

На правах рукописи

РГБ ОД

17 июл 2000

ПАЛЕЕВ Дмитрий Юрьевич

**АКТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВЗРЫВООПАСНЫЕ
ОБЛАСТИ И ОЧАГИ ГОРЕНИЯ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ
И ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук



Ижевск - 2000

Работа выполнена на кафедре прикладной аэромеханики физико-технического факультета Томского государственного университета

Научный консультант: доктор физико-математических наук
профессор И.М. Васенин

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор В.Н. Скоробогатский
доктор технических наук
профессор И.Г. Русак
доктор физико-математических наук
профессор А.Ф. Воеводин

Ведущая организация – Государственный Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности (ВостНИИ), г. Кемерово

Защита диссертации состоится “ 9 ” июня 2000 г.
в “ 14 ” часов на заседании специализированного совета Д 200.70.01
при Институте прикладной механики УрО РАН по адресу 426000,
г. Ижевск, ул. М. Горького, 222

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной механики УрО РАН, г. Ижевск.

Автореферат разослан “ 26 ” апреля 2000 г.

Учёный секретарь
специализированного совета
канд. физ.-мат. наук



С.П. Копысов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная угольная шахта – это сложный производственный комплекс, в основе работы которого лежат строго регламентированная деятельность человека и естественные процессы сдвигения и разрушения горных пород, дающие толчок сложным физическим процессам, оказывающим огромное влияние на интенсивность и безопасность горных работ. Развитие технологии угледобычи, как правило, влечёт за собой аварийные ситуации, часто проявляющиеся в виде загазований, самонагреваний угольных оплелей, воспламенений и взрывов метановоздушных смесей. Ликвидация таких аварийных ситуаций всегда сопровождается крупными экономическими потерями, травмированием или гибелью горнорабочих и горноспасателей. Основное место их проявления – выработанные пространства, сопряжённые с ним выработки выемочного участка и подготовительные выработки.

Если подготовительные выработки характеризуются необходимостью их принудительного проветривания и опасностью быстрого загазования с угрозой рыва, то в выработанных пространствах могут инициироваться опасные физико-химические и газодинамические процессы, оказывающие негативное воздействие далеко за пределами выемочного участка. Сформированные из обрушенных пород и неизбежных потерь угля, выработанные пространства представляют собой пористую среду больших геометрических размеров с высокой пористостью и аэродинамически связанную с горными выработками. Выработанные пространства становятся областями интенсивных аэродинамических течений, провоцирующих самонагревание угля, переходящее в эндогенный пожар. Осложнённый выходом открытого огня в действующие выработки, кой пожар – опасное и трудно прогнозируемое явление, ещё недостаточно изученное, способы и средства ликвидации которого недостаточно эффективны.

Важной составляющей оснащения военизированных горноспасательных стей (ВГСЧ) являются средства дистанционного воздействия на очаг пожара и взрывоопасную среду с безопасного расстояния. Эти средства используют принудительную подачу огнетушащих составов по трубопроводам, скважинам и транспортирование их в спутных потоках вентиляционных трубопроводов, зных выработок, выработанных пространств. По существу используются методы гидро- и газодинамического воздействия на объекты, зарождение и развитие которых происходит по законам газовой динамики и тепломассообмена. (нако эти методы не всегда подкреплены строгими научными расчётами и стика их применения в критических ситуациях часто основывается исключительно на личном опыте и интуиции горноспасателей.

Невозможность проведения прямых натурных экспериментов делают актуальной разработку математических моделей, описывающих весь комплекс нежелательных процессов в системе «горные выработки – выработанное пространство». С их помощью можно прогнозировать газодинамическое состояние следущей системы при активном на неё воздействии и разрабатывать более

эффективные способы и средства ликвидации аварийных ситуаций, связанных с угрозой воспламенения и взрыва метана.

