций по реализации автоматической системы взрывоподавления-локализации взрыва в МФСБ шахты.

Реализация работы. Результаты проведенных исследований использованы при разработке «Проекта комплексного обеспыливания и пылевзрывозащиты при ведении горных работ» в условиях шахт «Чертинская-Коксовая» и «Костромовская» ООО «ММК-Уголь», а также «Технических проектов «Многофункциональная система безопасности шахт «Чертинская-Коксовая» и «Костромовская» (АС «МФСБ»», в части подсистемы

пылевзрывозащиты.

Результаты исследований использованы при проектировании многофункциональной автоматической системы взрывоподавления-локализации взрыва (АСВП-ЛВ.МФ).

Апробация работы. Основные положения и содержание работы докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка» в 2019 и 2020 гг., а также на научных семинарах АО КФ «ВНИМИ» и ООО «Геотехнология-взрывозащита» (2018-2020 гг.).

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, проведении аналитических исследований процесса пылеобразования в очистном забое, разработке методики исследования процесса взрыва угольной пыли в сети горных выработок и в выборе и адаптации автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов в многофункциональную систему безопасности шахты «Чертинская-Коксовая» и получении основных научных результатов исследований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, содержит 17 таблиц, 21 рисунок, список использованных источников из 61 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В решение проблемы борьбы с пылью в угольных шахтах большой вклад внесли выдающиеся советские и российские ученые: академик А.А. Скочинский, А.С. Бурчаков, В.Н. Воронин, Г.С. Гродель, В.И. Дремов, С.Ю. Ерохин, Б.Ф. Кирич, В.В. Кудряшов, С.Н. Подображин, Г.А. Поздняков, О.В. Скопинцева, М.А. Фролов и др.

В соответствии с рядом исследований и действующей нормативной документацией пылевзрывозащита шахт включает комплекс мероприятий по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли включая:

- определение взрывчатых свойств угольной пыли;
- установление характера и интенсивности пылеотложения в сети горных выработок;
- выбор способов и средств снижения интенсивности пылеобразования и пылеотложения;
- выбор средств предупреждения взрывов угольной пыли;
- выбор средств локализации взрывов угольной пыли.

Проведены исследования влияния горнотехнических факторов на пылевую обстановку в очистном забое, с целью определения удельного пылевыделения для проектирования средств предотвращения пылеобразования

Пылевая обстановка в очистном забое зависит, в первую очередь, от свойств угольного пласта. Это дает основание разделить угольные пласты на группы по степени их пылеобразующей способности. Известные методы классификации углей по петрографическому составу, выходу летучих веществ, механической прочности не могли быть использованы для оценки углей по их

пылеобразующей способности, так как в этих методах в качестве классификационного критерия принят какой-либо один фактор, а пыльность угольного пласта, как это отмечено в работах Б.Ф. Кирина, Л.Я. Лихачева, Э.М. Москаленко, А.В. Трубицина и др., определяется совокупным действием нескольких факторов.

Вопросам разработки метода определения пылеобразующих свойств углей посвящено много отечественных и зарубежных исследований (работы А.П. Поелуева, Л.И. Рыжих, В.П. Журавлева, Е.З. Позина, В.З. Меламеда, А.И. Берона, А.Г. Фролова, Г.Е. Панова, И.Г. Ищука, В. Das, P.C. Thakur, M. Landwer др.). В этих исследованиях оценку пылеобразующих свойств углей рекомендуется производить по количеству пылевых частиц, образующихся при механическом разрушении углей или по содержанию отдельных компонентов в угле. При таком методе оценки не учитываются те свойства пласта, которые оказывают влияние на переход пылевых частиц во взвешенное состояние.

В результате дисперсионного анализа по однофакторной схеме установлено влияние на запыленность воздуха в очистном забое таких факторов, как степень метаморфизма угля, его влажность и сопротивляемость разрушению, тип комбайна, скорость движения воздушной струи, глубина ведения работ. При двухфакторной, трехфакторной и четырехфакторной группировках влияние степени метаморфизма угля и глубины ведения работ оказалось несущественным. Влияние степени метаморфизма и глубины ведения работ на запыленность воздуха проявляется через действие таких факторов, как влажность угля, сопротивляемость его разрушению. В то же время зависимость запыленности воздуха в очистной выработке от совокупности действия группы факторов, характерных для данной свиты пластов, оказалась существенной при любых группировках. При сопоставлении значений суммарного содержания пылевых частиц в угле (частицы размером менее 0,07 мм), разрушенном комбайном, у которого режим резания изменялся в широких пределах, а показателями, характеризующими пылевую обстановку в очистном забое (запыленность воздуха, удельное пылевыделение, интенсивность пылевыделения), установлено, что наиболее тесная корреляционная связь имеет место между суммарным содержанием пылевых частиц (a) и удельным пылевыделением (q).

