

На правах рукописи



ИСАЕВ ИГОРЬ РУСЛАНОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ МЕТАНА И ПЫЛИ С
ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В
УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2014

Работа выполнена в ФГУП Национальный научный центр горного производства – ИГД им. А.А. Скочинского

**Научный
руководитель:**

Джигрин Анатолий Владимирович,

доктор технических наук, ЗАО «Межведомственная комиссия по взрывному делу при Академии горных наук», директор по науке и перспективному развитию.

**Официальные
оппоненты:**

Скопинцева Ольга Васильевна,

доктор технических наук, Институт «Московский горный институт», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор кафедры «Аэрология, технологическая безопасность и горноспасательное дело».

Смирняков Валерий Витальевич,

кандидат технических наук, Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», доцент кафедры «Безопасность производств»

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (**ИПКОН РАН**), г. Москва

Защита состоится 11 декабря 2014 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 355.001.01 при Научно-техническом центре исследований проблем промышленной безопасности по адресу: 105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14.

Тел. для справок: (495) 620-47-50; эл. почта: gra@safety.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Научно-технического центра исследований проблем промышленной безопасности (<http://disser.safety.ru>), а также на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации (<http://vak.ed.gov.ru>).

Автореферат разослан « » октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



А.И. Гражданкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В ходе технического перевооружения угольных шахт получили широкое применение прогрессивные технологии с использованием механизированных добычных комплексов. Расширены объемы применения проходческих комбайнов, осуществляется переход на комплексную механизацию всех технологических процессов проходческого цикла на базе унификации сечения выработок и использования новых высокопроизводительных механизмов. Механизация очистных и проходческих работ, совершенствование организации труда и управления отраслью позволили повысить нагрузку на забои, обеспечить рост производительности труда.

Одновременно с этим в отрасли уделялось внимание обеспечению безопасных и здоровых условий труда, включая меры по предупреждению опасности взрывов метана и угольной пыли.

Однако, как показывает практика, широкое внедрение прогрессивной технологии и техники угледобычи с одновременным осуществлением комплекса мер по обеспечению безопасности ведения горных работ полностью не устраняет угрозу очаговых воспламенений метана и взрывов пылегазовых смесей в угольных шахтах.

В период с 1991 по 2011 годы на шахтах России произошло более 100 взрывов (вспышек) метана и угольной пыли. Последние трагические события произошедшие в 2010 г., связанные со взрывом метана и угольной пыли в ОАО «Распадская», унесшим жизнь 91 шахтера, подтверждают актуальность и практическую значимость проведения исследований, направленных на установление закономерностей возникновения и распространения по горным выработкам взрывов метана и угольной пыли, а также создание и внедрение эффективных средств взрывозащиты, прежде всего средств локализации взрывов метана и угольной пыли.

Основная цель исследований состоит в обосновании рациональных параметров средств локализации взрывов метана и пыли, обеспечивающих повышение безопасности ведения горных работ в угольных шахтах.

Основные задачи исследований:

1. Анализ аварийных ситуаций, связанных со взрывом метана и угольной пыли, с определением вероятностей их возникновения в различных горных выработках шахт;
2. Разработка критерия, позволяющего классифицировать аварии по тяжести их социально-экономических последствий, а также оптимизировать показатели ущерба от аварии;
3. Проведение экспериментальных исследований по определению технических параметров автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов (АСВП-ЛВ).
4. Обосновать рациональные параметры пассивных и автоматических средств локализации взрывов метана и угольной пыли и технологические схемы их расстановки по сети горных выработок, обеспечивающих эффективную локализацию взрывов в угольных шахтах.

Идея работы заключается в научном обосновании эффективной области применения средств локализации на основе прогнозной оценки распространения взрыва по сети горных выработок с определением, прежде всего, скорости распространения ударно-воздушной волны и фронта пламени и учетом технических параметров различных типов заслонов, определенных экспериментальным путем.

Методы исследований. Общей теоретической и методологической базой диссертационной работы явились научные труды отечественных и зарубежных ученых и практиков в области промышленной безопасности и надежности технических систем. При решении поставленных задач использовался комплексный метод, включающий в себя научное обобщение, анализ аварийных ситуаций, методы математической статистики, аналитические исследования, а также комплекс стендовых и натурных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Прогноз взрывоопасных ситуаций в сети горных выработок, а также оптимизация показателей ущерба от аварий, посредством варьирования показателя вероятности аварии и математического ожидания ущерба от нее, определенного на основании разработанного критерия, позволяющего классифицировать аварии по тяжести их социально-экономических последствий, позволяет выбирать более эффективный способ пылевзрывозащиты горных выработок, в том числе средства локализации взрывов метана и угольной пыли;

2. Основными параметрами, определяющими эффективность средств локализации взрывов метана и угольной пыли, помимо концентрации огнетушащего вещества C_{II} являются время формирования t_{ϕ} и время жизни $t_{ж}$ огнетушащего вещества в заслоне, при этом, в зависимости от сечения горной выработки, для автоматических заслонов C_{II} меньше в 80-200 раз, t_{ϕ} меньше в 30 раз, а $t_{ж}$ больше чем в 100 раз относительно пассивных водяных (сланцевых) заслонов;

3. Технические параметры автоматических заслонов обеспечивают локализацию взрыва метана и угольной пыли, фронт пламени которого распространяется со скоростью 40-660 м/с, в то время как пассивные водяные и сланцевые заслоны обеспечивают локализацию взрывов метана и угольной пыли, фронты пламени которых распространяется со скоростью 100-285 м/с и 80-235 м/с соответственно;

4. Технологические схемы расстановки и выбор средств локализации взрывов метана и угольной пыли должны базироваться на оценке их технических параметров в зависимости от скорости распространения фронта пламени по сети горных выработок.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны методические рекомендации по оценке последствий взрывов метана и угольной пыли и предложен критерий позволяющий классифицировать аварии по тяжести их социально-экономических последствий.

2. Установлена зависимость скорости распространения ударной волны от приведенного диаметра выработки и толщины слоя отложившейся угольной пыли с определением критической толщины слоя пыли, допускающей распространение самоподдерживающейся детонации в таких пылевоздушных системах.