Сложные подземные аварии могут сопровождаться взрывами с формированием ударных волн, распространяющихся по горным выработкам и сокращающих всё на своём пути. Поэтому актуальной является разработка математических моделей, позволяющих рассчитывать распространение ударных волн разветвлённой сети горных выработок с целью выбора безопасных мест расселения людей и оборудования, задействованных в ходе ликвидации аварии.

Все исследования выполнялись по тематике Российского научно-исследовательского института горноспасательного дела (РосНИИГД) по проблеме Му углепрома СССР П191710 в рамках постановления ГКНТ и Госплана СССР 7.07.81 г. № 223/140; по программе Минтопэнерго России "Разработка и совершенствование средств противоаварийной защиты угольных предприятий" 24.02.93 г. Диссертационная работа обобщает результаты 8 научно-исследовательских тем, выполненных в 1981-1999 гг. под руководством и непосредственным участием автора (№№ Г.Р.: 01825066377, 01829010618, 0183006310, 01860072720, 01900307000, 01930321000, 01950005092, 0980009368).

Цель работы – обоснование и разработка дистанционных методов активного воздействия на потенциально взрывоопасные области и очаги горения флегматизирующими составами, применение которых повысит эффективность и безопасность горноспасательных работ в угольных шахтах.

Идея работы состоит в обеспечении активного воздействия на недоступные для горноспасателей пожаро- и взрывоопасные области за счёт формирования искусственных и использования существующих газодинамических потоков в качестве несущей фазы для транспортирования флегматизирующих составов.

Методы исследования: методы механики сплошных сред и математической физики для построения и обоснования математических моделей газодинамических процессов в горных выработках и выработанных пространствах; аналитическое и численное решение математических моделей с применением аппарата теории дифференциальных уравнений и ЭВМ; экспериментальные исследования в лабораторных и шахтных условиях.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения режима работы вентилятора местного проветривания и аэродинамической характеристики вентиляционного трубопровода при транспортировании паров галоидоуглеводородов в воздушном потоке зависят от концентрации транспортируемых паров, температуры пожарных газов, угла наклона выработки к горизонту.

2. Флегматизирующие концентрации хладона 114В2, бромистого этила, ставов БФ-2 и БФ(1:1) для метановоздушных и метановодородовоздушных смесей (при содержании водорода от 1 до 3 %) зависят от газовой ситуации в горной выработке и должны избирательно использоваться при ликвидации аварии.

3. Математическая модель, описывающая диффузионно-фильтрационное течение в выработанных пространствах должна строиться с учётом сил плавучести.

ти, порождаемых неоднородностью газовой среды, влияние которых измеримо с влиянием сил сопротивления и градиента давления.

4. Двухтемпературная математическая модель теплопереноса в обрушенном массиве, обеспечивающая описание газодинамических процессов в окрестности очага эндогенного пожара.

5. Алгоритм и методика расчёта диффузионно-фильтрационного течения в выработанных пространствах, построенная в развитие метода контрольного объёма Патанкара к решению гидродинамических задач на основе полиномиальной аппроксимации экспоненциальной схемы, снимающей ограничение по сеточному числу Рейнольдса.

6. Математический алгоритм активного управления газодинамикой выработанного пространства, обеспечивающий прогноз параметров изменения фильтрационных потоков и газового состава в заданной области за счёт воздействия газовых завес, азотоподающих и дегазационных (газоотсасывающих) скважин.

7. Газодинамический подход для расчёта ударно-волновых процессов, позволяющий рассчитывать распространение, отражение и взаимодействие ударных волн и волн разрежения в разветвлённой сети горных выработок любой сложности.

Достоверность научных положений подтверждается:

- использованием известных экспериментальных результатов для задания сходных данных и правых частей дифференциальных уравнений;
- решением тестовых задач, сравнением с результатами решений по альтернативным методикам, сравнением с известными экспериментальными результатами, проведением исследования сходимости решений путём увеличения искренности расчётной области;
- удовлетворительной сходимостью численного эксперимента с данными газовых съёмов выемочных участков угольных шахт;
- подтверждением результатов теоретических исследований транспортирования паров галоидоуглеводородов экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 9 %;
- положительными результатами промышленного применения дистанционного способа транспортирования паров галоидоуглеводородов при ликвидации аварий на шахтах Кузбасса.

