

**ДОНЕЦКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

ШЕВЦОВ Николай Романович

**ТЕОРИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВА,
СПОСОБЫ И СРЕДСТВА
ВЗРЫВОЗАЩИТЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ**

**Специальность 05.26.01 — „Охрана труда и пожарная
безопасность“**

**Д и с с е р т а ц и я
в форме научного доклада
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Работа выполнена в Государственном Макеевском научно-исследовательском институте промышленности.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816278 (W)

Официальные оппоненты:

докт. техн. наук, проф.
докт. техн. наук, проф.
докт. техн. наук

ЯРЕМБАШ И. Ф.
ТКАЧУК К. Н.
ДОБРЯНСКИЙ Ю. П.

Ведущая организация—Институт геотехнической механики
АН Украины.

Защита диссертации состоится 9 октября 1992 г.
в 12 часов на заседании специализированного совета Д 068.20.02
при Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом
институте по адресу: 340000, г. Донецк, ул. Артема, 58.

С диссертацией в форме научного доклада можно ознакомиться
в библиотеке института.

Автореферат разослан 7 сентября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
докт. техн. наук, профессор

ЧЕРНЯЕВ В. И.

Диссертация, представленная в форме научного доклада, является результатом исследований автора, опубликованных в 1967-1990 г.г.

Актуальность проблемы. В настоящее время, в связи с переходом горных работ на глубокие горизонты и интенсификацией производственных процессов в угольных шахтах возросло метановыделение, что сопряжено с опасностью взрывов газопылевоздушных сред, катастрофические последствия которых общеизвестны.

Несмотря на достигнутый достаточно высокий уровень безопасности взрывных работ, они по-прежнему остаются одной из основных причин воспламенения метана и угольной пыли (на их долю приходится 36% всех происшедших аварий). Это обусловлено спецификой взрывных работ, не исключающей полностью образование взрывоопасной среды и появление импульсов, способных воспламенить ее. Предупреждение и локализация взрывов в шахтах, опасных по газу и взрыву пыли, таким образом, является актуальной задачей, решение которой традиционными путями является не всегда успешным. Необходим принципиально новый подход к решению, учитывающий комплекс факторов, сопровождающих взрывной процесс и обуславливающих конечный результат. В рамках существующих воззрений на механизмы воспламенения и распространения пламени эти факторы не могут быть учтены, тем более невозможно на этой основе осуществить расчет расхода пламегасящего вещества для локализации взрыва. В диссертационной работе решена эта актуальная проблема. В нее включены результаты многолетних исследований, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора по тематическим планам работ МакНИИ, основная часть которых проводилась на основании программы ГКНТ по решению научно-технической проблемы 0.05.07.07.01, Республиканской целевой программы "Энергокомплекс" РН 05.06.Ц.02 и программы Минуглепрома СССР "Взрывозащита" (приказ от 26.01.88 № 13).

Целью работы является разработка теории локализации взрыва в начальной стадии его возникновения динамически неустойчивыми дисперсными системами со взрывчатой дисперсионной средой и создание на ее основе способов и средств предупреждения развития взрывов газопылевоздушных смесей по сети горных выработок при взрывных работах в шахтах, опасных по газу и взрыву пыли.

Идея работы заключается во введении новой концепции, исходящей из представления о дискретном характере процесса локализации взрыва, существования пороговых режимов этого процесса, их моделирования и построения систем взрывозащиты на этой основе с использованием порошковых ингибиторов с заданными свойствами.

Методы исследования. В работе использован комплексный метод, включающий системный анализ существующих механизмов предупреждения и локализации взрыва, способов и средств взрывозащиты горных выработок; теоретические и экспериментальные исследования физической модели локализации взрыва динамически неустойчивыми дисперсными системами, их теплофизических и флегматизирующих свойств и условий движения; промышленные испытания и внедрение разработанных способов и средств обеспечения взрывобезопасности горных выработок.

При этом использованы методы теории планирования эксперимента, математического анализа, классической физики, технической термодинамики.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Процесс локализации взрыва имеет дискретный (пороговый) характер, основные параметры локализуемого взрыва определяются ингибирующими, теплофизическими и аэродинамическими характеристиками распыляемой среды, связь между которыми может быть установлена только на критериальном уровне. Точную оценку степени взрывозащитной эффективности веществ нельзя дать без учета фактического режима распыления и локализации, исходя только из их химической и физической природы.

2. Для выявления закономерности формирования локализующей взрыв буферной среды принята термодинамическая модель, связывающая пространственно-временные характеристики формируемого предохранительного облака с тепловой мощностью локализуемого взрыва и энергоносностью среды, зависящей от ее плотности и удельного теплопоглощения.

3. Энергетическая эффективность распыляющего конденсированную среду заряда ВВ зависит критериально от импульса силы взрыва, скорости расширения и массового расхода продуктов детонации.

4. Взрывание зарядов ВВ без выброса забойки осуществляется при соблюдении критериальных условий, связывающих детонационные

свойства заряда, плотность заряда и запирающую эффективность забоечного материала, зависящую от его насыпной и физической (теоретической) плотности.

Обоснована применимость двух известных моделей расчета давления в зарядной полости при взрыве зарядов ВВ, основанных на учете состава продуктов взрыва (метод Тейлора), а также на учете степени расширения зарядной полости (через точку сопряжения).

5. Установлено оптимальное время записывания продуктов взрыва ВВ в буферной среде, равное 0,42 мс, при отклонении от которого их воспламеняющая способность возрастает по кривой третьего порядка.

6. Установлена и подтверждена многофакторными экспериментами закономерность изменения скорости выбрасывания забойки из канала под действием взрыва.

7. Апробированы и реализованы технические решения, способные предупреждения и локализации взрывов, основанные на применении специально разработанных порошковых композиций с полифункциональными взрывозащитными свойствами, которые позволяют обеспечить безопасность взрывных работ шпуровым и скважинным методами в наиболее опасных ситуациях угольных шахт. Разработанная методика дифференцированной оценки взрывозащитной эффективности веществ позволяет экспериментально определить их флегматизирующую концентрацию и удельное теплотеплопоглощение.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена: соответствием установленных закономерностей формирования дисперсных систем и гашения продуктов взрыва основным физическим законам и качественным представлениям о характере протекания процессов; необходимым объемом экспериментальных материалов, полученных в шахтах и на специальных физических моделях выработок при проведении исследований, связанных с разработкой теории локализации взрыва, способов и средств взрывозащиты горных выработок при взрывных работах; проведением экспериментов по локализации взрывов метано-воздушной смеси в идентичных условиях за счет ежедневных контрольных воспламенений при различных концентрациях метана с последующей установкой заданного уровня взрывчатой смеси; положительными результатами использования теоретических и экспериментальных разработок в ходе опытно-промышленных испытаний и внедрения способов и средств взрывозащиты горных выработок и ликвидации системы "Заслон АВП-I" методом

принудительного срабатывания, а также локализацией взрыва при ее эксплуатации на шахте "Победа" (ПО "Краснодонуголь"); удовлетворительной сходимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными в шахтных и лабораторных условиях; тем, что разработанная теория позволяет объяснить ранее известные, но неидентифицированные в области предупреждения и локализации взрывов факты.

Научная новизна выполненных исследований состоит в том, что на основе нового методологического подхода создана целостная теория локализации взрывов в горных выработках при взрывных работах дисперсными системами со взрывчатой дисперсионной средой, формируемой взрывным способом, включающая в себя: критериальные условия локализации вспышек и взрывов различной мощности в начальной стадии развития в загазированных горных выработках, проводимых буровзрывным способом; открытие неизвестного ранее свойства оптимальности времени запыления продуктов взрыва ВВ как воспламеняющего агента буферной средой; выявление закономерности разлета продуктов взрыва различной мощности и вида в буферных средах различной энергоносности; разработку математической модели процесса локализации взрыва, имеющего механизм дискретного действия, в начальной стадии развития в горных выработках, связывающей основные параметры взрыва, флегматизирующие и теплофизические свойства дисперсной фазы, а также аэродинамические характеристики средств ее распыления; раскрытие общей закономерности формирования буферной среды заданной массы и различной структуры и взаимодействия ее с преградой; установление и подтверждение многофакторными экспериментами закономерности изменения максимальной скорости выбрасывания забойки из канала под действием взрыва; создание и экспериментальную проверку математической модели, описывающей баллистику линейного взрывоподавления, работающего на принципе распыления порошка под действием взрыва; разработку метода расчета параметров камуфлетного взрывания скважинного заряда без выброса забойки из скважины и времени истечения продуктов взрыва из камуфлетной полости; разработку основных принципов конструирования быстродайствующих систем принудительного распыления порошковых составов в горных выработках.

Научное значение работы заключается в разработке феноменологической теории локализации взрыва, связывающей характеристики взрыва с параметрами буферной среды, локализующей взрыв, и уста-

навливающей общие критериальные условия предотвращения и локализации взрыва, справедливые для любых способов и средств взрывозащиты.

В свете этой теории подвергаются переосмысливанию некоторые взгляды на механизм локализации взрыва и интерпретация основных понятий обеспечения взрывобезопасности горных выработок, таких как взрывопредотвращающая концентрация и некоторых критериев.

Созданная теория позволяет объяснить ряд явлений, связанных с воспламенением взрывоопасных смесей, которые ранее не могли быть объяснены. Созданные основы научного построения и оценки уровня эффективности средств локализации взрыва позволяют разработать принципиально новые направления в области взрывозащиты горных выработок при производстве взрывных работ. Предложенная теория позволяет рассчитать параметры высокопредохранительных оболочечных ВВ; восходящие тепловые потоки при обосновании параметров систем взрывозащиты газоконденсатопроводов, все параметры надежного функционирования систем предупреждения и локализации взрывов, оставляя за испытаниями натуральных образцов только одну функцию - проверочную.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- разработана саморегулирующаяся технология взрывания скважинных зарядов без выброса забойки, которая внедрена при разупрочнении труднообрушаемых пород кровли (передовом торпедировании);
- разработаны и внедрены в подготовительных и очистных забоях угольных шахт предохранительные аэрозольные (порошковые) завесы;
- создана автоматическая система локализации взрывов в начальной стадии развития, в подготовительных выработках при взрывных работах "Заслон АВП-1";
- созданы взрывоподавляющие порошковые композиции, в том числе ВМК-1, ПСЕ-ТМ, КСВ-30, ПВХ-1Н, которые заложены в перечисленные способы и средства взрывозащиты горных выработок; на основе порошкового ингибитора КСВ-30 разработан и внедрен состав пастообразной забойки ПЗМ-3;
- впервые разработана и внедрена в МакНИИ методика экспериментального определения в опытном штреке (в условиях максимально приближенных к производственным) флегматизирующей концентрации и удельного теплопоглощения (пламегасящей концентрации) веществ при взрывном способе их распыления.

За большой вклад в техническое развитие средств взрывозащиты горных выработок автору в 1985 г. присуждена премия имени академика А.А.Скочинского, а в 1990 г. присвоено почетное звание "Заслуженный изобретатель Украинской ССР".