3. Разработан методический подход комплексного изучения технических и социально-экономических условий повышения уровня безопасности, направленный на снижение тяжести последствий взрывов метана и угольной пыли посредством определения эффективной области применения автоматических и пассивных водяных (сланцевых) заслонов, в зависимости от скорости распространения фронта пламени по сети горных выработок.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: анализом значительного количества публикаций по исследуемой и смешанным проблемам, изучением большого объема статистической информации, использованием в реализации научной задачи современных методов статистического анализа, теории безопасности и надежности систем, а также практическим использованием результатов работы на угольных шахтах России.

Практическая значимость работы заключается в обосновании рациональных параметров средств локализации взрывов метана и угольной пыли и технологических схем их расстановки по сети горных выработок, а также в обосновании необходимости замены устаревших пассивных средств взрывозащиты горных выработок на современные автоматические системы взрывоподавления-локализации взрывов в шахте.

Предложенная методика определения и оптимизации показателей ущерба от аварии может быть использована для оценки условий страхования техногенных рисков.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований составной частью вошли в «Инструкцию по применению средств локализации и предупреждения взрывов пылегазовоздушных смесей в горных выработках угольных шахт», зарегистрированную в Минюсте России 25.12.2012г., рег.№ 26359 и утвержденную приказом Ростехнадзора №634 от 6 ноября 2012г.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских научно-технических конференциях, совещаниях, выставках, в том числе: Международной специализированной выставке угледобывающих и углеперерабатывающих технологий и оборудования УГОЛЬ/МАЙНИНГ 2010 (Украина, г.Донецк, 2010 г.), Межгосударственной выставке «20 лет СНГ: к новым горизонтам партнерства» (ВВЦ, г.Москва, 2011 г.), Международной выставке-ярмарке «ЭКСПО-СИБИРЬ» (г.Кемерово, 2011 г), Международной научно-практической конференции «Современные технологии ведения взрывных работ, промышленные взрывчатые вещества и техногенная безопасность» (ИПКОН РАН, г.Москва, 2012 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, 5 приложений, содержит 150 стр., 33 рисунка, 17 таблиц и список литературы из 83 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Потенциальная опасность взрывов метана и угольной пыли определяется многими факторами к которым прежде всего необходимо отнести горно-геологические и горнотехнические с организационно-субъективными факторами. При этом опасность взрыва возникает только при сочетании определенных горно-геологических и горнотехнических с организационно-субъективными факторами в определенном месте и определенный промежуток времени.

Весомый вклад в развитие теории и практики взрывозащиты горных выработок угольных шахт внесли ведущие ученые: А.Т.Айруни, В.Е.Александров, В.В.Азатян, А.М.Брюханов, Б.И.Вайнштейн, Д.Ф.Даценко, А.В.Джигрин, В.С.Забурдяев, С.А.Калякин, М.Е.Краснянский, В.П.Колосюк, А.И.Козлюк, В.И.Мамаев, А.А.Мясников, М.И.Нецепляев, Г.А.Поздняков, П.М.Петрухин, А.А.Скочинский, С.П.Старков, В.И.Стикачев, К.И.Ткаченко, В.П.Чарков, В.И.Чикун, Н.Р.Шевцов и др.

Взрывы метана и угольной пыли являются значительным тормозом развития горных работ на угольных шахтах, нарушают нормальный режим работы шахты, наносят значительный ущерб, снижают производительность труда, уничтожают или деформируют выработки, оборудование, нарушают проветривание и другие производственные процессы в очистных, подготовительных выработках, уменьшают объем добычи угля, нередко травмируют и приводят к гибели рабочих.

Для прогнозирования и выявления потенциальных очагов вспышек (взрывов) по сети горных выработок необходим критерий, с помощью которого можно было бы оценить степень опасности той или иной горной выработки или ее участка, а затем сравнить их между собой. В качестве такого критерия может быть использована вероятность возникновения в выработке (или на ее участке) аварийной ситуации, состоящей в совмещении во времени и в пространстве действия источника воспламенения и взрывоопасной среды (т.е. наличия в ее атмосфере взрывоопасной концентрации метана, а на ее поверхности взрывоопасных отложений угольной пыли).

Изменение безопасного состояния в горной выработке происходит под действием потоков событий, состоящих в случайных процессах возникновения в выработке опасных явлений, совмещение которых приводит к возникновению аварийной ситуации.

При принятии ряда упрощающих допущений процесс изменения состояний подобной системы описывается Марковским случайным процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Интенсивности потоков событий, состоящих в возникновении в различных горных выработках или на отдельных их участках источников воспламенения и взрывоопасных концентраций метана, определялись в ходе статистического анализа всей совокупности данных о действительно происшедших на шахтах за 50-летний период вспышках (взрывах) метана и угольной пыли. С этой целью все данные классифицировались по типам горных выработок и по источникам воспламенения. Каждая из групп аварий, расположенная в хроно-

логическом порядке, исследовалась по методу статистического анализа временных промежутков между последовательными событиями.

Вычисленные в ходе статистического анализа случаев взрывов (вспышек) интенсивности потоков событий, состоящих в возникновении в основных типах горных выработок различных источников воспламенения, а также в возникновении в их атмосфере взрывоопасных концентраций метана позволили для каждого конкретного случая определить численные значения коэффициентов системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова и решить ее с помощью приближенных численных методов вычислительной математики. В результате были определены вероятности возникновения аварийных ситуаций в основных типах горных выработок шахты.

Наиболее опасным в отношении возникновения вспышек (взрывов) представляется призабойный участок подготовительной выработки, проводимой с помощью буровзрывных работ (вероятность возникновения аварийных ситуаций $P = 523,9 \cdot 10^{-4}$). Несколько меньшую опасность представляет этот же участок подготовительной выработки, проводимой проходческими комбайнами ($P = 239,0 \cdot 10^{-4}$). Такая же по порядку вероятность возникновения аварийных ситуаций соответствует распадпунктам очистных забоев, расположенным на откаточных штреках ($P = 248,0 \cdot 10^{-4}$ при использовании конвейерного и $P = 213,9 \cdot 10^{-4}$ рельсового транспорта), распадпунктам подготовительных забоев ($P = 265,0 \cdot 10^{-4}$ и $171,6 \cdot 10^{-4}$ соответственно), оборудованные механизмами сопряжения откаточных штреков с уклонами или бремсбергами ($P = 193,9 \cdot 10^{-4}$). К следующим по опасности вспышек и взрывов относятся распадпункты на вентиляционных штреках, совокупности механизмов и оборудования на сопряжениях лав с вентиляционными и откаточными штреками ($P = 97,5 \cdot 10^{-4}$ и $89,9 \cdot 10^{-4}$ соответственно) при отработке пласта обратным ходом (система разработки длинными столбами), сопряжения лав с вентиляционными и откаточными штреками при сплошной системе разработки ($P = 46,2 \cdot 10^{-4}$ и $55,0 \cdot 10^{-4}$), приводы ленточных конвейеров и перегружателей, маневровых лебедок на призабойных участках подготовительных выработок ($P = 53,7 \cdot 10^{-4}$ и $56,7 \cdot 10^{-4}$). При этом вне перечисленных участков, т.е. на остальной протяженности рассмотренных типов горных выработок, вероятности возникновения аварийных ситуаций не превышают величины, равной $29 \cdot 10^{-4}$.