Научная новизна работы:

- установлены зависимости аэродинамической характеристики вентиляционного трубопровода, режима работы вентилятора местного проветривания, параметров движения паровоздушной смеси по вентиляционному трубопроводу, изменение объёмного расхода паровоздушной смеси на срезе вентиляционного трубопровода от концентрации транспортируемых паров галоидоуглеводородов, температуры пожарных газов и угла наклона выработки к горизонту. Введение галоидоуглеводородов в вентиляционный трубопровод увеличивает его аэродинамическое сопротивление и повышает депрессию вентилятора, приём при горизонтальном расположении трубопровода снижается расход на его конце при неизменной производительности вентилятора, при положительных

углах наклона трубопровода производительность вентилятора и расход на конце его уменьшаются, при отрицательных – увеличиваются.

- определены минимальные флегматизирующие концентрации для метановоздушных сред: хладона 114В2 – 1,1 %, бромистого этила – 3,8 %, составов БФ-2 – 2,9 % и БФ(1:1) – 2,0 % и для метановоздушных сред при содержании водорода 1, 2 и 3 %, которые являются выше огнегасительных при объёмном пожаротушении. В частности, при содержании водорода 3 % минимальные флегматизирующие концентрации хладона 114В2 – 3,3 %, бромистого этила – 6,2 %, составов БФ-2 – 6,3 %, БФ(1:1) – 4,6 %. Бедные смеси рекомендуется флегматизировать хладоном 114В2, богатые – составом БФ(1:1).

- разработана математическая модель газодинамических процессов с учётом неоднородности газовой среды и порождаемых ею сил плавучести, позволяющая выявлять особенности, присущие диффузионно-фильтрационному течению в выработанных пространствах крутых пластов;

- разработана математическая модель теплопереноса в обрушенном массиве в окрестности очага эндогенного пожара на основе двухтемпературного подхода, учитывающего теплообмен газовой фазы с пористым породным скелетом;

- на основе подходов Патанкара построены эффективные численные алгоритмы и методики расчёта теплопереноса в выработанном пространстве;

- установлены особенности влияния неоднородности газовой среды в выработанном пространстве крутых пластов, порождаемой метановыделением, на структуру течения, распределение фильтрационных потоков, величину утечек, расположение и размеры потенциально взрывоопасных областей;

- разработан моделирующий алгоритм для выбора параметров активного управления газодинамикой выработанного пространства с использованием пенных завес, азотоподающих и дегазационных скважин;

- впервые предложен газодинамический подход для расчёта ударно-волновых процессов в горных выработках и разработана методика численного решения, учитывающая пространственную топологию сети горных выработок.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке методов активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в подготовительных выработках и выработанных пространствах (А.с. 863881, 1245714, 1270366, 1317157, 1573204, 1701937);

- в создании методики расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах метана в угольных шахтах.

Результаты выполненных исследований позволяют:

- избирательно подходить к выбору хладона 114В2, бромистого этила, составов БФ-2 и БФ(1:1) при ликвидации аварии в зависимости от газовой ситуации в выработке;

- определять параметры транспортирования паров галоидоуглеводородов в воздушном потоке вентиляционного трубопровода в зависимости от их концентрации, температуры пожарных газов и угла наклона выработки к горизонту

- применять разработанные математические модели для прогноза газодинамических ситуаций в выработанных пространствах крутых пластов с учётом природных и технологических факторов;

- рассчитывать величину утечек в выработанное пространство щитового участка в зависимости от свойств вмещающих пород, интенсивности метано-выделения, вентиляционных характеристик участка и глубины отработки по аппроксимационной формуле, полученной на основе обобщения результатов численных экспериментов;