В результате обработки данных лабораторных исследований получено значение коэффициента корреляции между q и a , равное 0,95, и уравнение регрессии вида

$$q = 0,74a\% \quad (1)$$

С учетом действия факторов, существенность влияния которых на пылевыделение была установлена при дисперсионном анализе, уравнение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$q = 10^4 k_W k_H k_B k_\omega a \text{ мг/кг}, \quad (2)$$

где k_W, k_H, k_B, k_ω – коэффициенты, учитывающие влияние на удельное пылевыделение соответственно влажности угля, мощности пласта, типа выемочной машины и скорости движения воздуха в забое.

Значение удельного пылевыведения, рассчитанное по формуле (2), было принято в качестве критерия для оценки угольных пластов по пылевому фактору, так как оно одновременно учитывает степень измельчения угля и интенсивность выдувания пыли.

По значению удельного пылевыведения, может быть рассчитана ожидаемая запыленность воздуха в очистном забое по формуле

$$C = \frac{qK_v K_\omega p}{Q}, \text{ мг/м}^3, \quad (3)$$

где p – производительность выемки, кг/с;

Q – количество воздуха, проходящего по лаве.

Коэффициент K_v , учитывающий влияние на удельное пылевыведение выемочной машины, определен как произведение величин относительного содержания пыли в разрушенном угле и относительного удельного пылевыведения. Коэффициент K_ω , учитывающий влияние на удельное пылевыведение скорости воздуха был установлен по данным лабораторных и шахтных экспериментов. Значения этого коэффициента для скоростей воздуха 1, 2, 3, 4 и 5 м/с соответственно равны 1, 3, 6, 9, 2 и 13,6.

Разделение шахтопластов на группы позволило установить, что применение орошения на выемочных комбайнах в комплексе с предварительным увлажнением угля в массиве обеспечивает снижение запыленности воздуха на рабочих местах до ПДК только на пластах до IV группы пыльности. Для снижения запыленности воздуха до ПДК на пыльных и весьма пыльных пластах требуется либо применение более эффективных средств пылеподавления, либо необходимо переходить на такие способы разрушения угля, при которых обеспечивается резкое снижение пылевыведения в процессе выемки.

В работе проведены исследования закономерностей и особенностей пылевыведения, распределения дисперсного состава витающей пыли и ее распространения по горным выработкам угольных шахт в условиях высокопроизводительной добычи угля.

Проведенные исследования позволили установить, что угольная пыль, которая отложилась в выработках с исходящей струей воздуха из высокопроизводительных очистных забоев, по своему составу является мелкодисперсной, с весовой долей фракций 50 мкм более 94%. При этом среднее модальное значение эквивалентного диаметра отложившихся частиц угольной пыли составляет 8-21 мкм.

Угольная пыль с размером частиц более 100 мкм наблюдаются только на первых 10 м, что связано с эффективным пылеподавлением установленными водяными завесами.

Важно отметить, что интенсивность отложения мелкодисперсной фракции угольной пыли уменьшается с расстоянием от очистного забоя, но при этом сохраняется на всем протяжении горной выработки. Мелкодисперсная угольная пыль с размером фракций до 50 мкм отлагается на всем протяжении горной выработки с исходящей струей воздуха из очистного забоя, это связано с

высокой скоростью воздуха в выработках с исходящей струей. Этому способствует большое количество воздуха подаваемого для проветривания очистного забоя, связанного с газовым фактором, который зависит от нагрузки на очистной забой.

В таблице 1 представлены результаты анализа дисперсного состава отложившейся угольной пыли, в конвейерном штреке 555, при отработке пласта 5, высокопроизводительным очистным забоем (до 7000 т/сут), лава 555, шахты «Чертинская-Коксовая».