Реализация работы. Технология камуфлетного взрывания скважинных зарядов ВВ без разгерметизации зарядной полости внедрена в II шахтах 4 производственных объединений по добыче угля Донбасса при разупрочнении кровли на выемочных участках и проведении выработок скважино-шпуровым методом. Параметры способа и забойки изложены в "Инструкции по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках", "Руководстве по применению забойки при взрывных работах в угольных шахтах". Предохранительные аэрозольные (порошковые) завесы внедрены на 6 шахтах трех производственных объединений по добыче угля Донбасса при проведении 24 подготовительных выработок. Пространственно-временные параметры предохранительной среды отражены в "Инструкции по созданию предохранительных аэрозольных (порошковых) завес при взрывных работах в угольных шахтах" и "Инструкции по созданию взрывозащитных водораспылительных и порошковых завес при взрывных работах в условиях многолетней мерзлоты и отрицательных температур в угольных шахтах". Установочная серия системы "Заслон АВП-1" (ТУ 12.44.1132-85) в количестве 170 комплектов внедрена в 22 шахтах 13 производственных объединений по добыче угля в Донбассе. Техническая характеристика и параметры эксплуатации системы включены во "Временное руководство по оборудованию и эксплуатации заслона для автоматического взрывоподавления АВП-1". Пастообразная забойка ПЗМ-3 внедрена в шахтах всех производственных объединений Донбасса, а также в шахтах других угольных бассейнов, в т.ч. в производственном объединении "Арктикуголь". Методика дифференцированной оценки взрывозащитной эффективности веществ внедрена в МакНИИ. За период с 1972 г. было испытано около 70 модельных, экспериментальных, опытных и серийных порошковых составов, разработанных ВНИИПО, НПО "Респиратор", Киевским госуниверситетом, НПО "Карбонат", МакНИИ (проведено примерно 1000 экспериментальных взрывов в опытном штреке). Установленные в результате испытаний показатели наряду с рецептурными находками в работе были использованы

организациями-разработчиками при составлении технических заданий на составы порошковые взрывоподавляющие. По этим техническим заданиям были созданы, доведены до серийного производства взрывоподавляющие порошки ПСВ-ТМ (ТУ 6-18-10-11-85), КСВ-30 (ТУ-18-30-87), непиллящий взрывопредупреждающий порошок ПВХ-ИН (ТУ 6-18-10-27-85), состав засойки скважин для пневмотранспортирования ВМК-1, которые заложены в разработанные средства взрывозащиты.

Результаты работы использованы в нефтехимической и газовой промышленности, а именно, разработан способ взрывозащиты замкнутых технологических аппаратов, на основе которого ВНИПО создана автоматическая система взрывоподавления "Роса", внедренная на Ивано-Франковском заводе тонкого органического синтеза; Заслон АВП-1 принят в качестве активного модуля в системе обеспечения безопасности эксплуатации переходов магистральных газопроводов через железные дороги, разработку которой ведет АСУНИПИтрансгаз, и др.

Апробация работы. Основные результаты научных исследований докладывались и получили положительную оценку на научно-технических совещаниях по вопросу взрывных работ в угольных шахтах и создания инертной среды (Москва, ИГД им.А.А.Скочинского, 1968 г.), Всесоюзным научно-техническим совещании "Совершенствования взрывных работ в газо- и пылеопасных угольных шахтах" (г.Дуганск, Дом техники, 1968 г.); Республиканской конференции молодых ученых, посвященной проблемам безопасности труда в горной промышленности (г.Макеевка, МакНИИ, 1968 г.); Всесоюзной конференции молодых ученых по безопасности труда в горной промышленности (г.Макеевка, МакНИИ, 1970 г.); Всесоюзном научно-техническом совещании по вопросам безопасности ведения взрывных работ в газо- и пылеопасных угольных шахтах (г.Макеевка, МакНИИ, 1973 г.); Всесоюзной научно-практической конференции "Проблемы пожаро- и взрывозащиты технологического оборудования" (г.Москва, ВНИПО, 1976 г.); конференции "Теория и практика использования энергии взрыва в народном хозяйстве" (г.Киев, ИФ АН УССР, 1981 г.); седьмой Международной научно-технической конференции по буровзрывным работам (г.Киев, институт геофизики АН УССР, 1982 г.); Республиканской конференции "Проблемы совершенствования пылегазового режима на угольных шахтах" (г.Макеевка, МакНИИ, 1988 г.); Международном конгрессе "Проблемы старопромышленных районов: экономика, экология,

политика" (г.Донецк, 1991).

Основные результаты исследований, промышленных испытаний и внедрения новых средств взрывозащиты неоднократно докладывались и обсуждались на технических совещаниях в Минуглепроме СССР (г.Москва, 1977 г., 1986 г., 1987 г., 1989 г., г.Конотоп, КЭМЗ, 1981 г.); в Минуглепроме УССР (г.Донецк, 1968 г., 1979 г., 1984 г., 1987 г.); Всесоюзном семинаре руководящих работников Госгортехнадзора СССР (г.Москва, 1987 г.); бюро НТС Госгортехнадзора УССР (г.Киев, 1987 г.); совместном заседании секции техники безопасности и охраны природы НТС Минуглепрома УССР, секций угольной промышленности и взрывных работ НТС Госгортехнадзора УССР (г.Ворошиловград, 1985 г.); совещании по вопросу использования аэрозольей в угольной промышленности (г.Киев, Совмин УССР, 1980 г.); заседаниях МВК по взрывным работам о ходе выполнения работ по торпедированию кровли (г.Москва, ИГД им.А.А.Скочинского, 1985 г., г.Ленинград, ВНИМИ, 1986 г.); координационных совещаниях по рассмотрению хода выполнения программы Минуглепрома СССР "Взрывозащита" (г.Донецк, Донецкгосуглепром, 1988; г.Ворошиловград, Ворошиловградгосуглепром, 1988 г.; г.Макеевка, МакНИИ, 1989 г.).

По вопросам применения системы "Заслон АВП-1" в угольных шахтах проведены Всесоюзные семинары руководящих работников производственных объединений и шахт (г.Макеевка, МакНИИ, 1986 г., 1987 г.) и школа передового опыта (г.Димитров, шахта им.А.Г.Стаханова, 1987 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 49 научных работах, в том числе двух монографиях, брошюре, справочнике и 10 авторских свидетельств на изобретение.

В выполнении работы на разных этапах и в решении ряда задач участвовали докт.техн.наук, проф. В.Е.Александров, к.т.н. В.И.Стигачев, к.х.н.Д.Ф.Даценко, к.т.н. Н.Н.Гапонов, к.т.н. К.С.Толстых; инженеры А.Б.Михайлов, И.Д.Калимулин, Н.Н.Малык, С.А.Калякин.

Автор выражает свою глубокую благодарность и признательность докт.техн.наук, проф.А.М.Мореву за помощь и ценные советы при выполнении и оформлении данной работы, соавторам и всему коллективу отдела взрывных работ и взрывчатых материалов МакНИИ за содействие и помощь в проведении и внедрении исследований в лабораторно-полигонных и шахтных условиях.

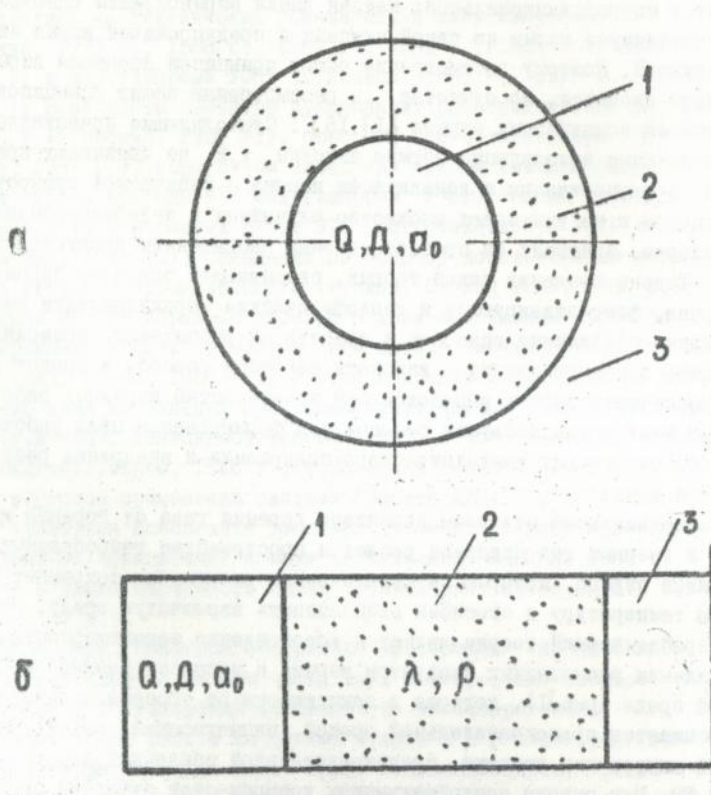
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Принятая в настоящее время многоступенчатая система обеспечения взрывобезопасности горных выработок в угольных шахтах является многофункциональной: каждая линия взрывозащиты одновременно локализует взрыв на одной ступени и предупреждает взрыв на следующей. Поэтому рассмотрение общих принципов процесса взрывозащиты сводится, по существу, к рассмотрению общих принципов процесса локализации взрыва [13,15]. Существующие представления о механизме локализации взрыва неполны, т.к. не связывают критерии предупреждения и локализации взрыва с физической сущностью процесса и не учитывают множество случайных и детерминированных факторов, влияющих на процесс гашения раскаленных продуктов взрыва. Только создание такой теории, охватывающей основные параметры взрыва, флегматизирующие и теплофизические характеристики веществ, а также баллистику способов и средств их распыления, позволили решить основную задачу — изыскать надежные способы и средства взрывозащиты горных выработок при производстве взрывных работ. Круг этих задач послужил основой для формирования цели работы, ее основного научно-технического содержания и внедрения результатов в шахтах.

Кардинальным отличием характера горения газа от горения жидкости и твердых тел является разлет в пространстве газообразных продуктов взрыва, которые на определенном расстоянии сохраняют высокую температуру и способны воспламенить взрывчатую среду. Основой разрабатываемой теории является установление закономерностей охлаждения раскаленных продуктов взрыва в процессе разлета в буферной среде (рис.1), которая в зависимости от способа взрывозащиты называется предохранительной средой, пламегасящей средой, забойкой шпуров или скважин, предохранительной оболочкой вокруг заряда ВВ. Без оценки теплофизических возможностей буферной среды невозможно предугадать степень влияния ингибирования, баллистики, способа распыления и других факторов на процесс взрывоподавления.

Определение линейного размера зоны разлета раскаленных продуктов взрывного горения (L) фактически сводится к определению минимальной длины буферной среды, при прохождении которой расширяющиеся продукты взрыва охлаждаются до заданной температуры.

Принципиальные схемы проявления критической
зоны разлета продуктов взрыва



- а - сферический взрыв (взрыв в оболочке);
 б - взрыв в канале;
 1 - локализуемый взрыв; 2 - буферная среда;
 3 - взрывчатая метано- и (или) пылевоздушная смесь.