- определять размеры и расположение потенциально взрывоопасных областей в выработанном пространстве щитового участка и воздействовать на них газодинамическими методами;

- разрабатывать алгоритмы управления газодинамической ситуацией в выработанном пространстве в зависимости от природных и технологических факторов с учётом возмущающего воздействия очага эндогенного пожара;

- рассчитывать газодинамические параметры ударных волн, распространяющихся по горным выработкам, и определять места безопасного размещения людей и оборудования, задействованных в ходе ликвидации аварии;

- повысить эффективность и безопасность ведения горноспасательных работ за счёт активного воздействия на потенциально взрывоопасные области и очаги горения, значительно сократить трудоёмкость, длительность и, в конечном счёте, сумму экономического ущерба от аварий.

Реализация работ в промышленности. Результаты исследований вошли во «Временное руководство по применению хладонов и их смесей при ведении горноспасательных работ на шахтах Кузбасса» (1984 г.), «Руководство по тушению пожаров в тупиковых выработках» (1985 г.), «Руководство по тушению пожаров в тупиковых подготовительных выработках хладоновыми составами на шахтах Кузбасса и Карагандинского бассейна» (1987 г.), «Руководство по применению инертных газов при ликвидации пожаров в шахтах» (1989 г.). Перечисленные документы используются при обучении личного состава ВГСЧ и во время ликвидации аварий на угольных шахтах страны.

Результаты работы использованы при разработке конструкторской документации на производство устройства подачи хладона в вентилятор (УПХВ), которое применяется горноспасателями Кузбасса в аварийных условиях с 1981 г.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные её части докладывались и обсуждались на I Всесоюзной научно-практической конференции «Предупреждение и тушение подземных пожаров» (г. Донецк, 1978 г.), на I Всесоюзном симпозиуме по макроскопической кинетике и химической газодинамике (г. Алма-Ата, 1984 г.), на Всесоюзных совещаниях по управлению вентиляцией и газодинамическим явлениям в шахтах (г. Новосибирск, 1981, 1984, 1987, 1991 гг.), на Всесоюзной конференции по современным способам борьбы с подземными пожарами и ведения горноспасательных работ на горно-рудных предприятиях (г. Свердловск, 1984г.), на XXIV Международной конференции научно-исследовательских институтов по безопасности работ в горной промышленности (г. Донецк, 1991 г.), на Международной научно-практической

конференции «Научноёмкие технологии угледобычи и углепереработки» (г. Кемерово, 1998 г.), на II Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (г. Кемерово, 1998 г.), на Всероссийской научной конференции «Байкальские чтения по математическому моделированию процессов в синергетических системах» (г. Улан-Удэ – г. Томск, 1999 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 32 печатных работах, из которых 2 монографии, 1 брошюра, 4 нормативных документа и 9 изобретений. В автореферате приведён список 26 основных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения, изложенных на 269 страницах машинописного текста включая 103 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 209 наименований. Общий объём 294 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Состояние вопроса и задачи исследования. Анализируются газодинамические процессы, происходящие в подготовительных выработках и выработанных пространствах крутых пластов при нормальных технологических режимах работы шахты и в аварийных условиях. Рассмотрены применяемые в настоящее время технические средства и способы ликвидации пожаров и предотвращения взрывов на этих объектах. Обосновывается актуальность разработки новых дистанционных способов активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения, которые должны опираться на глубокое понимание сложных газодинамических и тепломассообменных процессов, происходящих в горных выработках и выработанных пространствах.