Таблица 1 - Дисперсный состав отложившейся пыли в конвейерном штреке 555 шахты «Чертинская-Коксовая»

Наименование шахты	Расстояние от лавы, м	Размер частиц, мкм			
		0-20	20-50	50-90	Более 90
		Весовая доля фракции, %			
ООО «ММК-УГОЛЬ» Шахта «Чертинская-Коксовая» пласт 5, лава 555	10	79,85	13,22	5,28	11,45
	50	81,77	18,32	8,99	0,85
	100	95,66	11,94	2,13	0,01
	410	98,25	4,41	6,03	0,99

Проведенный, по апробированной методике АО НЦ ВостНИИ микроскопический анализ дисперсного состава витающей угольной пыли позволил сделать следующие выводы:

- экспериментально установлена обратно пропорциональная зависимость численных показателей дисперсного состава угольной пыли в зависимости от расстояния между точкой контроля и источником образования пыли (комбайном). Уменьшение этого расстояния происходит к увеличению моды, математического ожидания и среднеквадратического отклонения диаметра частиц;

- на расстоянии свыше 20 метров от комбайна явно выражены частицы с аэродинамическим диаметром $10 \div 25$ мкм, определяющие основную массу отложившейся угольной пыли. Доля респирабельных фракций ($1 \div 7$ мкм) составляет более 8%, фракции $1 \div 4$ мкм, чуть более 2%;

- крупные частицы пыли ($75 \div 171$ мкм), улавливаемые приборами пылевого контроля, составляют от 10 до 28% по объему. С учетом разницы в удельном весе частиц различных фракций пыли, весовая доля таких частиц угольной пыли составляет около $35 \div 40\%$;

Выемка угольных пластов современными комбайнами приводит к образованию большого количества угольного (органического) аэрозоля, не учитываемого современными методами контроля взрывобезопасности в угольных шахтах.

Проведенные нами исследования показали, что увеличение энергии, прикладываемой к разрушению горного массива современными выемочными комбайнами, привело к существенному росту доли тонкодисперсной фракции в пыли, способной привести к мощному взрыву в шахте.

В связи с этим возникает обоснованная необходимость в разработке противопылевых проектных решений и мероприятий, и специальных решений для снижения опасности взрывов угольной пыли и выбора эффективных средств локализации взрывов.

Полученные результаты позволяют прогнозировать эффективность способа обработки выработок смачивающе-связывающими составами, рассчитывать параметры обработки и определить пути повышения эффективности данного способа борьбы с пылью.

С целью увеличения эффективности способа обработки выработки смачивающе-связывающими веществами и уменьшения затрат на обработку разработана методика расчета длины участка обработки и прогноза эффективности способа. При теоретических исследованиях получен общий характер изменения средней по сечению концентрации пыли с удалением от источника и скорость этого убывания. Задав минимальную скорость убывания концентрации, получим зависимости

$$E \simeq 1 - e^{\sqrt{\frac{\alpha}{2,5B}}l}, \quad (4)$$

$$l \simeq 5,7 \frac{B}{\sqrt{\alpha}} \lg \left(\frac{1}{1-E} \right), \quad (5)$$

позволяющие рассчитывать ожидаемую эффективность пылеподавления по заданной протяженности обработки или рассчитывать необходимую протяженность обработки для достижения желаемой эффективности снижения запыленности воздуха. Для практического применения предложена номограмма прогноза эффективности пылеподавления (рисунок 1).

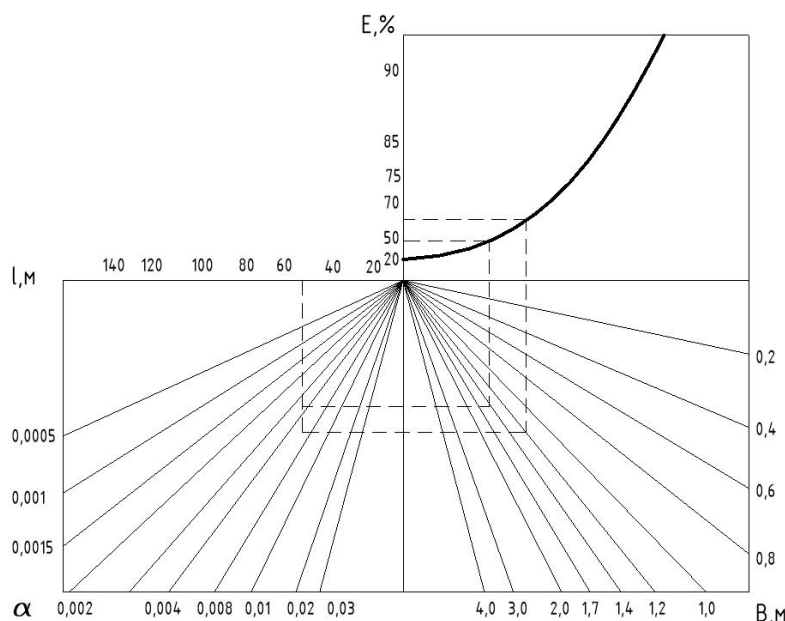


Рисунок 1 - Номограмма прогноза эффективности пылеподавления

Из формул (4) и (5) вытекают возможные пути повышения эффективности способа обработок смачивающе-связывающими веществами: увеличение

протяженности участка обработки, что требует дополнительных затрат на смачивающе-связывающие вещества или увеличение степени турбулизации потока за счет повышения сопротивления трения поверхности выработок, что позволяет уменьшить протяженность участка обработки для достижения той же эффективности, а следовательно, уменьшить затраты на смачивающе-связывающие вещества.