Следует отметить, что наметились новые тенденции в распределении очагов взрывов (вспышек) метана и угольной пыли по основным типам горных выработок: доля взрывов (вспышек), очаги которых располагались в участковых и общешахтных выработках, возросла с 13% на начало 70-х годов XX столетия, до 18% на начало XXI века. Кроме того, если в очистных и подготовительных забоях локальные вспышки переросли в развитые взрывы соответственно в 16,3% и в 24,7% случаев, то в прочих участковых и общешахтных выработках во взрывы метана и угольной пыли развилось 45,4% вспышек метана. Указанные тенденции свидетельствуют о возрастающей опасности очагов вспышек (взрывов), распределенных по сети горных выработок шахты, и

подтверждают необходимость совершенствования систем взрывозащиты и, прежде всего, средств локализации взрывов метана и угольной пыли.

Проведенное сравнение относительной опасности различных потенциальных очагов позволяет обосновать рациональные технологические схемы расстановки по сети горных выработок шахты датчиков пламени и взрывоподавляющих устройств, прежде всего, автоматических систем локализации вспышек (взрывов), при котором будет обеспечено их гашение в начальной стадии развития в подавляющем большинстве случаев, т.е. средствами взрывозащиты в первую очередь должны быть оснащены:

- подготовительные забои, проводимые по углю или по углю и породе, вне зависимости от используемого способа проходки;
- места размещения распрядпунктов, которые расположены на откаточных или вентиляционных штреках, а также на призабойных участках подготовительных выработок;
- сопряжения лав с откаточными и вентиляционными штреками, где размещена совокупность механизмов и оборудования;
- сопряжения откаточных штреков с уклонами или бремсбергами, где сконцентрировано горно-шахтное оборудование.

Проявление потенциальной опасности технологического процесса или операции в виде аварий носит случайный характер, поэтому может определяться вероятностными показателями, отражающими степень возможности опасных последствий, а также экономическими показателями, оценивающими ущерб от аварий.

Учитывая то, что аварийные ситуации на угольных шахтах случаются достаточно часто, актуальной становится задача оптимизации показателей ущерба от аварий.

Случайное событие возникновения аварий при выполнении определенного процесса определяется вероятностью P_j для соответствующего этапа эксплуатации угольной шахты. Будем полагать, что каждому опасному процессу соответствует свой тип аварии (взрыв или вспышка метана, взрыв метана и угольной пыли, взрыв угольной пыли), что влияет на параметры распространения и воздействия в зависимости от применяемых средств взрывозащиты.

Ущерб C_j , возникший в результате аварии j -го типа, является случайной величиной. Для каждого типа аварии можно найти закон распределения $f(C_j)$ случайной величины ущерба C_j , (будем полагать эту величину непрерывной). Как всякая случайная величина C_j имеет математическое ожидание $M[C_j]$, дисперсию $D[C_j]$ и другие моменты распределения.

На стадии разработки и проектирования можно уменьшить вероятность P_j аварии, если, с одной стороны, затратить на это дополнительные ресурсы, например, ввести дополнительные системы локализации взрыва к основным системам взрывоподавления. С другой стороны, можно увеличить вероятность аварий P_j сэкономив на стоимости производства и эксплуатации совокупности систем взрывозащиты. Безусловно, что существует какое-то оптимальное значение для каждой вероятности P_j .

Аналогично, с одной стороны, затратив дополнительно средства, можно в состав системы включить взрывоподавляющие устройства, уменьшающие в среднем ущерб. С другой стороны, можно уменьшить затраты на эксплуатацию системы, но увеличить средний ущерб от возможных аварий. Следовательно, могут существовать оптимальные значения условного математического ожидания ущерба $M[R_j]$.

Решение задачи оптимизации величин $M[R_j]$ и P_j для аварии j -го типа сводится к определению оптимальных значений $M_0[R_j]$ и P_{0j} , тогда оптимальный безусловный ущерб от аварий j -го типа можно рассчитать по зависимости

$$(M [C_j])_0 = M_0[R_j] P_{0j} \quad (1)$$

Эффективность применения средств взрывозащиты может определяться за счет оптимизации показателей ущерба от аварий посредством варьирования показателя вероятности аварии между ее уменьшением, если затратить на это дополнительные ресурсы, или ее увеличением при экономии средств на производство и эксплуатацию совокупности систем взрывозащиты.

Для учета последствий аварий предложен критерий (коэффициент) тяжести последствий аварий, учитывающий как экономические последствия так и травматизм рабочего персонала шахт.

На предприятиях тяжелой промышленности (особенно угольной) используют в качестве критерия сравнительной оценки предприятий по уровню травматизма так называемый показатель травматизма на 1 млн. единиц объема производства (в угольной промышленности 1 млн. т добычи угля). В этом показателе механически объединены в один критерий разнородные показатели, характеризующие производство с разных сторон.

Широкое распространение относительных величин, используемых для оценки уровня травматизма, можно объяснить недостаточным знанием их недостатков либо забвением общеметодического принципа, состоящего в том, что сравнению подлежат лишь сопоставимые явления.

Учитывая, что травматизм при крупных авариях, связанных со взрывом метана и угольной пыли, как бы поглощается общим травматизмом по шахте, рекомендуется использовать коэффициент тяжести последствий этих аварий, который в общем случае может быть представлен в виде:

$$K_{mn} = K_{\text{э}} + K_m + K_{\text{д}} \quad (2)$$

где $K_{\text{э}}$ – коэффициент, учитывающий объем распространения взрыва и экономический ущерб, нанесенный вследствие его происхождения

$$K_{\text{э}} = \frac{C_{\text{о.н.ф}}}{C_{\text{у.о.н.ф}}} \quad (3)$$

где $C_{\text{о.н.ф}}$ – стоимость основных производственных фондов, руб.;

$C_{y.o.n.f}$ – стоимость уничтоженных основных производственных фондов, руб.