Предложен дистанционный способ и устройство, которые позволяют не находясь в зоне действия высоких температур, быстро подавлять пламенное горение в очаге пожара и флегматизировать атмосферу подготовительной выработки без изменения концентрации кислорода. Способ и устройство используют жидкие галоидоуглеводороды, которые струями вводятся на лопасти нагнетательного колеса вентилятора местного проветривания, где флегматизатор разбивается до мелкодисперсного состояния, подхватывается потоком воздуха, испаряется и транспортируется по вентиляционному трубопроводу в призабойное пространство подготовительной выработки. Однако применение этого способа требует исследования флегматизирующих свойств, применяемых горноспасателями галоидоуглеводородов: хладона 114В2, бромистого этила и их смесей по отношению к наиболее взрывоопасным метановоздушным и метановодородовоздушным средам и разработку научно обоснованных рекомендаций по транспортированию галоидоуглеводородов в очаг пожара.

Совместное применение пенных завес, азотоподающих и газоотсасывающих скважин для целенаправленного активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в выработанных пространствах крутых пластов требует предварительного математического моделирования сложной газодинамической

ситуации, возникающей в выработанном пространстве в ходе ликвидации аварии. Известные численные алгоритмы, реализующие математические модели газодинамики выработанного пространства, выполнены без учёта неоднородности газовой среды. Поэтому возникает необходимость оценки вклада плавучести. Не рассмотрены вопросы определения конфигурации, размеров и местоположения потенциально взрывоопасных областей в выработанных пространствах крутых пластов. Недостаточно исследовано влияние пенных завес, газоотсасывающих и инертизирующих скважин на фильтрационные поля в выработанном пространстве.

Анализ характера распространения ударных волн при взрывах в горных выработках показал, что их поведение достаточно сложно описать простыми зависимостями. Существующая на данный момент методика определения параметров ударных волн совершенно не учитывает волновой характер их распространения и взаимодействия. Поэтому преодоление недостатков, свойственных существующей на данный момент упрощенной методике и корректный учёт особенностей распространения ударных волн по разветвлённой сети горных выработок возможны при условии разработки принципиально новой методики, в основу которой должна быть положена строгая математическая модель.

В заключении главы сформулированы основные задачи исследования:

1. Исследовать флегматизирующие свойства хладагента 114В2, бромистого тила и их смесей по отношению к метановоздушным и метановодородовоздушным средам.

2. Исследовать дистанционный способ доставки паров галоидоуглеводородов в воздушном потоке вентиляционного трубопровода в очаг пожара.

3. Разработать математические модели диффузионно-фильтрационного движения газа и тепломассопереноса в окрестности очага эндогенного пожара в выработанных пространствах крутых пластов с учётом неоднородности газовой среды.

4. Разработать численные методы и алгоритмы расчёта, обеспечивающие многопараметрическое моделирование газодинамических процессов с учётом тепломассопереноса в выработанных пространствах крутых пластов.

5. Исследовать особенности влияния неоднородности газовой среды в выработанном пространстве на структуру течения, распределение фильтрационных потоков, величину утечек, расположение и размеры потенциально взрывоопасных областей.

6. Разработать математическое описание процессов дегазации, инертизации и воздействия пенных завес, провести численное исследование по выявлению особенностей их влияния для обоснования параметров активного управления газодинамической ситуацией в выработанном пространстве в окрестности потенциальных очагов эндогенных пожаров.

7. Разработать газодинамический подход и методику расчёта ударно-волновых процессов с учётом пространственной топологии разветвлённой сети горных выработок, исследовать распространение ударных волн в горных выработках с учётом локальных скоплений метана по пути перемещения.

2. Исследование влияния транспортирования паров галоидоуглеводородов на аэродинамические характеристики вентиляционного трубопровода и вентилятора. Введение тяжёлых паров галоидоуглеводородов в воздушный поток вентиляционного трубопровода приводит к увеличению его плотности и как следствие - к изменению режима работы вентиляторной установки. Негерметичность трубопровода, прогрев его стенок омывающим потоком пожарных газов и угол наклона выработки к горизонту также влияют на доставку паров галоидоуглеводородов в зону очага пожара.