В горной практике для расчетов потребного количества инертной пыли на осланцевание, в частности для определения сроков повторного осланцевания, весьма важно знать, с какой скоростью происходит пылеотложение. Особенно сложен этот вопрос для крутопадающих пластов, так как условия осаждения пылевого аэрозоля здесь иные, чем на пластах горизонтального или наклонного залегания.

Немаловажен и вопрос обратного перехода отложившейся пыли в аэрозольное состояние, вызывающего дополнительное поступление пыли в атмосферу горных выработок при увеличении скорости движения воздушного потока выше оптимальной и представляющего этим большую опасность как источник разрушительных взрывов.

Характер кривых зависимости между количеством пыли, уносимым с единицы поверхности лежащего слоя пыли, и аэродинамическим параметром воздушного потока (скоростью) показывает, что эту зависимость можно изобразить степенной функцией, а именно

$$G_{\text{ср}} = b(U - U_{\text{кр}})^n, \quad (6)$$

где: U – скорость движения воздуха;

$U_{\text{кр}}$ – критическая скорость воздушного потока, при которой начинается сдувание пыли с поверхности слоя;

b и n – постоянные параметры, определяемые из экспериментальных данных и характеризующие свойства сдуваемой пыли (удельный вес, влажность, дисперсный состав), свойства поверхности, на которой лежит слой пыли.

Параметры b и n , определенные из экспериментальных данных, равны:

а) для случая перехода слоя пыли, лежащего на почве модели лавы, в аэрозольное состояние без динамического воздействия на слой пыли

$$b = 0,005; n = 1,94;$$

б) для случая перехода слоя пыли, лежащего на почве модели лавы, в аэрозольное состояние при динамическом воздействии на слой пыли

$$b = 0,012; n = 1,98.$$

Полученное удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных запыленности атмосферы подтверждает, что турбулентность воздушного потока – один из механизмов этого переноса, а в случае источника постоянной производительности или постоянного пылепоступления в поток – основной механизм.

Поскольку в лавах с современным уровнем механизации интенсивность пылеобразования больше интенсивности поступления пыли в поток от

источника при одном и том же производственном процессе при прочих равных условиях (влажности угля, крепости угля, типе работающих механизмов и их числе и т. д.), следовательно, можно ожидать получения зависимости пылепоступления в поток от источника от скорости воздушного потока, аналогичной только что рассмотренной.

При разработке автоматических средств локализации взрывов главной задачей является своевременное создание на пути распространяющегося по выработке фронта пламени (ФП) взрывогасящей среды. При определении основных временных параметров срабатывания автоматических средств локализации взрывов и установления рациональных расстояний установки их от потенциальных очагов вспышки, при которых подавляется пламя, необходимо знать закономерности процесса распространения по выработкам взрывов, и, в частности, определение скорости распространения фронта пламени при различных источниках воспламенения пылегазовоздушных смесей. □

Анализ многочисленных исследований показал, что распространение фронта пламени (ФП) происходит в режиме пульсаций. На рисунке 2 представлен характер изменения скорости распространения фронта пламени в выработке.