Максимальное значение коэффициента $K_9 = 1$, в том случае, когда вследствие аварии уничтожены все основные производственные фонды;

K_m – коэффициент, учитывающий тяжесть последствия аварии связанный с травматизмом рабочего персонала

$$K_m = \lg \left(1 + 9 \frac{n_c + K_{э.с.} n_m}{N_c} \right) \quad (4)$$

где n_c – число смертельно травмированных людей в результате взрыва;

n_m – число тяжелотравмированных;

$K_{э.с.}$ – коэффициент эквивалентности числа тяжело травмированных числу смертельно травмированных;

N_c – количество людей находящихся в шахте на момент аварии.

Максимальное значение коэффициента $K_m = 1$, в том случае, когда вследствие аварии погибает весь персонал находящийся в шахте.

K_δ – коэффициент, учитывающий потерю добычи за определенный промежуток времени (период восстановления уровня добычи до аварии).

$$K_\delta = \frac{P_\delta}{D} \quad (5)$$

где P_δ – потеря добычи за определенный промежуток времени, т;

D – плановая добыча за этот промежуток времени, т.

Максимальное значение коэффициента $K_\delta = 1$, в том случае, когда вследствие аварии, подготовленные запасы не отрабатываются.

Следовательно максимальное значение коэффициента тяжести последствий аварий связанных со взрывами метана и угольной пыли $K_{mn} = 3$.

Анализ тяжести последствий аварий, по введенному нами показателю (8), позволил выявить четыре типа аварий.

На I-й тип аварий приходится до 70 % всех случившихся аварий. Эти аварии имеют, как правило, локальный характер и связаны в основном со вспышкой метана. Экономический ущерб, как правило, не превышает 5,0 млн. руб. (в ценах 2000 г.). Количество пострадавших при аварии до 10 человек, редко со смертельным исходом.

На II-й тип аварий приходится до 15 % всех случившихся аварий. Эти аварии имеют также локальный характер распространения, но отличаются от I-го типа, более значительным количеством пострадавших со смертельным исходом, порядка 2-3 человек. Экономический ущерб от аварии составляет порядка 5,0-30 млн. руб.

На III-й тип аварий приходится до 10 % всех аварий. Эти аварии, уже связаны с детонационным (взрывным) распространением по сети горных вырабо-

ток. Как правило число погибших составляет 5-15 человек. Экономический ущерб от аварии составляет порядка 30-90 млн. руб.

На IV-й тип аварий (катастрофический) приходится до 5 % всех аварий, но на эти аварии приходится порядка 70 % всех смертельных случаев (более 20 на одну аварию) и до 50 % убытков причиненных угольным компаниям авариями. Экономический ущерб от аварии превышает 90 млн. руб.

Взрывозащитная эффективность систем локализации взрывов метана и угольной пыли в значительной степени определяется рациональной расстановкой взрывоподавляющих устройств по сети горных выработок защищаемого участка или шахты в целом, при которой будет обеспечено гашение подавляющего большинства вспышек в начальной стадии развития непосредственно в очаге возникновения, т.е. у источника воспламенения.

В настоящее время для локализации взрывов угольной пыли в горных выработках применяются сланцевые заслоны, в которых в качестве гасящего материала используется инертная пыль, и водяные заслоны.

Механизм действия сланцевых (водяных) заслонов сводится к предварительному образованию облака диспергированных огнетушащих веществ на пути движения фронта пламени. Это достигается за счет энергии взрыва пыли, распространяющегося по сети горных выработок. Ударная волна разрушает заслон и диспергирует сланцевую пыль или воду. По принципу действия заслоны – пассивные.

Анализ результатов ранее произведенных экспериментов в СССР и Польше в опытных шахтах (штольнях) позволил установить взрывогасящие параметры сланцевых (водяных) заслонов для натуральных условий, а именно: длину заслона, необходимое количество материала в нем, минимальное и максимальное удаление места его установки от вероятного очага взрыва. Было установлено, что водяные заслоны с сосудами из различных пластмасс эффективно гасят пламя взрывов угольной пыли, распространяющихся со скоростью 100-285 м/с, а сланцевые заслоны – 80-235 м/с при удельном расходе огнетушащего материала 400 кг(л)/м².

Одним из перспективных путей предотвращения и локализации взрывов и вспышек метана или угольной пыли является автоматическое подавление возникших очагов воспламенения, т. е. применение автоматической взрывозащиты горных выработок.

Наиболее перспективными являются автоматические системы с принудительным распылением гасящих составов.

Автоматическое подавление очага воспламенения в общем виде включает в себя обнаружение (регистрацию) очага воспламенения и создание вокруг него или на пути его распространения пламегасящей среды. Поэтому в упрощенном виде функциональная схема системы автоматической взрывозащиты состоит из объекта защиты (горной выработки), датчика опасной (критической) ситуации и исполнительного органа (взрывоподавляющего устройства). Возмущающим воздействием для системы взрывозащиты, как правило, служит один из контрольных параметров объекта защиты, например нарастающий размер пламени очага воспламенения или давление в ударной воздушной

волне. При критической величине пламени приводится в действие исполнительный орган, создающий пламегасящую зону, которая локализует очаг воспламенения.

Для локализации очага воспламенения первым необходимым условием является создание пламегасящей зоны с концентрацией гасящего вещества не ниже флегматизирующей C_{ϕ} , при которой взрывоопасная смесь, к которой добавлен пламегаситель, становится невзрывчатой. В этом случае зона, в которой создана пламегасящая среда, является своего рода преградой для распространения пламени от очага воспламенения.

Локализация очага воспламенения заканчивается, когда очаг имеет определенный размер, т. е. часть взрывоопасной среды уже воспламенилась. В этом случае пламегасящая зона не только должна играть роль преграды для распространения пламени, но также должна быть «гасителем» энергии, запасенной в локализуемом очаге с тем, чтобы исключить ее передачу к взрывоопасной среде за пламегасящей зоной.