Рис. I

Из теории предохранительных ВВ, системного анализа результатов локализации взрыва при взрывозащите конкретных объектов конкретными средствами, а также из результатов специально проведенных экспериментов по воспламенению метановоздушной смеси через воздушную и пенную преграды [1,2,5,6,25] следует, что длина зоны разлета будет определяться двумя независимыми комбинациями независимых друг от друга параметров, а именно: комбинацией, характеризующей опасность (агрессивность) локализуемого взрыва (ВВ, метано- и пылевоздушных смесей), и комбинацией, характеризующей локализующую эффективность буферной среды. Для характеристики агрессивности локализуемого взрыва вводится параметр Q_t , характеризующий тепловую мощность взрыва, т.е. расчетное количество теплоты взрыва, выделяемой в единицу времени. Один из параметров, определяющих вторую комбинацию, должен характеризовать запирающую способность (инерционность) буферной среды. Исходя из физической сути процесса, таким параметром можно считать начальную плотность (ρ). В качестве параметра буферной среды, определяющего ее теплофизические свойства, было принято удельное теплопоглощение (λ), характеризующее верхние значения теплопоглощающих свойств веществ. Исходя из постановки задачи и учитывая, что продукты взрыва расходуют энергию не только при теплообмене с буферной средой, но и при расширении, в искомую зависимость необходимо ввести безразмерный критерий A_0 , определяющий долю энергии, которую необходимо отобрать в единицу времени у продуктов взрыва в процессе теплообмена с буферной средой, чтобы предотвратить воспламенение метано- и пылевоздушной смесей.

Аналитическая связь между определяющими критериями была найдена методом размерностей путем комбинации независимых параметров, характеризующих агрессивность локализуемого взрыва и локализующую эффективность буферной среды [1,7,9,11-13, 15,37].

Решив полученное выражение относительно L и введя безразмерный переводной коэффициент α_0 , корректирующий относительное различие тепловых потоков через единицу поверхности буферной среды в свободном ($\alpha_0 = 1$) и замкнутом пространствах, получим:

$$L = \alpha_0 \left(\frac{a_0 Q_t}{\lambda^{1/2} \rho} \right)^{1/2} \quad (I)$$

Критерий $\lambda^{3/2} \rho$ является, по существу, энергоносностью буферной среды и определяет величину тепловой мощности, которая расходуется при прохождении тепловым потоком единичной площадки

$$J_0 = \lambda^{3/2} \rho \quad (2)$$

Введем относительный показатель η теплофизической эффективности буферной среды (эквивалент энергоносности). Приняв в качестве эталона воздух, преобразуем зависимость (1) к виду [37]:

$$L = \alpha_0 \left(\frac{Q_0}{J_0} \right)^{1/2} \left(\frac{Q_t}{\eta} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Параметр η может быть определен для любой стадии гашения [I, II-I3, I5]

$$\eta = \frac{J_0}{J_0^*} = \left(\frac{\lambda^3 \rho^2}{\lambda_0^3 \rho_0^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

В рамках решаемой проблемы устанавливаем его значение для критических условий взрывоподавления - для условий гашения продуктов взрыва до температуры вспышки метано-воздушной смеси как наиболее чувствительной системы в угольных шахтах равной 923K [7,9, I2]

$$\eta = 2,8 \cdot 10^{-8} \lambda^{3/2} \rho \quad (5)$$

Параметры λ и ρ нетрудно определить с учетом весовых долей дисперсной фазы и дисперсионной среды [7].

Решив (5) численным методом через концентрацию дисперсной фазы (C) получим [37]

$$\eta = 1,08 \cdot 10^{-8} C^{1,07} \lambda^{1,40} + 1,11 \quad (6)$$

Границы применимости зависимости (6): по λ - $4,55 \cdot 10^5 \dots 33,88 \cdot 10^5$ Дж/кг, по C - 0,1...3,1 кг/м³.

Теоретическое рассмотрение процесса расширения продуктов взрыва [3,30,34], а также опыты по воспламенению взрывоопасных смесей через воздушную преграду [1,3,5-7] показали, что критерий Q_0 зависит от вида локализуемого взрыва и имеет следующие значения: для метано-воздушной смеси $Q_0^{CH_4} = 0,5830$, для ВВ $Q_0^{BB} = 0,0091$. Тогда зависимость для определения крити-

ческой толщины воздушной оболочки вокруг цилиндрического заряда ВВ и сферического очага воспламенения метано-воздушной смеси ($J_a = 363,7 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$) соответственно примет вид [5,7,15,30,37]

$$R_k = 5,0 \cdot 10^{-6} \left(\frac{Q_t}{\eta} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$B_k = 4,0 \cdot 10^{-5} \left(\frac{Q_t}{\eta} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Анализ экспериментов показывает, что при превышении Q_t определенного предела рост критической оболочки по законам (7) и (8) прекращается, причем ее предельная толщина примерно одинакова для условий взрыва метановоздушных смесей и зарядов ВВ и колеблется в пределах 1,25...1,60 м. Эксперименты показывают, что в случае взрыва метано- и пылевоздушных смесей это значение достигается при $Q_t = 12,25 \cdot 10^8 \text{ Дж/с}$, а в случае взрыва ВВ - $784,00 \cdot 10^8 \text{ Дж/с}$ [3,13]. Подставив эти значения в формулы (7) и (8) соответственно получим, что $R_{kпр}$ и $B_{kпр}$ равны 1,4 м. Из этого следует весьма важный вывод о том, что при превышении мощности взрыва сверх указанных пределов объем пламегасящей среды зависит только от объема воспламенившейся смеси (взорванного заряда ВВ) и не зависит от скорости (времени) взрыва, энергоносности среды.

Зависимость (8) для определения критической длины буферной среды в выработке получена путем математической обработки экспериментальных данных по локализации взрывов метано- и пылевоздушных смесей различной мощности ($\ell_c = 4...240 \text{ м}$, $V_c = 3,9...850 \text{ м/с}$, $Q_t/\eta = 0,34 \cdot 10^8...666,4 \cdot 10^8 \text{ Дж/с}$) в опытных штольнях (штреках) сечением $2,5...9,5 \text{ м}^2$ [2,6,7,32,36,37] :

$$L_k = 6,1 \cdot 10^{-4} \left(\frac{Q_t}{\eta} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Данные экспериментов в опытном штреке МакНИИ по локализации взрывов дисперсными системами с воздушной дисперсионной средой, но различной дисперсной фазой, а также значения η , полученные по результатам теоретического расчета удельного теплопогло-

щения веществ с учетом теплоразложения соединений и теплоемкости продуктов реакции или их высокотемпературных составляющих принятыми в настоящее время в термодинамике методами с использованием наиболее достоверных термодинамических характеристик веществ [13,15,18,19,35] свидетельствуют, что при этом режиме локализации эффективность веществ оказалась однозначной линейной функцией теплопоглощения, не зависящей от ~~их~~ химической природы (ингибирующей эффективности).

Вместе с тем, экспериментально установлено [37], что зависимость (9) справедлива при отсутствии в буферной среде сквозных каналов со взрывчатой метано-воздушной смесью [4].

Определяющим критерием гашения продуктов взрыва является пламегасящая концентрация C_n , т.е. удельное количество вещества, которое необходимо распылить в выработке для охлаждения пламени на заданном участке до безопасных в отношении воспламенения взрывчатой среды (критических) параметров.

Ее можно рассчитать для заданных условий, решая систему уравнений для определения $L_k (B_k, R_k)$, η , λ и ρ . Для инженерных расчетов (границы применимости: по $\lambda - 4,45 \cdot 10^5 \dots 33,88 \cdot 10^5$ Дж/кг; $\eta - 2,2 \dots 42,7$) получена следующая формула (множественный коэффициент корреляции равен 0,997) [37]:

$$C_n = 2,49 \cdot 10^7 \lambda^{-1,29} (\eta - 1,11)^{0,92} \quad (10)$$

Проведенные эксперименты, кроме того, показали независимость установленной величины критерия $\alpha_0^{CH_4} = 0,583$ от условий взрывания [37]. Этого нельзя сказать о воспламеняющей способности зарядов ВВ, характеризуемой α_0^{BB} . Его величина зависит от степени замкнутости зарядной полости $A_c = \tau_3 / 0,46$ (0,46 и τ_3 - время прохождения продуктами взрыва критического участка воздушной и исследуемой буферной среды соответственно, мс). Для его определения необходимо прежде всего установить закономерности формирования дисперсной системы в различных условиях взрывного распыления.

Общие закономерности процесса разлета сферического облака при взрыве заряда ВВ в конденсированной среде, т.е. двухфазного потока, установлены на основе изучения в лабораторных условиях динамики распыления порошков различной плотности ($107-1500$ кг/м³)

из полиэтиленовых сосудов зарядами из угленита 3-6, № 5, I2CB, аммонита Т-19 и детонирующего шнура [13,25,37] . По полученным кинограммам распыления в каждом опыте строились изохронные эпюры, служащие для определения радиуса облака, распространяющегося в направлениях вдоль и перпендикулярно оси распыляющего заряда, через заданные промежутки времени после начала распыления.

Результаты обработки экспериментального материала (более 100 кинограмм) и учет общих принципов теории многофазных сред позволили предложить следующую рабочую модель механизма разлета сферического предохранительного облака под действием взрыва [27] . В течение первых 0,3...1,0 мс после детонации распыляющего заряда ВВ продукты взрыва расширяются достаточно медленно, в результате чего в приграничной области порошок может измельчаться и даже переходить в текучее состояние. Затем начинается процесс ускорения твердой (жидкой) фазы под воздействием продуктов взрыва, взаимоперемешивание фаз, образование потока. После полного перемешивания фаз и образования однородного двухфазного потока (не позже 2,5 мс) явление расширения облака протекает преимущественно за счет приобретенного импульса и частично за счет давления газа. Лишь с этого момента окружающая среда начинает проникать внутрь облака, а двухфазный поток интенсивно расширяется. Этот процесс заканчивается через 3,5...10,0 мс. К этому моменту начинается перестройка метаемой массы: наиболее крупные частицы порошка вырываются вперед и образуют отдельные струи, в которые втягиваются более мелкие частицы, длина которых изменяется во времени в пределах 0,2...1,5 м. Неровный передний фронт, в свою очередь, способствует более интенсивному проникновению окружающей среды внутрь облака. В результате движения дисперсного состава и прорыва через него окружающей среды происходит интенсивное перемешивание частиц порошка (капель жидкости), воздуха (метано-воздушной смеси) и продуктов взрыва, что приводит к росту облака диспергированных частиц и аэродинамического сопротивления, а, следовательно, к резкому торможению процесса расширения через 25...40 мс от начала распыления.

Зависимость радиуса облака от времени следующего вида

$$R_0 = A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (II)$$

Коэффициент "в" определяет скорость достижения облаком своих предельных размеров.

Критерием энергетической эффективности распыляющего заряда ВВ служит параметр $f_{зар}$, определяемый по формуле [37]:

$$f_{зар} = m_{зар} \cdot t_{зар}^{-\frac{1}{2}} \cdot Q_{зар}^{\frac{1}{2}}, \quad (I2)$$

где $m_{зар}$ - масса заряда ВВ, кг; $t_{зар}$ - время детонации заряда, с; $Q_{зар}$ - количество теплоты, выделяющейся при взрыве заряда ВВ, Дж.