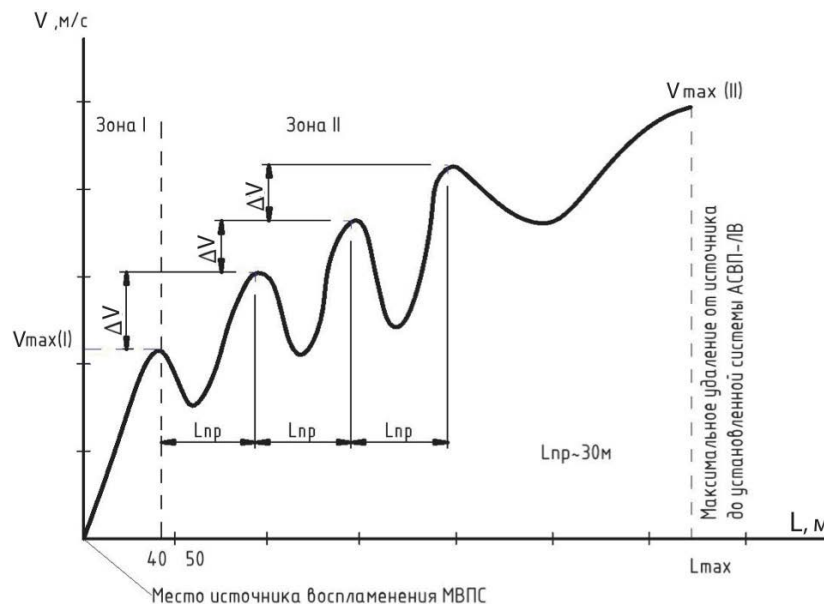


Рисунок 2 - Изменение скорости распространения фронта пламени

Можно выделить две зоны взрыва. Зона до 40 м, где нужно учитывать влияние источника воспламенения пыли. Во II зоне до 300 м взрыв происходит при пиролизе угольной пыли, отложившейся в выработке.

Скорость фронта пламени можно рассчитать по зависимости:

$$V = V_0 \cdot \ln(k/k_0), \quad (7)$$

где: k — концентрация угольной пыли во взвешенном состоянии при взрыве, г/м^3 ;

k_0 — концентрация угольной пыли, которая может взрываться, г/м^3 ($k_0 \approx 30 \text{ г/м}^3$);

V_0 — минимальная (начальная) скорость ФП, м/с (по данным исследования

МакНИИ $V_0 \approx 57,6$ м/с).

Нами предлагается методика расчета максимально возможной скорости распространения ФП в зоне I и в зоне II.

Максимальная скорость распространения ФП в зоне I определяется по зависимости:

$$V_{maxI} = 2V_{CP} - V_0 \quad (8)$$

где V_{CP} - средняя скорость распространения ФП, м/с.

$$V_{CP} = V_0 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{S} \cdot K_3}{2,66 \cdot K_0} \right) \quad (9)$$

где K_3 - концентрация пыли в экспериментальной штольне ($K_3 = 350$ г/м³).

Подставляя (9) в (8) и проводя определенные преобразования, получим

$$V_{maxI} = V_0 \left[2 \ln \left(\frac{\sqrt{S} \cdot K_3}{K_0} \right) - 1 \right] \quad (10)$$

Максимальная скорость распространения ФП во II-й зоне определяется по зависимости:

$$V_{maxII} = V_{maxI} + 0,5V_0 \frac{l - l_{и}}{l_{и}} \quad (11)$$

где l - расстояние от эпицентра взрыва, м;

$l_{и}$ - величина (расстояние) распространения импульса, м.

Исследованиями МакНИИ в экспериментальной штольне установлено, что $l_{и} \approx 30$ м. Подставляя значение $l_{и}$ в зависимость (11) получим окончательную зависимость для определения максимальной скорости распространения ФП во II-й зоне:

$$V_{maxII} = V_{maxI} + 0,017 V_0 (l - l_{и}) \quad (12)$$

Расчеты максимальной скорости распространения ФП в I-й зоне показывают, что $V_{maxI} \approx 250 \div 300$ м/с, в зоне II максимальная скорость распространения ФП на расстоянии $l = 300$ м составит:

$$V_{maxII} = 300 + 0,017 \cdot 57,6 (300 - 30) = 564 \text{ м/с.}$$

В таблице 2 представлены данные расчета скорости распространения ФП по зависимости (12).

Таблица 2 - Скорость распространения ФП

l , м	400	500	600	700	800	900	1000
V_{max} , м/с	662	760	858	956	1054	1151	1250

Анализ данных скорости распространения ФП по сети горных выработок показал, что, если не применять системы локализации и средства пылевзрывозащиты, взрыв перейдет в режим детонационного взрыва на расстоянии 1000 м и вызовет сильнейшие разрушения подземных сооружений, а

также повлечет за собой гибель значительного числа шахтеров и ИТР. На шахте «Ульяновская» в 2007 году погибло 111 человек, а на шахте «Распадская» в 2010 году погибло 93 человека. Эти обстоятельства требуют обязательного применения, в большей степени, автоматических средств локализации взрывов угольной пыли в сети горных выработок, чем пассивных водяных или сланцевых заслонов, так как они локализуют взрывы, распространяющиеся со скоростью $230 \div 270$ м/с, в то время как автоматические системы типа АСВП-ЛВ $600 \div 640$ м/с.