Для того, чтобы выполнить указанную функцию, пламегасящая зона должна иметь определенную протяженность. Очевидно, что чем больше протяженность пламегасящей зоны с концентрацией C_{ϕ} , тем больше энергии она может «погасить». С другой стороны, если пламегасящая зона имеет фиксированную протяженность l_3 , то для того, чтобы она выполнила функцию «гашения» пламени, в ней необходимо создать такую концентрацию пламегасителя, чтобы ее оказалось достаточно для выполнения данной функции. Обозначим указанную концентрацию через C_n . Рассмотрим, от чего зависят C_n и C_{ϕ} .

Как указывалось выше, концентрация пламегасителя C_{ϕ} делает смесь невзрывчатой. Она является константой для данной смеси и данного гасящего вещества. Величина C_{ϕ} зависит от теплопоглощающих свойств пламегасящего вещества и от его химической природы, поскольку вводимый во взрывчатую газовую или пылегазовую смесь порошок может оказывать сильное ингибирующее действие. Для ряда порошков эффект ингибирования является основным при флегматизации метана или пылевоздушных смесей, а теплопоглощающие свойства порошка играют вспомогательную роль.

При выполнении задачи пламегашения на заданной протяженности зоны должна быть создана такая концентрация, чтобы обеспечить «гашение» энергии очага воспламенения. Основную роль в этом процессе играют теплопоглощающие свойства порошка. Концентрация C_n определяется именно этими свойствами. В то же время C_n не может быть меньше C_{ϕ} , иначе смесь останется взрывчатой. Таким образом, всегда $C_n \geq C_{\phi}$.

Основной задачей решаемой при проведении исследований по созданию автоматических систем взрывозащиты, является обеспечение необходимого уровня их взрывоподавляющей эффективности.

В период существования СССР эта задача решалась путем проведения прямых экспериментов по подавлению взрывов метано- и пылевоздушных смесей в подземной штольне МакНИИ или опытном штреке с помощью натурного образца системы.

В результате оптимизации параметров взрывоподавления процесс обеспечения необходимого уровня эффективности (качества) систем взрывозащиты сводится к установлению динамики формирования пламегасящей среды с помощью вполне конкретного взрывоподавляющего устройства, а также к определению взрывозащитных характеристик гасящих веществ, основной из которых являются их теплопоглощающие свойства.

Теплопоглощающие свойства порошка определяются его теплоемкостью, а для разлагающихся порошков – эндотермичностью реакций разложения и теплоемкостью образующихся продуктов.

В настоящее время на угольных шахтах в стадии внедрения находятся автоматические системы взрывоподавления-локализации взрывов АСВП-ЛВ и АСВП-ЛВ.1М.

Техническая характеристика системы АСВП-ЛВ.1М:

Длина создаваемого заслона (облака) пламегасящей среды		не менее 30 м
Минимальная чувствительность срабатывания системы при давлении на фронте УВВ		0,02 МПа
Инерционность срабатывания системы		15-20 мс
Масса огнетушащего порошка типа П-АГС или ИСТО		не менее 25 кг
Объем рабочей полости		3290 см ³
Рабочее давление сжатого воздуха в рабочей полости УЛВ		12±15 % МПа
Масса системы, кг, не более		76

На рисунке 1 представлена схема размещения автоматической системы АСВП-ЛВ.1М в горной выработке.

Эффективность способов и средств борьбы со взрывами в шахтах, как правило, определяется экспериментальным путем. Экспериментальные взрывы проводят в опытных шахтах и штольнях, в которых можно создать условия взрыва в реальных шахтах.

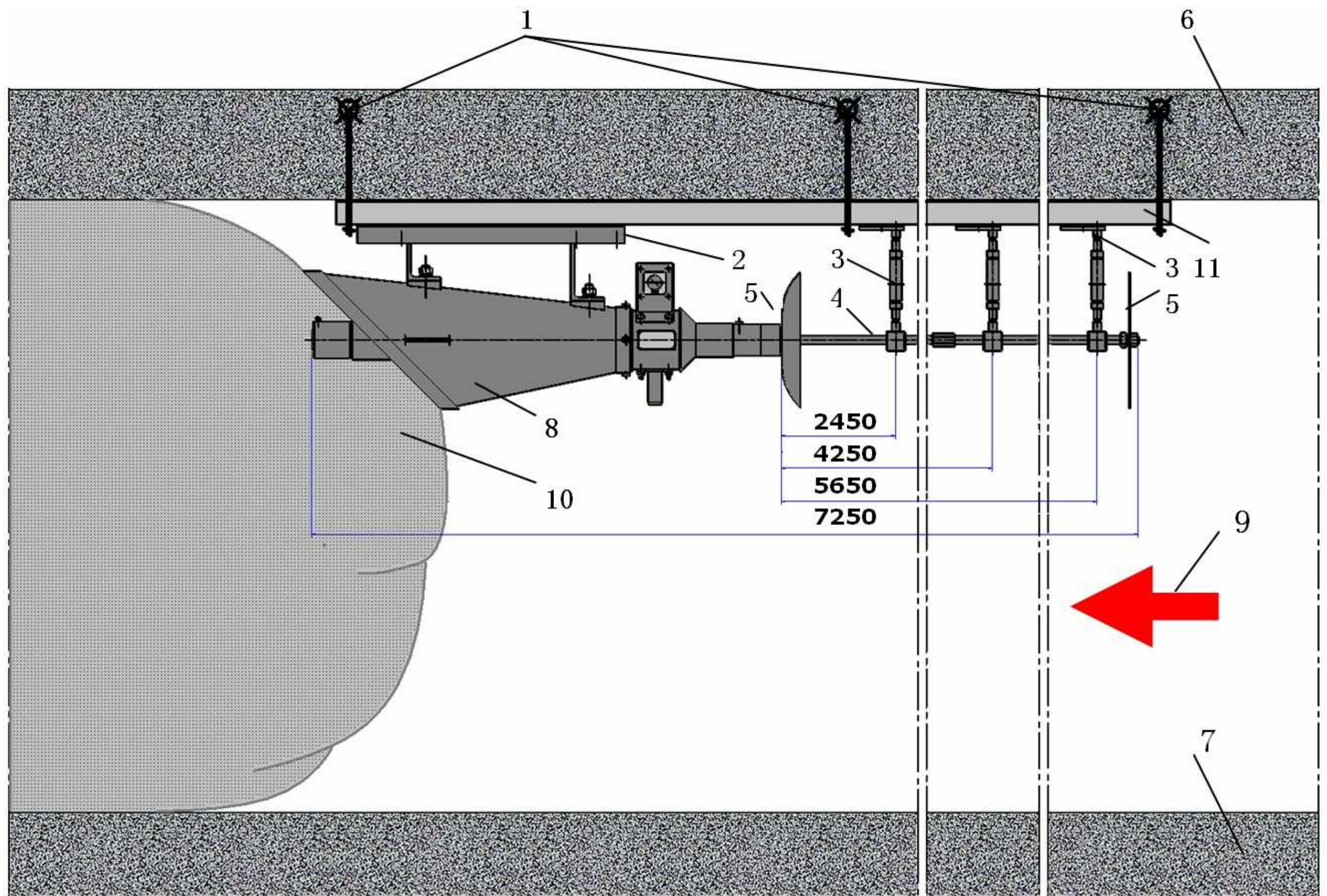
В настоящее время в России нет экспериментальных штолен, поэтому системы типа АСПВ-ЛВ.1М были испытаны в экспериментальной штольне Чунцинского научно-исследовательского угольного института (китайская угольная технологическая группа). Сечение штольни 7,2м², рабочая длина 398 м.