Физический смысл полученного критерия становится ясным, если его размерность разложить на составляющие, что позволяет использовать известные параметры теории детонации ВВ

$$f_{зар} = i^2 \cdot U \cdot m_t^{\frac{1}{2}}, \quad (I3)$$

где i - импульс силы взрыва, н/с; U - скорость продуктов детонации, м/с; m_t - массовый расход продуктов взрыва, кг/с.

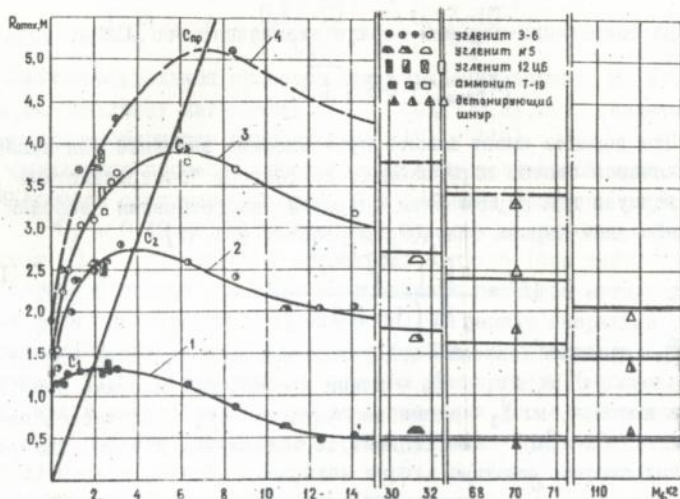
Этот критерий дает возможность заменить отдельные зависимости, полученные для различных типов и величин распыляющих зарядов, одной обобщенной кривой, введя понятие приведенной массы порошковой оболочки (M_f)

$$M_f = M \frac{f_{эл}}{f_{зар}}, \quad (I4)$$

где M - масса распыляемой зарядом ВВ порошковой навески; $f_{эл}$ - критерий эффективности эталонного распыляющего заряда - 0,2 кг угленита Э-6.

Оказалось, что независимо от плотности распыляемых веществ и толщины оболочки вокруг распыляющего заряда ВВ, а также типа и величины последнего, все экспериментальные точки укладываются на экстремальную кривую (рис.2), причем по мере роста облака максимум смещается в сторону большей массы оболочки и зависимость становится более резко выраженной. Снижение сыпучести (увеличение прочности, вязкости, поверхностного натяжения и пр.) буферной среды равноценно снижению величины критерия эффективности заряда [37]. Результаты обработки кинограмм распыления веществ в опытном штреке, а также на открытой площадке вблизи отражательной стенки свидетельствуют, что преграда фактически не оказывает влияния ни на размеры предохранительного облака, ни на скорость его формирования в свободных направлениях [31,37].

Диаграмма распыления порошков



1 - через $t = 2,5$ мс от начала распыления;
 2 - 10,0 мс; 3 - 20,0 мс; 4 - предельное значение;
 C - точка максимума на кривых

Рис. 2

Из этой закономерности следует, что оптимальная масса распыляемой взрывом порошковой оболочки зависит от времени, через которое необходимо сформировать облака максимально возможных для данного распыляющего заряда ВВ размеров, а именно:

$$M_{f_{opt}} = 1,69 \left(\frac{t}{T_{ЭГ}} \right)^{1/2} \cdot \frac{f_{зар}}{f_{ЭГ}} \cdot m_{ЭГ} \quad (I5)$$

При распылении взрывом заряда эквивалентного 0,2 кг углени-
та Э-6

$$M_{f_{opt}} = 38 \sqrt{t}$$

Эта формула имеет важное практическое значение для проектных расчетов систем взрывозащиты по фактору "быстродействие".

Формула для определения скорости выбрасывания забойки под действием взрыва получена в работах [34,37]

$$U^2 = \frac{P_n \left(\frac{l_k - l_3}{l_k} \right)^n}{\rho_3 (1 + 0,5 C_M)}, \quad (I6)$$

где P_n - среднее давление продуктов взрыва в зарядной полости при детонации ВВ, Па; l_k - длина канала, равная сумме длин заряда и забойки, м; l_3 - длина забойки, м; ρ_3 - плотность забойки, кг/м³; C_M - коэффициент сопротивления потока диспергированных частиц забойки.

Достоверность формулы (I6) была подтверждена в ходе более чем 100 экспериментов, результаты которых представлены в виде изохронных эпюр, обработанных на ЭВМ "Мир-I" [25,27,37].

Для установления конкретного вида зависимости $\alpha_0^{BB} = f(A_c)$ были проведены эксперименты по определению длины зоны разлета продуктов взрыва в канале стальной мортиры, сообщаемой со взрывной камерой опытного штрека, заполненной взрывчатой метано-воздушной смесью.

Математическая обработка экспериментальных данных приводит к кривой третьего порядка следующего вида [25,27,38] :

$$\alpha_0^{BB} \sqrt{\alpha_0^{BB}} = 20,60 - \frac{36,72}{A_c} + \frac{16,72}{A_c^2} \quad (I7)$$

Графически она изображена на рис.3. Анализ полученной кривой в совокупности с физической интерпретацией происходящих процессов позволяет думать, что асимптота, пересекающая левую ветвь кривой (точка А), определяет предельно возможное значение критерия Q_0^{BB} , равное единице. Тогда свободный член в уравнении (17) есть не что иное, как безразмерный коэффициент α_0^{BB} для случая взрыва заряда ВВ в канале. С учетом этого зависимость (17) представляем через τ_3 в следующем виде [36]:

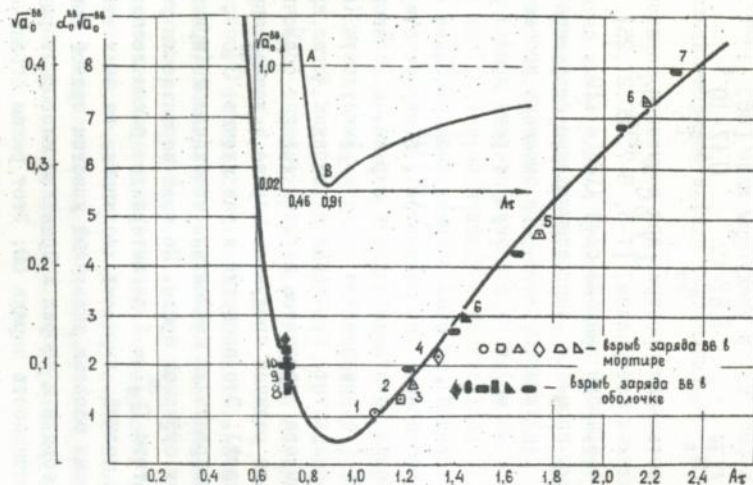
$$\sqrt{\alpha_0^{BB}} = 1 - \frac{0,82 \cdot 10^{-3}}{\tau_3} + \frac{0,17 \cdot 10^{-6}}{\tau_3^2} \quad (18)$$

Экспериментальная проверка при взрывании зарядов ВВ в оболочке из различных материалов [1-3, 5-7, 20, 21, 25] свидетельствует о достоверности зависимостей (17) и (18).

Физические процессы, аппроксимируемые полученной кривой, можно описать следующим образом. При смещении процесса от $A_\tau = 0,91$ ($\tau_3 = 0,42$ мс) в ту или иную сторону происходит снижение доли Q_t , расходуемой естественным путем (без теплообмена с буферной средой), за счет укорачивания наиболее активной первой фазы расширения (по политропе), в первую очередь, в результате изменения состава продуктов взрыва, а, следовательно, показателя "n" с увеличением степени замкнутости (правая ветвь) или в результате взрывания в условиях, когда критическая длина зоны разлета продуктов взрыва (толщина оболочки, длина забойки) меньше радиуса продуктов взрыва в точке сопряжения (левая ветвь кривой). Это приводит к увеличению Q_0^{BB} , а, следовательно, к возрастанию минимально необходимой (критической) энергоносности буферной среды. По всей вероятности участок кривой выше асимптоты $Q_0^{BB} = 1$ характеризует режим воспламенения смеси ударной волной, горящими частицами, за счет вторичных реакций. Другими словами, указанный участок кривой как раз и учитывает известную в теории и практике многофакторную воспламеняющую агрессивность заряда ВВ. Этот режим ограничен асимптотой $A_\tau = 0$, определяющей режим воспламенения свободно подвешенными зарядами ВВ при непосредственном контакте его со взрывчатой смесью.

Установленные закономерности позволяют впервые рассчитать безопасную в отношении воспламенения метано- и пылевоздушных смесей (критическую) длину забойки шпуров и скважин, а также

Графическое изображение зависимости $\alpha_0^{88} \sqrt{a_0^{88}}$ и $\sqrt{a_0^{88}}$ от степени замкнутости зарядной полости (A_τ)



1 — ПО; 2 — ВМК-1; 3 — песчано-глинистая смесь; 4 — ПСБ-3;
5 — флюорит; 6 — песок; 7 — воздушно-механическая пена;
8 — вода; 9 — гидрогель; 10 — хлорид натрия

Рис.3

толщину предохранительной оболочки вокруг заряда ВВ.

$$\ell_{зк} = 1,08 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{0,82 \cdot 10^{-3}}{\tau_3} + \frac{0,17 \cdot 10^{-6}}{\tau_3^2} \right) \left(\frac{d_{зар}}{d_k} \right)^2 \left(\frac{Q_t}{\eta} \right)^{1/2}, \quad (19)$$

$$\delta_k = 5,24 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{0,82 \cdot 10^{-3}}{\tau_3} + \frac{0,17 \cdot 10^{-6}}{\tau_3^2} \right) \left(\frac{Q_t}{\eta} \right)^{1/2}, \quad (20)$$

где d_k - диаметр канала (шпура, скважины и др.) в месте расположения забойки, м; $d_{зар}$ - диаметр заряда ВВ, м.

Расчеты показывают, что функция (16) имеет разрыв: даже в условиях, когда давление в скважине достаточно, чтобы выбросить из нее забойку ($V = 400 \dots 500$ м/с), может наступить режим взрывания без выброса забойки [27]. Его особенностью является очень низкая степень расширения продуктов взрыва, вследствие чего почти вся энергия, возникающая при детонации, направляется на забойку, т.е. реализуется условие

$$\frac{E_{вв}}{E_3} \leq 1, \quad (21)$$

где $E_{вв}$ - энергия детонации заряда ВВ; E_3 - энергия, получаемая забойкой.

Подставив в (21) значения энергии, определенное из теории детонации, получим [30, 34, 37]:

$$\ell_{зар} \leq \frac{0,86 \rho_n (n^2 - 1) \ell_3 (1 + \ell_n \ell_3)}{D^2 (\rho_s - \rho_3) \left(\frac{d_{зар}}{d_k} \right)^2 \left(\frac{\rho_{зар}}{\rho_3} \right)}, \quad (22)$$

где ρ_3 - физическая плотность вещества твердой фазы забойки, кг/м³; D - скорость детонации ВВ, м/с; $\rho_{зар}$ - плотность заряда, кг/м³.

Для выбора наиболее приемлемой для данных условий модели расчета давления было установлено его фактическое значение по результатам экспериментальных взрываний скважинных зарядов [41, 50] в 7 шахтах 6-ти производственных объединений по до-

быче угля Донбасса в одиночных и спаренных скважинах диаметром 76...112 мм и длиной 15...110 м, которые заряжались аммонитом 6 ЖВ или Т-19- при диаметре заряда 55...70 мм и длине 10...54 м; свободная от заряда ВВ часть скважины заполнялась на полное сечение сыпучей забойкой длиной 5...53 м [37] .