Учитывая то обстоятельство, что взрывы могут распространяться со скоростью большей, чем та, при которой их могут подавить системы АСВП-ЛВ, необходимо контролировать концентрацию угольной пыли, отложившейся на стенках горных выработок, так как она значительно влияет на скорость распространения ФП.

Конструкция системы АСВП-ЛВ.МФ (ПГИ) предусматривает наличие датчика интенсивности пылеотложения, что позволяет не допускать взрыва, распространяющегося со скоростью, когда эффективность этих систем будет низка. Это обеспечивается тем, что при превышении нижнего предела взрывчатости отложившейся угольной пыли, возможно отключение электроэнергии на участке и передача информации диспетчеру о предаварийной ситуации. После этого проводятся специальные профилактические мероприятия по пылевзрывозащите (уборка, связывание или флегматизация пыли). Кроме того, система позволяет осуществлять текущий контроль пылевзрывобезопасности горной выработки.

Многофункциональная система безопасности (МФСБ) должна обеспечивать мониторинг и предупреждение условий возникновения опасности аэрологического характера.

Конструкция системы АСВП-ЛВ.МФ(ПГИ) предусматривает размещение датчика интенсивности пылеотложения ДИП-1 на приемном щите устройства. ДИП-1 предназначен для дистанционного непрерывного контроля пылеотложения в горных выработках - измерений массы пыли, осевшей на приемную платформу ДИП, и пересчета массы в значение поверхностной плотности.

ДИП-1 производит прямое измерение массы отложившейся пыли в диапазоне 0,05- 0,5 г. Диаметр приемной платформы составляет 46 мм (площадь $0,00167 \text{ м}^2$), что соответствует расчетному диапазону измерения поверхностной плотности пыли 30-300 г/м².

Для расширения диапазона измерения поверхностной плотности пыли могут устанавливаться различные насадки. В зависимости от конструкции насадки диапазон измерения поверхностной плотности пыли может изменяться как в меньшую, так и в большую сторону. При этом диапазон измерения ДИП-1 по массе отложившейся пыли остается неизменным (0,05-0,5 г).

В основу работы ДИП-1 заложен весовой метод определения массы отложившейся пыли. Принцип действия весоизмерительного первичного преобразователя основан на измерении перемещения упругого элемента.

На рисунке 3 представлен общий вид прибора ДИП-1.



Рисунок 3 – Общий вид ДИП-1

1 – ЖК – индикатор, 2 – ручка для переноски, 3 – аппаратное отделение с измерительной платой и индикатором блока измерения, 4 – отделение кабельных вводов с платой коммутации блока измерения, 5 – винты для крепления крышек отсеков, 6 – корпус блока первичного преобразователя, 7 – кабельный ввод, 8 – светодиодные индикаторы наличия питания и срабатывания «сухого» контакта, 9 – пузырьковый уровень, 10 – приемная платформа для сбора пыли.

Работой ДИП управляет встроенное микропроцессорное устройство. Оно обеспечивает измерение сигнала на чувствительном элементе, обработку информации, ее отображение на ЖКИ, взаимодействие с пользователем через кнопки, установленные в отделении кабельных вводов, и формирование выходных сигналов.

ДИП осуществляет непрерывное измерение и индикацию значения массы или поверхностной плотности пыли, отложившейся на приемной платформе в зависимости от установленного режима индикации, а также передачу результатов измерения в виде стандартного аналогового сигнала (0,4-2,0) В и/или цифрового сигнала типа RS-485 в общешахтную систему мониторинга рудничной атмосферы.

Структура автоматизированной системы мониторинга отложения угольной пыли (АСМП) должна быть трехуровневой и состоять из датчиков интенсивности пылеотложения (ДИП), блока устройств сбора и передачи информации, сервера накопления текущей информации и автоматизированных рабочих мест диспетчера и специалистов. Структурная схема системы АСМП представлена на рисунке 4.