Для исследования процесса движения паровоздушной смеси в негерметичном шахтном трубопроводе без учёта прогрева его стенок со стороны пожарных газов было получено дифференциальное уравнение Абеля 2-го порядка

$$\frac{d^2 Q}{dx^2} \cdot \frac{dQ}{dx} - mQ \frac{dQ}{dx} - (n + G(x)) \cdot Q^2 = 0, \quad (2.1)$$

$$Q(0) = Q_0, \quad \frac{dQ}{dx} \Big|_0 = 0, \quad (2.2)$$

где

$$m = \frac{8\rho k^2}{\pi^2 d_T^2}; \quad n = \frac{32\alpha k^2}{\pi^2 d_T^3}; \quad G(x) = \frac{\Delta\rho g d_T^2 k^2}{2Q^2(x)} \sin \gamma; \quad (2.3)$$

x – координата, отсчитываемая от конца трубопровода, м; $Q(x)$ – расход смеси в сечении трубопровода с координатой x , м³/с; Q_0 – расход смеси на выходе из трубопровода, м³/с; ρ – плотность паровоздушной смеси, кг/м³; $\Delta\rho$ – разность плотностей паровоздушной смеси и воздуха, кг/м³; d_T – диаметр трубопровода, м; α – коэффициент аэродинамического сопротивления, н·с²/м⁴; k – коэффициент, характеризующий величину эквивалентного отверстия неплотностей трубопровода на единицу длины, м/с·Па^{0.5}; g – ускорение свободного падения, м/с²; γ – угол наклона выработки к горизонту.

Решение уравнения (2.1) позволило рассчитать аэродинамическую характеристику вентиляционного трубопровода длиной L

$$H = \left[\frac{4\alpha}{d_T} \int_0^L Q^2(x) dx + \frac{\rho Q_0^2}{2} (\rho_Q^2 - 1) \right] \cdot \left(\frac{4}{\pi d_T} \right)^2 + \Delta\rho g x \sin \gamma \quad (2.4)$$

и исследовать влияние паров галоидоуглеводородов на работу системы «вентилятор - вентиляционный трубопровод».

Результаты расчетов показали, что введение паров галоидоуглеводородов в воздушный поток горизонтального трубопровода приводит к увеличению его аэродинамического сопротивления и изменению аэродинамических характеристик вентилятора и трубопровода. В результате переход к новому режиму работы вентилятора сопровождается увеличением его депрессии на величину

$$\Delta H = 1,13 C^3 \bar{L} \cdot \frac{\rho_T}{\rho_B} \left(1 - \exp[-0,01 Q_B^3 \bar{L}] \right) \quad (2.5)$$

при неизменной производительности (рис. 2.1). Здесь C – концентрация паров галоидоуглеводородов; ρ_T – плотность паров; ρ_B – плотность воздуха; Q_B – производительность вентилятора.

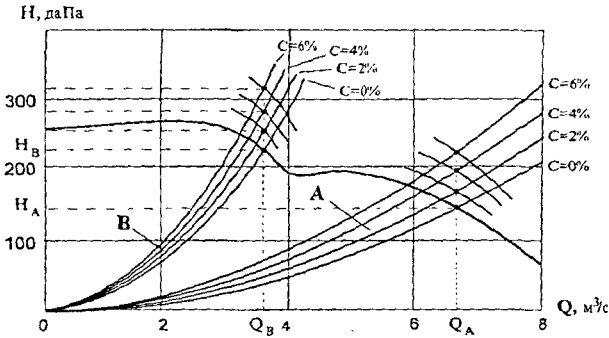


Рис. 2.1. Изменение режима работы вентилятора СВМ-6М в зависимости от концентрации паров хладагента 114В2 для трубопроводов длиной: *A* – 100 м; *B* – 1000 м

Увеличение депрессии вентилятора, а следовательно и нагрузки на его электродвигатель, пропорционально увеличению концентрации транспортируемого галоидоуглеводорода. Расчёты показали, что вентилятор будет работать в устойчивом режиме и доставлять пары галоидоуглеводородов в призабойное пространство горизонтальной выработки независимо от длины трубопровода, если их концентрация не будет превышать следующих допустимых значений: хладагента 114В2 – 7,0 %, БФ(1:1) – 8,2 %, БФ-2 – 9,0 %, бромистого этила – 9,7 %.