В ходе экспериментов было установлено:

- длина распространения облака огнетушащего порошка после срабатывания системы составила 30 м;
- время от срабатывания системы до осадки распыленного порошка (время жизни аэрозольного облака) составило 370-390 с;
- объемная концентрация огнетушащего порошка в аэрозольном облаке составила 11,6 – 113,3 г/м³;
- время между воздействием ударной воздушной волны на приемный щит системы и началом выброса огнетушащего порошка (быстродействие системы) составило 22-24 мс;

- на расстоянии от 13 до 30 м от установки АСВП-ЛВ.1М датчики не зафиксировали наличие пламени;

- установлено, что автоматические заслоны типа АСВП-ЛВ.1С эффективно локализуют взрыв угольной пыли, фронт пламени которого распространяется со скоростью 40-660 м/с.



1 – анкерное крепление; 2 – подвеска; 3 – поддержки; 4 – выносные штанги; 5 – приёмные щиты; 6 – кровля выработки; 7 – почва выработки; 8 – устройство локализации взрыва (УЛВ.1М); 9 – направление распространения фронтов ударно-воздушной волны и пламени, образованных в результате взрыва метановоздушной смеси и (или) угольной пыли; 10 – огнетушащий заслон, в виде облака из огнетушащего порошка во взвешенном состоянии; 11 – специальная крепёжная конструкция.

Рисунок 1 – Схема размещения автоматической системы АСВП-ЛВ.1М в горной выработке с использованием анкерного крепления

Таким образом, для автоматических заслонов типа АСВП-ЛВ концентрация огнетушащего вещества в заслоне $C_{\text{Л}}$, в зависимости от сечения горной выработки, в 80-200 раз меньше, чем у пассивных сланцевых (водяных) заслонов, при этом время формирования огнетушащего вещества в заслоне $t_{\text{Ф}}$ меньше в 30 раз, а время его жизни превышает более чем в 100 раз.

Учитывая тот факт, что различные заслоны могут эффективно локализовать взрыв угольной пыли, фронт пламени которого распространяется с определенной скоростью, важной задачей является определение параметров распространения взрыва метана и угольной пыли по сети выработок.

При решении вопросов борьбы со взрывами угольной пыли большой интерес представляет взаимосвязь между пламенем и ударной воздушной волной при распространении взрыва по выработке.

Параметры ударной волны и скорость распространения фронта пламени взаимосвязаны. С возрастанием скорости распространения фронта пламени давление на фронте ударной волны увеличивается, а, следовательно, растет и ее скорость.

Нами установлена зависимость для определения скорости распространения ударной волны как функции приведенного диаметра выработки и толщины слоя отложившейся угольной пыли.

Для определения скорости распространения ударно-воздушной волны U_s от приведенного диаметра выработки D получена зависимость:

$$\left(U_s - \frac{a_0^2}{U_s} \right) = 2(\gamma^2 - 1)\Delta H, \quad (6)$$

где a_0 – скорость звука в газе перед волной,

γ – показатель адиабаты газа, который можно принять равным $1,3 \div 1,4$ (в сильно нагретом воздухе и в продуктах горения он незначительно снижается),

ΔH – тепловыделение в зоне сверхзвукового потока за волной детонации. Его зависимость от приведенного диаметра оценивается как:

$$\Delta H = \begin{cases} K_1 D^{1/2}, & L \leq L^*; \\ K_2 / D, & L > L^*. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь критическая длина L^* соответствует расстоянию, на котором поднимется вся пыль, а L – длина зоны сверхзвукового потока. Коэффициент K_1 определяется на основе опытных данных; коэффициент K_2 согласуется с ним так, чтобы при $L = L^*$ зависимость (7) была непрерывной.

Неявная зависимость (6) при подстановке значения ΔH , рассчитанного по восходящей ветви зависимости (7), выражается явно с помощью решения квадратного уравнения, и выглядит следующим образом:

$$U_s(D) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{2(\gamma^2 - 1)K_1 D^{1/2}} + \sqrt{4a_0^2 + 2(\gamma^2 - 1)K_1 D^{1/2}} \right]. \quad (8)$$

Приведенный диаметр выработки определяется по полному периметру выработки Π и площади сечения выработки A_0 следующим образом: $D = 4A_0/\Pi$.

Для восходящей ветви зависимости (7) важно значение приведенного диаметра D^* , такого когда $L(D^*) = L^*$.

Если нам известно значение D^* , то по нему можно определить значение толщины слоя пыли h_{Π} , который успеет подняться раньше, чем подойдет звуковой участок потока газа за волной из зависимости:

$$\frac{4(\gamma-1)^{2/3} K_1^{4/3} (D^*)^{4/3}}{\sqrt{2(\gamma^2-1)K_1(D^*)^{1/2}} + \sqrt{4a_0^2 + 2(\gamma^2-1)K_1(D^*)^{1/2}}} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Pi_{\Pi}}{\Pi} \right)^{2/3} h_{\Pi} \quad (9)$$

где Π_{Π}/Π – отношение периметра выработки, занятого пылью, к полному периметру

α – параметр, зависящий от условий горения угольной пыли.