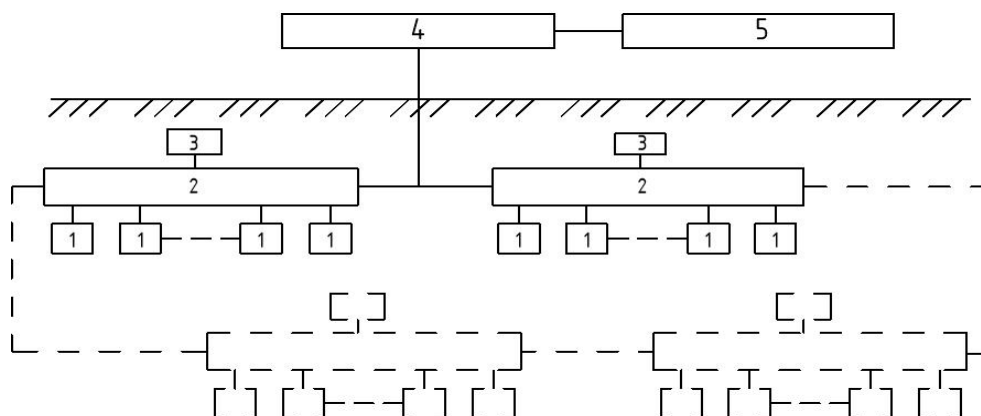


Рисунок 4 - Структурная схема системы АСМП

1-датчики интенсивности пылеотложения; 2-подземные ведомые станции;
3-блоки питания подземной ведомой станции; 4-наземная ведущая станция;
5-наземная ЦЭВМ

Компонентами наземного оборудования системы АСМП являются наземная ведущая станция и наземный компьютерный комплекс. К подземной части системы АСМП относятся подземные ведомые станции, блоки питания ведомой станции, датчики интенсивности отложения угольной пыли в сети горных выработок шахты. Среди действующих в настоящее время на шахтах России систем мониторинга состояния шахтной атмосферы наиболее полно соответствуют предъявленным требованиям системы «Микон» («Ингортех», Россия) и «Granch МИС» («Гранч», Россия). С использованием элементов системы «Микон» были проведены лабораторные и шахтные испытания, которые подтвердили работоспособность датчика ДИП-1 в составе автоматизированной системы мониторинга интенсивности отложения угольной пыли в горных выработках.

В таблице 3 приведены результаты проведенных стендовых испытаний датчика ДИП-1 с целью определения работоспособности прибора и определения погрешности измерения.

Пыль прокачивалась и осаждалась на фильтрах типа (АФА), потом взвешивалась на специальных весах, затем рассчитывалась поверхностная плотность (ПП) угольной пыли и сравнивалась с данными прибора.

Установлено, что погрешность определения ПП угольной пыли не превышала 15%.

Таблица 3 - Результаты стендовых испытаний датчика ДИП-1

Временной интервал, мин	Вес АФА, г	Вес АФА с пылью, г	Вес пыли, г	ПП пыли на фильтре, г/м ²	Данные прибора, г/м ²
10	0,570	0,575	0,005	2,00	2,05
15	0,580	0,585	0,005	2,84	3,05
20	0,585	0,595	0,010	4,40	4,15
25	0,595	0,599	0,004	5,20	5,50

50	0,585	0,595	0,010	6,40	6,18
75	0,588	0,590	0,002	7,08	6,57
100	0,578	0,585	0,007	6,12	6,90
125	0,545	0,558	0,013	6,35	7,00
150	0,548	0,558	0,010	8,05	7,30
175	0,570	0,586	0,016	7,99	7,30

Результаты замеров в шахтных условиях представлены в таблице 4.

Установлено, что погрешность измерения концентрации пыли не превышала 20%.

Таблица 4 - Результаты замеров датчиком ДИП-1 в условиях шахты «Чертинская-Коксовая»

Временной интервал, мин	Вес АФА, г	Вес АФА с пылью, г	Вес пыли, г	ПП пыли, г/м ²	Данные прибора, г/м ²
1	0,586	0,588	0,002	1,018	0,966
2	0,590	0,595	0,005	2,630	2,248
3	0,582	0,588	0,006	4,400	3,806
4	0,585	0,593	0,008	3,980	4,878
5	0,545	0,555	0,010	6,170	5,150
6	0,603	0,616	0,013	7,283	8,816
7	0,547	0,566	0,019	9,938	8,788

Система управления АСВП-ЛВ.МФ(ПГИ) обеспечивает осуществление следующих основных функций:

- контроль состояния работоспособности установки (датчик СД-1);
- автоматическая передача информации на диспетчерский пульт шахты об опасных концентрациях угольной пыли (мониторинга шахтной атмосферы), способных взрываться и распространяться по сети горных выработок (датчик ДИП-1);
- автоматическое отключение электроэнергии на участке, где установлена система, при предельных концентрациях угольной пыли, когда локализовать ее возможный взрыв будет крайне сложно, либо невозможно.