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что наиболее близкие к фактическим значениям давлений дают методы, основанные на учете состава продуктов взрыва или степени расширения зарядной полости.

Приняв в (22) второй метод расчета P_n с учетом поправочного эмпирического коэффициента α_p , получим

$$l_{3op} \leq B l_3 (1 + l_n l_3), \quad (23)$$

где $B = 0,86 \alpha_p \xi \varepsilon \left(\frac{d_{3op}}{d_{скв}} \right)^{2(K-1)}, \quad (24)$

$$\xi = \frac{P_{ж}^{\frac{n}{n-K}} \cdot P_x^{\frac{n-K}{n}}}{D^2 \cdot \rho_{3op}}, \quad \varepsilon = \frac{\rho_3}{\rho_3 - \rho_3}, \quad (25)$$

где $P_{ж}$ - давление во фронте детонационной волны, Па; P_x - давление продуктов взрыва в точке сопряжения, Па ; n - показатель политропы; K - показатель адиабаты.

Критерий ξ характеризует детонационные свойства скважинного заряда, определяющие величину давления. Критерий ε характеризует запирательную эффективность забоечного материала.

Из (23) - (25) следует, что обеспечение надежности реализации рассмотренного режима взрывания может быть достигнуто за счет повышения плотности забойки скважин материалом с низкой плотностью кристаллов, а также увеличением теплоты взрыва заряда ВВ при низкой скорости детонации.

При прочих равных условиях длина забойки, обеспечивающая камуфлет, увеличивается с увеличением плотности заряжания (длины зарядной камеры). Поэтому заряд должен досылаться до дна, а забойке-вплотную к нему. Наконец, неравенство (22) показывает, что при небольших зарядах очень трудно получить камуфлет. Это подтверждает практика, когда при взрывании даже 100 г угленита Э-6 в канале мортиры забойка длиной 0,8 м, в т.ч. песчаная, выбрасывается.

Установленные закономерности позволили перейти к решению заключительного этапа в разработке теории локализации взрыва при взрывных работах, а именно, к установлению количественного влияния ингибирующей эффективности веществ и динамики их распыления на процесс гашения продуктов взрыва в пределах загазированной зоны.

Для этого в опытном штреке МакНИИ были проведены экперименты, при которых протяженность буферной среды вдоль штрека превышала максимально возможную в заданных условиях критическую длину зоны разлета продуктов взрыва. Установлено, что в этих условиях процесс локализации взрыва сводится только к флегматизации (ингибированию) метано-воздушной смеси, т.е. к превращению дисперсной системы со взрывчатой дисперсионной средой в невзрывчатую среду, получившей название пламегасящей. Причем, концентрация гасящего вещества (дисперсной фазы) в рудничной атмосфере уменьшается с течением времени по закону расширения облака в неограниченном пространстве, т.е.

$$C_b = C_{\phi} \cdot K_n, \quad (26)$$

где C_b - взрывопредотвращающая концентрация вещества; C_{ϕ} - флегматизирующая концентрация вещества, при которой нижний и верхний пределы воспламенения метано-воздушной смеси смыкаются; K_n - коэффициент потерь (запаса).

В общем случае

$$K_n = \frac{V_0}{V_n} = \frac{F_0}{S}, \quad (27)$$

где V_0, F_0 - объем и площадь поперечного сечения облака в направлении, перпендикулярном оси выработки, создаваемого взрывозащитным устройством при распылении на открытой площадке за время, численно равное максимально возможному на практике времени прохождения продуктами взрыва пламегасящей среды; S - площадь поперечного сечения выработки, m^2 .

Данные закономерности установлены в результате обработки 143 опытов по локализации длительно развивающегося взрыва жидкими и порошковыми веществами [13,15,17,19,25], подтверждены в условиях локализации "мощных" взрывов [8] и полностью согласуются с общепризнанным, исходя из химизма веществ, рядом ингибиру-

ющей эффективности веществ.

Таким образом, первым условием локализации взрыва в загазированной выработке является

$$C \geq C_b \quad (28)$$

Обобщение результатов проведенных исследований на базе полученных закономерностей привело к построению специальной диаграммы "дальность разлета продуктов взрыва (L) - концентрация вещества метано-воздушной смеси (C)" (рис.4), позволившей не только наглядно представить предложенный механизм локализации взрыва, но и определить условия реализации различных его режимов [36,37].

Рассмотрим, как будет изменяться длина зоны разлета продуктов взрывного горения (L) при формировании буферной среды между пунктами ℓ_c и ℓ_{nc} .

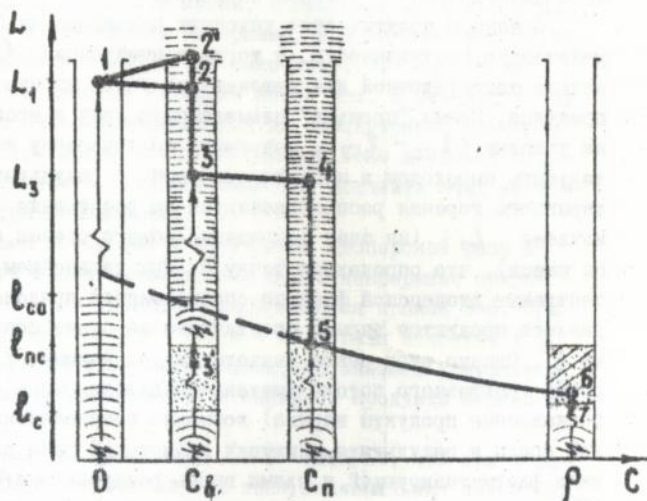
По мере роста концентрации вещества до определенного предела параметр L практически не будет изменяться (кривые 1-2 или 1-2^I).

Следует отметить, что при длине загазированного участка, не превышающей ℓ_c , т.е. при локализации дисперсной системы с невзрывчатой дисперсионной средой, процесс охлаждения продуктов взрыва аппроксимируется на диаграмме $L-C$ пунктирной линией. При достижении в смеси концентрации, равной флегматизирующей ($C_{ф}$), наступает первый скачок в дальности распространения пламени, т.к. метано-воздушная смесь на участке " $\ell_c - \ell_{nc}$ " перестает взрываться. Гашение продуктов взрыва происходит не мгновенно. Длительность этого процесса равна времени действия очага (источника) воспламенения. Поэтому для поддержания постоянной концентрации $C_{ф}$ в течение всего процесса необходимо, чтобы количество вещества в среде, отнесенное к объему метано-воздушной смеси на этом участке, было равно взрывопредотвращающей (C_b) с тенденцией $C_b \rightarrow C_{ф}$.

В зависимости от теплофизических свойств пламегасящей среды и расположения ее по отношению к забою выработки могут реализоваться при $C = C_b$ три отличных друг от друга варианта обеспечения взрывобезопасности горной выработки.

В первом варианте пламегасящая среда примыкает вплотную к забою выработки. Этот метод на практике носит название "взрывопреупреждение" или "взрывоподавление" и характеризуется тем, что

Диаграмма локализации взрыва в горной выработке
дисперсной системой со взрывчатой дисперсионной
средой



($0 - l_{co}$) - протяженность загазированной зоны;
($l_c - l_{nc}$) - протяженность буферной среды

Рис. 4

продукты взрыва практически не распространяются вдоль выработки ($L \sim 0$).

Если в пределах пламегасящей среды продукты взрыва охлаждаются до температуры ниже $T_{всп}$, то взрыв будет локализован в пределах пламегасящей зоны. На диаграмме этот вариант изображен точкой 3^I (второй вариант).

Однако в практических условиях пламегасящая зона имеет ограниченную протяженность, и тогда концентрация C_B может оказаться недостаточной для гашения продуктов взрыва до безопасных пределов. Пламя "прошьет" пламегасящую зону и воспламенит смесь на участке ($\ell_{нс} - \ell_{со}$), например, по тепловому механизму с последующим переходом в цепочно-тепловой. В результате продукты взрывного горения распространяются на расстояние L_3 , хотя и меньшее L_1 (за счет сокращения общего объема воспламенившейся смеси), что определяет точку 3. При дальнейшем повышении концентрации дисперсной фазы до определенного предела дальность разлета продуктов взрыва практически не будет сокращаться (точка 4). Однако этот режим является неустойчивым, т.к. при расширении трехфазного потока (метано-воздушная смесь - вещество - раскаленные продукты взрыва) возможно воспламенение дисперсионной среды в результате снижения дисперсной фазы до концентрации ниже флегматизирующей, и пламя вновь распространится на $L > L_3$. Кроме того, разфлегматизация дисперсной системы может быть обусловлена разложением вещества в результате контакта с очагом пламени. Образуются компоненты, которые по флегматизирующей эффективности уступают исходному продукту. Причем, вполне очевидно, что мелкодисперсный порошок разлагается быстрее крупнодисперсного. Наблюдается следующая картина. При контакте пламени с пламегасящей средой оно охлаждается. Одновременно идет процесс "самоуничтожения порошка". Концентрация его оказывается на контакте с пламенем ниже флегматизирующей. В результате воспламенится новый объем смеси и т.д. Поэтому для флегматизации смеси на время контакта ее с фронтом пламени мелкодисперсного порошка потребуется больше.

При достижении концентрации, равной пламегасящей (C_n), наступает второй порог - дальность распространения пламени резко сокращается: оно не выходит за пределы пламегасящей среды (точка 5). При уменьшении протяженности пламегасящей зоны

разница между C_n и $C_{ф}$ тем больше, чем меньше протяженность, на которой создается пламегасящая зона, и чем больше размер очага воспламенения (величина тепловой мощности) к моменту создания указанной зоны. Если последний велик, а протяженность пламегасящей зоны невелика и ограничена (например, при автоматическом подавлении воспламенений в замкнутых емкостях), то C_n может превышать $C_{ф}$ в десятки или даже сотни раз. В некоторых случаях при развитии очага воспламенения до определенных размеров при ограниченной протяженности пламегасящей зоны и низкой теплофизической эффективности гасящего вещества подавить очаг воспламенения оказывается невозможным.

При дальнейшем повышении концентрации дисперсной фазы в пламегасящей среде длина зоны разлета будет непрерывно сокращаться. Этот участок на диаграмме изображается кривой 5-6. При концентрации, численно равной насыпной плотности вещества (ρ), может наступить третий пороговый скачок, называемый камуфлетом, буферная среда саморасклинивается и запирает продукты взрыва (точка 7).

Таким образом, из диаграммы $L-C$ следует, что при ограниченной длине $l_{сз}$ (загазированной зоны) максимальная дальность распространения пламени ограничена (в зависимости от значений концентраций $C_{ф}$ и C_n) ломаной 1-2-3-4-5-6-7, при этом поле слева от линии 2-3 и ниже линии 1-2 определяет область, в которой невозможно локализовать взрыв в загазированной выработке.