При этом горение остальной поднявшейся пыли уже не будет влиять на скорость распространения взрывной волны и перепад давления на ней. Таким образом, данная толщина может рассматриваться как минимально возможная, при которой ударно-воздушная волна будет распространяться по восходящей ветви кривой, определяемой соотношением (7). Нисходящая ветвь согласуется с восходящей по непрерывности, поэтому, определив $D^*(h_{\Pi})$, можно определить скорость волны при $D > D^*$:

$$U_s(D) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{2(\gamma^2-1)K_1(D^*)^{1/2} \frac{D^*}{D}} + \sqrt{4a_0^2 + 2(\gamma^2-1)K_1(D^*)^{1/2} \frac{D^*}{D}} \right]. \quad (10)$$

Установленная зависимость для определения скорости распространения ударной волны как функции приведенного диаметра выработки и толщины слоя отложившейся угольной пыли носит существенно нелинейный характер. Для достаточно больших диаметров выработки (или достаточно тонких слоев пыли) скорость волны убывает с ростом диаметра ввиду нехватки одного из реагентов для протекания химической реакции. Полученная зависимость позволяет определять критические толщины слоя пыли, допускающие распространение самоподдерживающейся детонации в таких пылевоздушных системах.

В таблице 1 приведена область применения взрыволокализирующих заслонов по стадиям развития взрыва. Технологические схемы расстановки и выбор средств локализации взрывов метана и угольной пыли должны базироваться на оценке их технических параметров в зависимости от скорости распространения ударно-воздушной волны и фронта пламени по сети горных выработок.

Результаты выполненных исследований были использованы при разработке «Инструкции по применению средств локализации и предупреждения взрывов пылегазовоздушных смесей в горных выработках угольных шахт». На рисунках 2, 3 и 4 представлена часть схем расстановки пассивных и автоматических заслонов, которые вошли в инструкцию.

 – сланцевый взрыволокализирующий заслон;
  – водяной взрыволокализирующий заслон;
  – автоматический взрыволокализирующий заслон

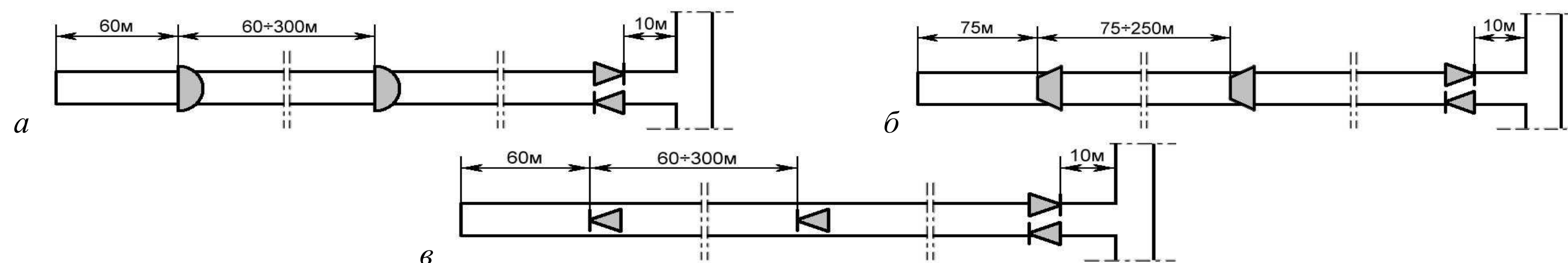


Рисунок 2 – Схемы установки заслонов в подготовительной выработке

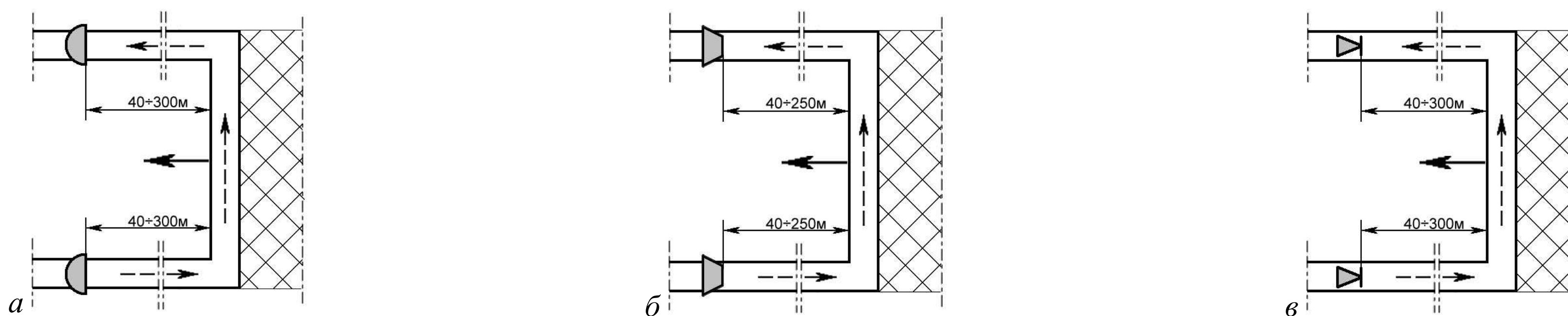


Рисунок 3 – Схемы установки заслонов от сопряжения с очистной выработкой по ходу движения забоя в конвейерной и вентиляционной выработке с возвратной схемой проветривания

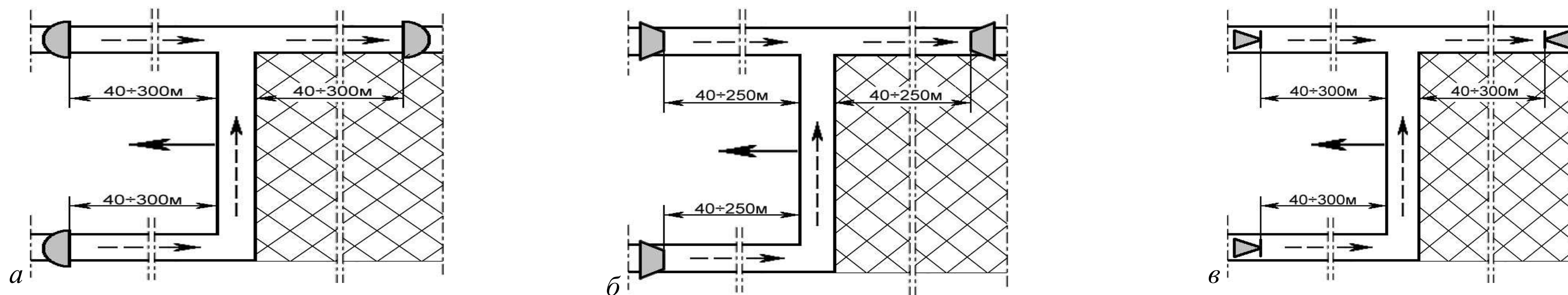


Рисунок 4 – Схемы установки заслонов от сопряжения с очистной выработкой в конвейерной выработке и в вентиляционной выработке, по которой отводится вентиляционная струя при прямоточных с подсвежением схемах проветривания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы заключаются в следующем:

1. Анализ аварийных ситуаций, связанных со взрывом метана и угольной пыли, с определением вероятностей их возникновения в различных горных выработках, позволил установить наиболее опасные места, которые в первую очередь должны быть оснащены средствами локализации взрывов, прежде всего автоматическими системами, при этом будет обеспечено подавление взрыва в начальной стадии его развития. Средствами взрывозащиты в первую очередь должны быть оснащены:

- подготовительные забои, проводимые по углю или по углю и породе, вне зависимости от используемого способа проходки;
- места размещения распрелпунктов, которые расположены на откаточных или вентиляционных штреках, а также на призабойных участках подготовительных выработок;
- сопряжения лав с откаточными и вентиляционными штреками, где размещена совокупность механизмов и оборудования;
- сопряжения откаточных штреков с уклонами или бремсбергами, где сконцентрировано горно-шахтное оборудование.

2. Разработанный критерий (коэффициент) тяжести последствий аварии, учитывающий объем распространения взрыва и экономический ущерб, нанесенный вследствие его происхождения, травматизм людей и потерю добычи угля, позволил выделить четыре типа аварий, связанных со взрывом метана и угольной пыли.

Оптимизация показателей ущерба от аварий, посредством варьирования показателя вероятности аварии и математического ожидания ущерба от нее, определенного на основании разработанного критерия (коэффициента), позволяющего классифицировать аварии по тяжести их социально-экономических последствий, позволяет выбирать более эффективный способ пылевзрывозащиты горных выработок, в том числе средства локализации взрывов метана и угольной пыли.

3. Установлена зависимость скорости распространения ударной волны от приведенного диаметра выработки и толщины слоя отложившейся угольной пыли. Зависимость носит существенно нелинейный характер для достаточно больших диаметров выработки (или достаточно тонких слоев пыли) скорость волны убывает с ростом диаметра ввиду нехватки одного из реагентов для протекания химической реакции. Зависимость позволяет определять критические толщины слоя пыли, допускающие распространение самоподдерживающейся детонации пылевоздушных смесей в сети горных выработок.

4. Средство локализации может выполнять свое назначение только при соблюдении двух условий: огнетушащее облако должно перекрыть сечение выработки на участке заданной длины к моменту подхода фронта пламени; в выработке должна быть создана и поддерживаться в течении заданного времени концентрация гасящего вещества не ниже флегматизирующей.

Установлено, что основными параметрами, определяющими эффективность средств локализации взрывов метана и угольной пыли, помимо концентрации огнетушащего вещества C_D , является время формирования t_ϕ и время жизни $t_{\text{ж}}$ огнетушащего вещества в заслоне.

Проведенные экспериментальные исследования по определению технических параметров автоматических заслонов типа АСВП-ЛВ позволили установить, что

концентрация огнетушащего вещества в заслоне $C_{\text{л}}$, в зависимости от сечения выработки, в 80-200 раз меньше, чем у пассивных заслонов, при этом время формирования огнетушащего вещества в заслоне t_{ϕ} меньше в 30 раз, а время его жизни $t_{\text{ж}}$ больше чем в 100 раз.

5. Обоснованы рациональные параметры пассивных и автоматических средств локализации взрывов метана и угольной пыли. Для повышения эффективности взрывозащиты горных выработок технологические схемы расстановки и выбор средств локализации взрывов метана и угольной пыли должны базироваться на оценке их технических параметров в зависимости от скорости распространения фронта пламени по сети горных выработок.

Технические параметры автоматической системы взрывоподавления-локализации взрывов (АСВП-ЛВ) обеспечивают локализацию взрыва метана и угольной пыли, фронт пламени которого распространяется со скоростью 40-660 м/с, в то время как пассивные сланцевые заслоны локализуют взрыв, фронт пламени которого распространяется со скоростью 80-235 м/с, а водяные заслоны – 100-285 м/с.

6. Результаты выполненных исследований, в частности разработанные технологические схемы расстановки средств локализации взрывов угольной пыли, были использованы при разработке «Инструкции по применению средств локализации и предупреждения взрывов пылегазовоздушных смесей в горных выработках угольных шахт».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исаев И.Р. Статистический анализ данных о вспышках (взрывах) газа, пыли и экзогенных пожарах // Научные сообщения ИГД им.А.А.Скочинского №335, 2009 г., с.241-246.

2. Джигрин А.В., Исаев И.Р., Мясников С.В. Определение потенциальных очагов вспышек (взрывов) газа и пыли по сети горных выработок // Научные сообщения ИГД им.А.А.Скочинского №335, 2009 г., с.231-240.

3. Джигрин А.В., Исаев И.Р., Мясников С.В. Оценка и прогнозирование взрывоопасных ситуаций в горных выработках угольных шахт // Научные сообщения ИГД им.А.А.Скочинского №336, 2010 г., с.101-110.

4. Джигрин А.В., Исаев И.Р., Мясников С.В. Прогнозирование взрывов газа и пыли в угольных шахтах // Безопасность труда в промышленности, №4, 2010 г., с.38-42.

5. Джигрин А.В., Исаев И.Р. Оценка последствий взрывов метана и пыли в угольных шахтах // Научно-технический сборник «Взрывное дело» №106/63, 2011 г. С.219-227.

6. Исаев И.Р. Оптимизация показателей ущерба от аварий, связанных со взрывом метана и пыли в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень, №9, 2012 г, С.372-375.

7. Исаев И.Р. Разработка рациональных параметров средств локализации взрывов метана и угольной пыли // Научные сообщения ИГД им.А.А.Скочинского №337, 2012 г.

8. Антоньев А.В., Исаев И.Р., Мясников С.В. Эффективные области применения средств локализации взрывов метано-пылевоздушных смесей в

угольных шахтах // Научно-технический сборник «Взрывное дело» №108/65, 2012 г. С.362-370.

9. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Антоньев А.В., Исаев И.Р. Параметры распространения в выработках ударных и детонационных волн, образующихся при взрыве пылеметановоздушной смеси // Научно-технический сборник «Взрывное дело» №109/66, 2013 г. С.205-213.