В настоящее время на шахтах «Чертинская-Коксовая» и «Костромовская» установлено 12 автоматических систем взрывоподавления-локализации взрывов АСВП-ЛВ.МФ(ПГИ), которые включены в многофункциональную систему безопасности шахт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, дано решение актуальной научно-практической задачи повышения безопасности

ведения горных работ, на основе исследования процессов пылевой динамики в горных выработках для разработки эффективных средств пылевзрывозащиты, в том числе автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов, как подсистемы взрывозащиты МФСБ шахты.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Современные способы и средства предупреждения взрывов пыли в шахтах направлены на создание и поддержание в выработках таких условий, при которых возникновение и распространение взрыва исключается. Однако, в условиях интенсивной угледобычи пылеобразование возрастает, что приводит к увеличению пылеотложения в сети горных выработок.

С учетом колебаний интенсивности пылеотложения в выработках, время накопления взрывоопасного количества пыли изменяется от нескольких часов до нескольких смен. В связи с этим необходимо применять непрерывно действующие способы и средства пылевзрывозащиты. В настоящее время эффективность планируемых мер пылевзрывозащиты недостаточна вследствие отсутствия систем автоматического контроля накопления пыли.

2. Комплексные исследования влияния горнотехнических условий на процесс пылеобразования в очистном забое позволили получить зависимость определения удельного пылевыведения для выбора средств предотвращения пылеобразования, которая определяется свойствами угольного пласта, влажностью угля в пласте, сопротивляемостью угля разрушению, величиной вынимаемой мощности пласта, скоростью движения воздушной струи, конструкцией и параметрами выемочного комбайна.

3. Выполнены исследования процесса распространения угольной пыли в горных выработках шахты для определения параметров средств пылеподавления и оценки их эффективности. С целью увеличения эффективности способа обработки выработки смачивающе-связующими веществами и уменьшения затрат на обработку разработана методика расчета длины участка обработки и прогноза эффективности предложенного способа пылеподавления.

4. Исследования процесса осаждения угольной пыли в горной выработке и перехода ее в аэрозольное состояние в рудничную атмосферу для выбора средств пылевзрывозащиты показали, что при работе проходческих комбайнов взрывоопасное количество пыли отлагается за время прохождения 0,7-1,3 м выработки. При проходке 250-300 м в месяц выработка на участке 10 м от забоя примерно 7-10 раз в сутки приходит во взрывоопасное состояние. Таким образом, при работе проходческих комбайнов в забоях выработок может образовываться взрывоопасная концентрация взвешенной угольной пыли. Кроме того, эта пыль, отлагаясь по длине выработки, приводит ее в пылевзрывоопасное состояние.

5. Разработана методика определения максимальной скорости распространения фронта пламени в ближней зоне от эпицентра вспышки, где присутствует влияние источника воспламенения, а также в зоне до 300 м и более.

Рекомендовано оценивать прогнозные параметры взрыва пыли для оценки эффективности срабатывания АСВП-ЛВ, чтобы обеспечить своевременное

приведение выработок во взрывобезопасное состояние, не допуская развития критической скорости распространения фронты пламени.

6. Разработаны рекомендации по совершенствованию автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов АСВП-ЛВ.МФ(ПГИ), как подсистемы взрывозащиты МФСБ угольной шахты, на основе применения в ее конструкции прибора контроля массы отложившейся угольной пыли ДИП-1.

7. Автоматическая система взрывоподавления-локализации взрывов многофункциональная АСВП-ЛВ.МФ(ПГИ) сертифицирована (сертификат соответствия № ТС RUC-RU.МШ04.В.00318), в соответствии с требованиями Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах» и применяется на угольных шахтах «Чертинская-Коксовая» и «Костромовская» ООО «ММК-Уголь».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора.

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Гречишкин П.В., Харченко В.Ф., Розонов Е.Ю., Горностаев В.С., Панин С.Ф. Повышение эффективности оценки состояния пород кровли выработок с применением различных методов в условиях шахты «Чертинская-Коксовая». Уголь. 2019. №10 (1123). С. 42-46.

2. Джигрин А.В., Разумняк Н.Л., Харченко В.Ф., Горностаев В.С. Автоматическая система взрывоподавления локализации взрывов многофункциональная // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №1. – с. 37-41.

3. Джигрин А.В., Харченко В.Ф., Малова С.А., Розонов Е.Ю., Карасев Г.А., Горностаев В.С., Щербаков В.Н. Основные проблемы повышения безопасности и эффективности разработки угольных пластов подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 30). – С. 3-16. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-3-16.

4. Харченко В.Ф. Исследование пылеотложения в горных выработках угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10 (специальный выпуск 30). – С. 17-23. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-17-23.