Проведенные эксперименты позволили окончательно сформулировать основное условие локализации взрыва в пределах зоны со взрывчатой метано- и (или) пылевоздушной смесью [47, 63]

$$C_{в} \leq C_{вп} \geq C_n \quad (29)$$

В свою очередь

$$C_{ф} \leq C_{в} \geq C_y, \quad (30)$$

где C_y - концентрация гасящего вещества, при которой взвешенная в рудничной атмосфере угольная пыль становится невзрывчатой (рассчитывается по N - норме "ослащивания").

Из анализа построенной диаграммы вытекают следующие направления обеспечения взрывобезопасности горных выработок при произ-

водстве взрывных работ: создание условий производства взрывных работ, при которых $L \sim \varrho_c$, т.е. реализуется ситуация, определяемая на диаграмме точкой 7 (камуфлетный режим взрывания); создать пламегасящую среду, плотно прилегающую к забою выработки, чтобы $L \sim 0$, т.е. реализовать условия, определяемые точкой пересечения прямой 2-3 с осью C ; создать на пути возможного распространения продуктов взрыва пламегасящую зону, при которой $L \leq \varrho_{nc}$, т.е. реализуется схема 3^I или 5.

Адекватность предложенной математической модели реальным процессам подтверждается результатами, полученными при локализации "мощного" взрыва (скорость развития - 90...360 м/с) в опытной штреке при взрывном распылении на участке ограниченной длины жидких и порошковых веществ в загазированной зоне [15,36].

Из полученных данных следует, что при несоблюдении условий (28), (29), (30) взрыв в загазированной зоне локализовать невозможно.

На основе созданной теории а также найденных на уровне изобретений технических решений разработаны и внедрены в производство способы и средства взрывозащиты горных выработок при взрывных работах, основой которых являются взрывоподавляющие порошки.

В то же время расчетный метод определения удельного теплопоглощения во многих случаях оказывается непригодным для практического использования, а известные формулы расчета флегматизирующей концентрации содержат константы скоростей реакций разветвления цепей и коэффициенты гетерогенной рекомбинации, которые могут быть найдены лишь в эксперименте.

Разработанная автором методика позволяет дать объективную оценку флегматизирующей и пламегасящей эффективности веществ при взрывном их распылении, а принятые методы обработки экспериментальных данных - достоверные значения флегматизирующей концентрации и удельного теплопоглощения. Сущность разработанного способа дифференцированной оценки состоит в том, что за счет варьирования протяженностью загазированной зоны, источником воспламенения и схемой создания дисперсной системы, воспроизводится один из следующих двух режимов взрывоподавления [9,10,19,35,40]: режим, в котором процесс локализации взрыва сво-

дился только к ингибированию смеси; режим, в котором проявлялись только теплофизические свойства веществ.

С внедрением этой методики в МакНИИ по существу начался этап поиска и разработок специальных составов для предупреждения и локализации взрывов в угольных шахтах, получивших общее название "взрывоподавляющих". За период 1972-1990 г.г. было испытано около 70 модельных, экспериментальных, опытных и серийных образцов. Получен ряд флегматизирующей и пламегасящей эффективности [13,16,17,19,25]. Это позволило сформулировать принципы построения рецептур и структур в зависимости от назначения, в т.ч. целесообразность дополнительного введения в состав ПАВ с низким поверхностным натяжением, а также создать универсальные порошковые композиции ВМК-I [44], ПСБ-ТМ [45], ПХВ-Іп [48] и КСВ-30 [47].

В процессе испытаний удалось также установить, что зависимость пламегасящей эффективности порошка от его природного теплопоглощения имеет два аспекта: термодинамический и кинетический. Отмечено: совпадение максимально возможного при нагревании в принятом диапазоне температур (298...923К) расчетного теплопоглощения с экспериментально установленным выполняется только для неразлагающихся и разлагающихся с высокой скоростью соединений [17,19].

В шахтах наряду со шпуровым применяется скважинный метод взрывания зарядов ВВ. Особенно широкое распространение он получил в последние 15 лет, когда для обеспечения стабильной работы высокопроизводительных очистных комплексов был разработан способ разупрочнения труднообрушаемых пород кровли впереди очистного забоя взрывом в ней скважинных зарядов, получивший название "передового торпедирования" [22,37].

При существующей технологии разупрочнения труднообрушаемых пород при взрыве скважинных зарядов ВВ в выработку вместе с раскаленными газообразными продуктами выбрасываются остатки раскаленного металлического троса и горящего полиэтилена. Ради-
кальным решением проблемы предотвращения пожаров и взрывов метана и угольной пыли в этих условиях является применение камуфлетного способа взрывания скважинных зарядов ВВ без разгерметизации камуфлетной полости [22,37,46] с постепенным падением

давления газов вследствие охлаждения их, проникновения в трещины и поры среды и постепенной фильтрации через забойку. Этот вывод следует из диаграммы взрывоподавления (см. рис. 4) и теоретического обобщения. Для реализации этого способа разработан с использованием установленного критерия (25) состав сыпучей забойки ВМК-I, представляющий собой увлажненную смесь гранулированного карбамида с порошковым хлоридом калия удобрительным [28,44]. Такая забойка способна удерживаться в скважинах большого диаметра (до 112 мм), в т.ч. восстающих (до 60°), без дополнительных герметизирующих средств и пригодна для пневмотранспортирования по зарядному трубопроводу с внутренним диаметром 25..32 мм с помощью серийно выпускаемого порционного зарядчика.

Расчеты по формулам (23)-(25) показывают, что для условий взрывания зарядами из аммонитов 6ЖВ или Т-19, с применением забойки ВМК-I в породах крепостью по шкале М.М.Протодяконова, равной 7...12, комбинация $(0,86 \alpha_p \xi \xi)$ есть величина постоянная, равная 0,40. Это можно объяснить тем, что мощное ВВ с одной стороны, имеет более высокое давление во фронте детонационной волны, а с другой, создает больший объем зарядной полости после взрывания. Этот вывод является фундаментальным для практики, т.к. позволяет получить из (23)-(25) простую математическую модель камуфлетного способа взрывания без выброса забойки [37]

$$l_{зар} \leq 0,40 l_3 (1 + \ln l_3) \left(\frac{d_{зар}}{d_{скв}} \right)^{0,4} \quad (31)$$

Применение камуфлетного взрывания поставило вопрос о продолжительности пребывания продуктов взрыва под давлением в камуфлетной полости. Для определения времени истечения продуктов взрыва из камуфлетной полости было использовано известное решение задачи для случая проникновения газа в поры заряда, но с корректировкой в направлении, что давление в камуфлетной полости изменяется по мере заполнения пор забоечного материала газом [22,37]:

$$t_u = \frac{m_3 \mu l_3^2}{3 K_3 P_n}, \quad (32)$$

где m_3 - пористость материала забойки; K_3 - газопроницаемость забойки, м²; μ - динамическая вязкость газообразных продуктов взрыва, кг/м.с.

Расчеты показали, что значения этого времени могут колебаться в зависимости от условий взрывания и состава продуктов взрыва (вода-пар или жидкость) от нескольких секунд до 18 минут. Искусственная разгерметизация скважин вымыванием забойки и выдерживанием проложенного вдоль скважины троса подтвердила расчетные данные: через 40 минут и более после взрывания зарядов избыточное давление в скважинах отсутствовало. Разработанная система предупреждения взрывов скважинных зарядов ВВ является саморегулирующейся: при отсутствии (по тем или иным непредсказуемым причинам) камуфлета забойка обеспечит охлаждение продуктов взрыва до безопасных пределов ($\lambda = 2040 \text{ кДж/м}^3$), а сформировавшаяся при этом в выработке дисперсная система обеспечит флегматизацию рудничной атмосферы и содержащихся в продуктах взрыва горючих газов ($C_p = 0,055 \text{ кг/м}^3$) [28, 37, 38] при $\ell_3 > \ell_{3к}$.

Разработанная технология внедрена в II шахтах 4 производственных объединений по добыче угля ("Краснодонуголь", "Донбасоантрацит", "Артемуголь", "Донецкуголь"). Прошли приемочные испытания с положительными результатами разработанные на ее основе принципиально новые технологии ведения горных работ: региональный способ борьбы с внезапными выбросами угля и газа путем импульсного воздействия на угольный пласт, скважино-шпуровой способ проведения горных выработок [49], охрана повторно используемых подготовительных выработок отсекаемыми скважинами [37].

Исследования трех последних десятилетий были направлены на создание предохранительной среды, плотно прилегающей к забою выработки и полностью перекрывающей ее поперечное сечение.

В результате выполнения комплекса исследований способов и средств создания предохранительной среды [25, 33, 38, 41] разработаны предохранительные аэрозольные завесы, создаваемые путем взрывного распыления порошкового ингибитора из сферического взрывоподавителя в призабойном пространстве выработки для обеспечения безопасности взрывания шпуровых зарядов ВВ [37]. Из формулы (13) было получено, что для обеспечения максимально возможных размеров предохранительного облака через 15 мс от начала распыления, следует размещать в полиэтиленовом сосуде 4,8 кг порошкового ингибитора в случае применения в качестве распыляющего заряда с $f_{зар} = f_{эт}$. Исходя из этого, а также

из необходимости выполнения условия (30) разработано быстродействующее устройство, состоящее из спаренных полиэтиленовых сосудов, в каждом из которых размещен заряд ВВ по энергии эквивалентный 0,2 кг угленита Э-6 в окружении 5,0 кг взрывоподавляющего порошка ПВХ-Ин или ПСБ-ТМ.

Проверка эффективности действия разработанной конструкции свидетельствует, что через 15 мс от начала срабатывания создается предохранительная среда, способная предотвратить воспламенение стехиометрической метано-воздушной и пылевоздушных смесей от взрыва свободно подвешенного заряда не только предохранительного аммонита Т-19 массой 0,3 кг, но и непредохранительного аммонита скального № I [29,31,37] .

Для создания эффективной предохранительной завесы полиэтиленовые сосуды с порошковым ингибитором размещаются в призабойном участке выработки по строго регламентированной схеме, в основу которой положены следующие принципы [37] : к моменту начала взрывания (инициирования) шпуровых зарядов ВВ предохранительное облако должно плотно прилегать к забою выработки и полностью перекрывать ее поперечное сечение и иметь толщину не меньшую: L_k и δ_k , обеспечивающую гашение продуктов взрыва шпуровых зарядов ВВ, и содержать ингибиторы в единице объема к моменту взрывания зарядов последней ступени замедления не ниже флегматизирующей.

Опытно-промышленная проверка и внедрение предохранительных аэрозольных завес проведена в горизонтальных и наклонных выработках с арочной и трапециевидальной крепью, а также верхних нишах, проводимых в 5 угольных шахтах трех производственных объединений по добыче угля Донбасса [39] .

Для предотвращения взрывов метана и угольной пыли от выгорающего заряда ВВ и других длительно действующих источников воспламенения [4,25] возникла необходимость в разработке средств третьей линии взрывозащиты горных выработок, проводимых буровзрывным способом - системы автоматической локализации взрывов с принудительным распылением взрывоподавляющего вещества.

Оценка пригодности того или иного способа взрывоподавления и варианта конструкции взрывоподавляющего устройства

[14,41-43] производилась по его быстродействию [25,30] и способности локализовать взрыв в начальной стадии развития [9,25], а также по технологичности применения его в призабойном участке действующей горной выработки [13,24,37], т.е. в зоне разлета взорванной горной массы. Особое предпочтение было отдано продольному размещению взрывоподавителя в выработке [37], основанного на взрывном способе распыления взрывоподавляющего порошка с высокими ингибирующими свойствами и значительной теплопоглощающей эффективностью (ПСБ-ТМ, трона). На основании выполненных исследований и найденных технических решений была разработана система локализации взрыва при производстве взрывных работ, получившая название "Заслон АВР-1" (рабочая документация на систему в целом была разработана СКБ ИГД им.А.А.Скопинского) [23,26]. Она состоит из датчика пламени и взрывоподавителя, подвешенных в верхней части выработки с помощью роликоопор на монорельсовой дороге, необходимой для их передвижения по мере подвигания забоя выработки (рис.5). Система обладает циклическим действием: она включается перед взрывными работами и включается после их производства. Отличительной особенностью конструкции опытного и серийного образцов является то, что взрывоподавляющее устройство выполнено из состыкованных между собой автономных секций. Каждая секция состоит из линейного трехжелобчатого контейнера, размещенного в призматическом решетчатом корпусе. Вдоль ребра каждой желобчатой полости контейнера проложены нити ДШ, закрытые полиэтиленовыми ампулами со взрывоподавляющим порошком.

Применительно к данной конструкции взрывоподавителя условие (28) записывается в следующем виде:

$$C_L \geq C_{\phi} \pi R_{\text{впр}}^2, \quad (33)$$

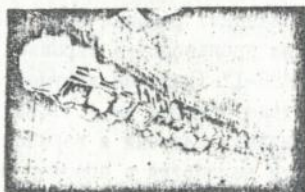
где C_L - линейная ёмкость взрывоподавителя, кг/м.

$$R_{\text{впр}} = 1,21 d_{\text{вп}} \left(\frac{P_n}{P_0} \frac{\rho_s}{\rho_z} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

Исходя из надежности локализации взрыва в загазированных выработках установлено, что взрывоподаватель должен иметь линейную ёмкость 19-30 кг/м при длине не менее 1,5 м, причем в качестве распыляющего заряда следует применять 6-9 нитей ДШ. В качестве взрывоподавляющего вещества должны применяться порошковые составы с высокими теплофизическими свойствами при флег-

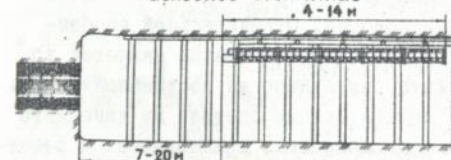
Система автоматического взрывоподавления при взрывных работах „Заслон АВП-1”

Общий вид взорной выработке

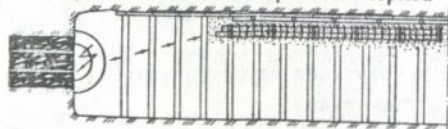


Принцип действия
Исходное состояние

Поперечное
сечение



Через 2-4 мс после обнаружения взрыва



Через 30-50 мс после обнаружения взрыва

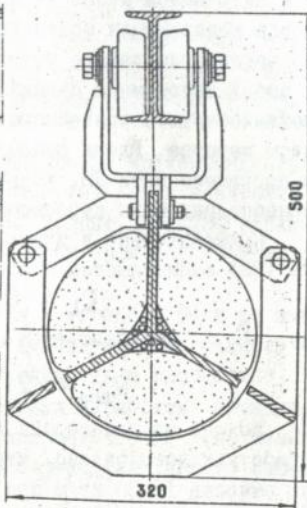
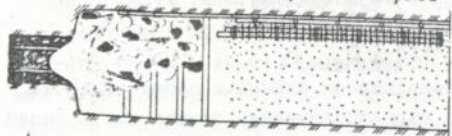


Рис. 5

матизирующей концентрации не более $0,21 \text{ кг/м}^3$ и "норме осланцевания" не более 90%, обладающие высокой плотностью кристаллов и низкой насыпной плотностью.

Общая длина заслона при удалении его от забоя на ℓ_c равна

$$\ell_{\text{завп}} = L_k - \ell_c \quad (35)$$

При расчете η по (6) для определения L_k по (9) за параметр C принимается $C_L/5$.

Заслон позволяет за 30...50 мс достичь перекрытия всего поперечного сечения выработки, а за 2...4 мс - верхней ее части без образования непрерывных незафлегматизированных каналов в пламегасящей среде [25,37].

В 1987 г. началось внедрение установочной серии системы "Заслон АВП-I" в подземных выработках угольных шахт. Было выпущено 170 комплектов, 30 т взрывоподавляющего порошка ПСБ-ТМ в шланговой упаковке и отгружено целевым назначением около 17 км детонирующего шнура. Заслоны применялись при проведении буровзрывным способом откаточных, вентиляционных, конвейерных и коренных штреков, а также квершлагов и уклонов сечением в свету 8,2-15,5 м². Взрывоподавляющее устройство эксплуатируемой системы содержало 6-10 линейных секций общей длиной 8,4-14,0 м и 250-430 кг порошка ПСБ-ТМ. Монорельсовая дорога составлялась из 10 секций общей длиной 28 м. В процессе промышленной эксплуатации более чем в 22 шахтах 13 производственных объединений система "Заслон АВП-I" показала способность стабильно функционировать в шахтных условиях, не мешая основному производству, не отвлекая больших сил на обслуживание [24,32]. При ликвидации системы методом принудительного срабатывания случаев обоев или отказов не зарегистрировано.

Надежность системы "Заслон АВП-I" была подтверждена при ее эксплуатации в шахте "Победа" ПО "Краснодонецуголь". При производстве взрывных работ по породной подрывке в коренном штреке пласта К₆ аммонитом Т-19 произошла вспышка метана в передовой полости, которая затем распространилась в призабойное пространство выработки, где была локализована на расстоянии около 20 м от забоя в результате срабатывания "Заслона АВП-I".

В заключение следует отметить, что установленные новые закономерности и найденные технические решения использованы при создании средств взрывозащиты и в других (не горной) отраслях промышленности [14,43].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально решена важная научно-техническая проблема предупреждения и локализации взрывов газопылевоздушных смесей, имеющая важное народнохозяйственное значение, путем создания и широкого внедрения способов и средств порошковой взрывозащиты горных выработок при взрывных работах в шахтах, опасных по газу и взрыву пыли.

Основные научные и практические результаты работы:

1. В результате широкомасштабных экспериментальных и теоретических исследований получена модель теплообменных процессов между продуктами взрыва и буферной средой в виде критериальных соотношений, позволяющих определить длину зоны, обеспечивающей охлаждение продуктов взрыва до критической (безопасной) температуры.

2. Раскрыт механизм формирования дисперсной системы при взрыве заряда ВВ в среде различной структуры, определены пространственно-временные характеристики облака конденсированных сред в безграничном и ограниченном пространствах, установлен энергетический критерий эффективности расплывающегося заряда ВВ.

3. Экспериментально установлен неизвестный ранее факт, что для случаев гашения газообразных продуктов взрыва метано- и пылевоздушных смесей минимальная доля тепловой мощности, отбираемой буферной средой для охлаждения их до критической температуры, постоянна и равна 0,583, в случае же гашения продуктов взрыва ВВ эта величина колеблется в зависимости от времени нахождения продуктов взрыва в буферной среде и составляет 0,009 при оптимальном значении времени запыления; в случае отклонения от оптимальной величины, равной 0,42 мс, эта доля возрастает от 0,009 до 1,000.

4. В обобщенном виде рассмотрены специфические особенности, свойственные процессу гашения продуктов взрыва в пределах загазованного участка выработки. Разработана математическая модель процесса локализации взрыва дисперсной системой со взрыв-

чатой дисперсионной средой, имеющего механизм дискретного действия, связывающая основные параметры взрыва, флегматизирующие и теплофизические свойства веществ, а также аэродинамические характеристики средств их распыления.

Адекватность предложенной математической модели реальным процессам подтверждается результатами, полученными при локализации взрыва в опытном штреке.

Разработанная модель позволила рассчитать все параметры надежного функционирования систем предупреждения и локализации взрыва, оставив за испытаниями натурального образца только одну функцию - проверочную.

5. Выработан общий подход к качественной и количественной оценке взрывозащитной эффективности веществ по экспериментальным данным, полученным в различных условиях взрывоподавления. Согласно разработанной модели, объективная оценка взрывозащитной эффективности веществ может быть достигнута с учетом фактического режима взрывоподавления и распыления.

Без такого учета нельзя дать точной оценки значений взрывоподавляющей концентрации, а также флегматизирующей и пламегасящей эффективности веществ.

6. Разработан способ камуфлетного взрывания скважинных зарядов ВВ без выброса забойки из скважины, представляющий собой саморегулирующуюся структуру, не имеющую альтернатив, основным элементом которой является состав сыпучей забойки скважин для пневмотранспортирования по зарядному трубопроводу ВМК-I.

Получена математическая модель способа, учитывающая детонационные свойства ВВ и плотность заряжения; материал, сыпную плотность и длину забойки. Определено время истечения продуктов взрыва из камуфлетной полости, достоверность значения которого подтверждено экспериментально.

7. Обоснованы параметры и разработаны технические средства создания предохранительной среды при взрывных работах за счет взрывного распыления порошковых ингибиторов.

8. Сконструировано взрывоподавляющее устройство для локализации взрыва в горных выработках, проводимых буровзрывным способом, т.е. в условиях, характеризующихся строго индивидуальной технологией взрывных работ, конкретным поперечным сечением и

определенной степени взрывоопасности.

9. Реализация основных результатов работы выразилась в создании ряда отраслевых документов, определяющих научно-технический и технико-экономический уровень ассортимента применяемых взрывоподавляющих порошковых составов, средств предупреждения и локализации вспышек и взрывов в горных выработках при производстве взрывных работ; безопасной и эффективной технологии производства взрывных работ скважинным методом и перспективы их дальнейшего развития.

10. Проведенными в течение 14 лет экспериментальными исследованиями (200 серий измерения - на каждую серию проводилось 3...17 экспериментальных взрываний) получены количественные характеристики влияния метеоусловий на степень взрывчатости метано-воздушной смеси.

11. Подтвержденный хозрасчетный и народнохозяйственный эффект от внедрения результатов диссертационной работы превышает 2,0 млн.руб. по ценам 1990 г.

Наряду с этим важнейшим является социальный эффект, выражающийся в обеспечении безопасности труда и предотвращении гибели людей.

По тематике диссертации опубликовано 63 работы и получено 27 авторских свидетельств.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Шевцов Н.Р. Аналитический метод оценки уровня пламегасящих свойств среды. - В кн.: Сборник научных статей аспирантов МакНИИ. - Макеевка-Донбасс, 1968. - с.146-153.

2. Стикачев В.И., Шевцов Н.Р., Воронин П.А. Пламегасящие свойства воздушно-механической пены// Техника безопасности, охрана труда и горно-спасательное дело. - 1968.- № 1,-с.26-28.

3. Стикачев В.И., Поляк Г.А., Шевцов Н.Р. Исследование относительной эффективности и безопасности предохранительных ВВ// Проектирование и строительство угольных предприятий. - 1968.- № 3. - с.19-22.

4. Шевцов Н.Р. О механизме детонации цилиндрических зарядов ВВ с неоднородными физическими свойствами// Вопросы безопасности взрывных работ в шахтах, опасных по газу и пыли:

Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1968. - с.66-74.

5. Шевцов Н.Р., Стикачев В.И. Воздушно-механическая пена как средство повышения безопасности взрывных работ/ Создание инертной среды в забоях угольных шахт перед взрывными работами: Научн.сообщ. ИГД им.А.А.Скочинского. - М.,1968, № В-196.- с.19-21.

6. Стикачев В.И., Шевцов Н.Р., Воронин П.А. Исследование предохранительных свойств воздушно-механической пены// Вопросы безопасности в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, т.ХХ.-М.: Недра, 1969.- с.221-231.

7. Галаджий Ф.М., Стикачев В.И., Шевцов Н.Р. Способ обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах// Безопасность труда в угольных шахтах: Тр. /МакНИИ, т.ХХП,- М.: Недра, 1972. - с.218-228.

8. Шевцов Н.Р., Воронин П.А. Исследование процесса подавления очага воспламенения метано-воздушной смеси в начальной стадии развития / Повышение безопасности взрывных работ в угольных шахтах: Научн.сообщ. ИГД им.А.А.Скочинского.-М., 1973, № В 233. - с.10-11.

9. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Музалевский В.А. Аналитический метод определения пламегасящей концентрации флегматизаторов// Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1975.- с.30-37.

10. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Воронин П.А. Метод оценки эффективности взрывоподавления флегматизаторами // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1976.- № 15. - с.16-17.

11. Шевцов Н.Р. К вопросу о теоретических основах автоматического подавления взрыва/ Проблемы пожаро- и взрывозащиты технологического оборудования: Материалы Всес. научно-практической конф. - М.- 1977. - с.24

12. Шевцов Н.Р. Условия эффективного подавления взрыва метано-воздушной смеси в шахте// Безопасность труда в промышленности. - 1978.- № 5. - с.28-29.

13. Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт/ Б.Н.Кутузов, А.Ю.Бутуков, Б.И.Вайнштейн, Ф.М.Галаджий, В.И.Зелин, П.И.Кушнеров, В.С.Матюнин, М.К.Песоцкий, Н.Д.Росинский, В.И.Стикачев, Н.Р.Шевцов, В.С.Шаталов, К.С.Чернов.-М.: Недра, 1979. - 373с.

14. Некрасов В.П., Мальков В.В., Мешман Л.М., Веселов А.И., Макаров Н.С., Шевцов Н.Р. О взрывающих технологического оборудования// Пожарная техника и тушение пожаров: Тр./ ВНИПО, 1980.- с.31-37.

15. Шевцов Н.Р. Определяющий критерий взрывоподавляющей эффективности пламегасителей. - В кн. Взрывное дело, № 84-41.- М.: Недра, 1982. - с.127-134.

16. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Малавко Н.Н. Результаты испытаний огнетушащих составов в опытном штреке// Динамика, уровень и причины производственного травматизма на шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1982, ДСП. - с.76-80.

17. Пламегасящее и взрывоподавляющее действие высокодисперсных порошков в метано- воздушных смесях./ Д.Ф.Даценко, В.Я.Забуга, Л.П.Долинская, Н.Р.Шевцов// Физика аэродисперсных систем, вып.22.- Киев: Вища школа, 1982.- с.71-77.

18. Исследование теплопоглощающих свойств взрывоподавляющих порошков/ Д.Ф.Даценко, В.Я.Забуга, Л.П.Долинская, Н.Р.Шевцов// Журнал прикладной химии, т.55.-№ 3.- 1982.-с.595-598.

19. Шевцов Н.Р. Экспериментальный метод определения удельного теплопоглощения// Уровень динамики и причины производственного травматизма на угольных шахтах при ведении взрывных работ: Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1983, ДСП.- с.9-13.

20. Стигачев В.И., Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б. Длина забойки скважин при передовом торпедировании// Безопасность труда в промышленности. - 1983. - № 9. - с.39-40.

21. Шевцов Н.Р., Стигачев В.И., Михайлов А.Б. Определение толщины предохранительной оболочки вокруг заряда ВВ// Уровень, динамика и причины производственного травматизма на угольных шахтах при ведении взрывных работ: Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1983, ДСП. - с.9-13.

22. Технология механизированного заряжания и забойки скважин при передовом торпедировании труднообрушаемой кровли в угольных шахтах/ В.И.Стигачев, Н.Н.Ганонов, Н.Р.Шевцов, И.Д.Калимулин, А.Б.Михайлов. - В кн.Взрывное дело, № 87/44. - М.:Недра, 1985.- с.112-118.

23. Шевцов Н.Р. Подавление взрыва в туфовых горных выработках// Безопасность труда в промышленности. - 1986. - № 2.- с.30-31.

24. Шевцов Н.Р., Вайнштейн Б.И., Михайлов А.Б., Манжос Ю.В. Испытания системы автоматического гашения взрывов в подготовительных выработках// Уголь Украины. - 1986. - № 9. - с.37-38.

25. Александров В.Е., Шевцов Н.Р., Вайнштейн Б.И. Безопасность взрывных работ в угольных шахтах. - М.: Недра, 1986, - 150 с.

26. Александров В.Е., Шевцов Н.Р., Вайнштейн Б.И. Автоматическая защита горных выработок при взрывных работах// Уголь. - 1986. - № 12. - с.40-46.

27. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Малявка Н.Н. Исследование запыляющей и пламегасящей эффективности порошковых забоечных материалов// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1986, ДСП, - с.66-73.

28. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б. Забойка скважин при пневмотранспортировании// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1986, ДСП. - с.73-80.

29. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Малявка Н.Н. Результаты испытаний аэрозольных (порошковых) завес в опытном штреке// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1987, ДСП. - с.68-75.

30. Шевцов Н.Р. Основные закономерности процесса локализации взрыва в горных выработках// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1987, ДСП. - с.75-80.

31. Толстых К.С., Стикачев В.И., Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б. Эффективность и область применения порошковых завес для взрывозащиты горных выработок при взрывных работах// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1987, ДСП. - с.59-68.

32. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Манжос Ю.В., Малявка Н.Н. Анализ опыта эксплуатации системы автоматического взрывоподавления "Заслон АВП-I" в угольных шахтах// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./ МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1988, ДСП. - с.68-75.

33. Справочник взрывника/ Б.Н.Кутузов, В.М.Скоробогатов, И.Е.Ерофеев, В.Н.Мосинец, Л.В.Дубнов, Л.Г.Фридман, В.И.Пугачев, П.И.Кушнеров, В.И.Зенин, В.И.Стикачев, Б.И.Вайнштейн, Н.Р.Шевцов, В.М.Глоба. - М.: Недра. 1988. - 511 с.

34. Калякин С.А., Шевцов Н.Р. Взаимодействие продуктов детонации ВВ с забоечным материалом при камуфлетном взрывании// Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1988. - с.47-53.

35. Шевцов Н.Р. Влияние метеоусловий на степень взрывчатости метано-воздушной смеси// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1988, ДСП. - с.62-68.

36. Шевцов Н.Р. К теории локализации взрыва в загазированных выработках// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1990, ДСП. - с.27-35.

37. Умнов А.Е., Голек А.С., Палеев А.Ю., Шевцов Н.Р. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях. - М.: Недра, 1990. - 286 с.

38. Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Малявка Н.Н. Исследование мортирного способа создания предохранительной среды// Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1990. - с.144-150.

39. Толстых К.С., Шевцов Н.Р., Михайлов А.Б., Малявка Н.Н. Анализ результатов опытно-промышленной проверки аэрозольных завес// Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Тр./МакНИИ, Макеевка-Донбасс, 1990, ДСП. - с.35-40.

40. А.с.344142 (СССР), Е21f5/14, G01n33/00. Способ сравнительной оценки предохранительных свойств буферных защитных сред/ Ф.М.Галаджий, Н.Р.Шевцов, А.Б.Михайлов. - Опубл.07.07.72. - Бюл. № 21.

41. А.с. 581826 (СССР), Е 21f5/00. Способ гашения очагов воспламенения метано-воздушных смесей/ Н.Р.Шевцов, Ф.М.Галаджий, А.Б.Михайлов, П.А.Воронин. - Заявл.10.01.74.

42. А.с. 692297 (СССР), Е 21f5/00. Взрывоподавляющее устройство/ Н.Р.Шевцов, В.И.Мамаев, Ф.М.Галаджий, В.Е.Александров, А.Б.Михайлов, В.П.Ковалев, В.А.Дыбенко - Заявл.03.08.77.

43. А.с. 919681 (СССР), A62C 3/04. Способ взрывозащиты замкнутых технологических аппаратов/ Л.М.Мешман, В.П.Некрасов, В.В.Мальков, А.И.Веселов, Н.Р.Шевцов, А.М.Морев, А.М.Морозов. - Опубл. 15.04.82. - Бюл. № 14.

44. А.с. I2I5462 (СССР), F42Д I/08. Состав забойки для пневмотранспортирования по зарядному трубопроводу/ В.И.Стикачев, Н.Н.Гапонов, Н.Р.Шевцов, И.Д.Калимулин, А.Б.Михайлов. - Заявл.24.06.83.

45. А.с. I556I7I (СССР). Порошковая композиция для локализации взрывов пыле-метано-воздушных смесей в угольных шахтах и способ ее получения/ Д.Ф.Даценко, П.А.Куприенок, В.Я.Забуга, Б.А.Грядущий, Н.Р.Шевцов, А.Б.Михайлов, Б.А.Шихов, Л.Г.Семке. - Заявл. 30.12.85.

46. А.с. I380386 (СССР), F42Д I/08, 3/04. Способ заряжания скважин при передовом торпедировании/ В.И.Стикачев, Н.Р.Шевцов, Н.Н.Гапонов, А.Б.Михайлов, П.С.Залесский, И.Д.Калимулин. - Заявл. 09.07.86.

47. А.с. I46033I (СССР). Порошковое средство для взрывоподавления метано-воздушных смесей/ Д.Ф.Даценко, П.А.Куприенок, Б.А.Грядущий, Н.Р.Шевцов, А.Б.Михайлов, Л.И.Кравец, В.Я.Забуга, О.М.Вязьмитина, Т.Г.Вербецкая, М.Е.Юрчук, Л.Г.Семке. - Заявл. 22.12.86.

48. А.с. I4627I6 (СССР). Порошковая взрывоподавляющая композиция/ Д.Ф.Даценко, В.В.Косинов, П.А.Куприенок, М.Е.Юрчук, Л.И.Кравец, Н.Н.Гапонов, Н.Р.Шевцов, А.Б.Михайлов, Ю.К.Бахмутов, Б.А.Грядущий. - Заявл.23.03.87.

49. А.с. I427076 (СССР), F2IД II/I4. Способ проведения горной выработки/ Б.А.Грядущий, Н.Н.Гапонов, И.Д.Калимулин, Н.Р.Шевцов, В.Е.Александров, И.П.Курченко, В.И.Стикачев, Б.В.Левин. - Опубл.30.09.88. - Бюл. № 36.

Ротапринт МакНИИ. Заказ № 276-150экз.

Подписано к печати 05.06.92г.

г. Макеевка Донецкой обл., Лихачева, 60

467477

AB 25.593
AB 25.593