Увеличение депрессии вентилятора сопровождается повышением давления в трубопроводе и увеличением утечек через его неплотности. Это ведет к незначительному сокращению поступления воздуха в забой тупиковой выработки. Абсолютная величина этого сокращения описывается соотношением

$$\Delta Q = 0,8 \cdot \sqrt{k} \cdot Q_B C \cdot \frac{\rho_r}{\rho_B} [\exp(0,01^3/L) - 1]. \quad (2.6)$$

При наклонно расположенном трубопроводе, когда угол $\gamma \neq 0^\circ$, вентилятор вынужден увеличивать депрессию на преодоление вертикальной составляющей избыточного веса столба паровоздушной смеси при положительных углах наклона, а при отрицательных, наоборот, происходит его разгрузка. В результате

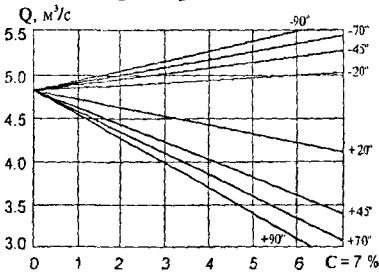


Рис. 2.2. Изменение расхода на конце трубопровода длиной 200 м в зависимости от концентрации хладагента 114В2 и наклона выработки к горизонту

новый режим работы вентилятора характеризуется уменьшением его производительности при $\gamma > 0^\circ$ и, наоборот, увеличением при $\gamma < 0^\circ$. Аналогичная закономерность наблюдается и с изменением расхода на конце трубопровода. (рис. 2.2). Поэтому в условиях высокой метанообильности выработки сокращение её проветривания может оказаться недопустимым.

Для исследования влияния прогрева потока на режим работы вентилятора была разработана следующая математическая модель:

$$\frac{d\rho}{dx} = -\frac{\rho}{T} \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (2.7)$$

$$\frac{dQ}{dx} = -\left(kd_T \sqrt{H} + \frac{Q}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx}\right), \quad (2.8)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\Pi \alpha_K}{c_p \rho Q} (T_W - T), \quad (2.9)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{8\lambda_T}{\pi^2 d_T^3} \rho Q^2 + \frac{8}{\pi^2 d_T^4} \left(2\rho Q \frac{dQ}{dx} + Q^2 \frac{d\rho}{dx}\right) + \Delta\rho g \sin \gamma, \quad (2.10)$$

где

$$T_W = T_{CT} + (T_L - T_{CT}) \cdot \exp\left[-\frac{\alpha_{CT} \Pi}{c_{пг} G} (L - x)\right]. \quad (2.11)$$

Начальные условия: при $x=0$ ρ_0 , Q_0 , T_0 , H_0 ;

Здесь T , T_W - температура паровоздушной смеси и внутренней поверхности трубопровода; T_L - температура пожарных газов у среза трубопровода; T_{CT} - температура стенок выработки до пожара; G - массовый расход пожарных газов; $c_{пг}$, c_p - удельные теплоемкости пожарных газов и паровоздушной смеси; λ_T - безразмерный коэффициент сопротивления трубопровода; α_{CT} - коэффициент теплоотдачи на стенке выработки; α_K - коэффициент теплоотдачи на внутренней стенке трубопровода; Π - периметр выработки; x - координата, отсчитываемая от начала трубопровода.

Расчеты показали, что увеличение температуры транспортируемого потока, даже без введения в него паров галоидоуглеводородов, приводит к увеличению аэродинамического сопротивления трубопровода, снижению производительности вентилятора и увеличению его депрессии. Введение в поток галоидоуглеводородов приводит к дополнительному увеличению депрессии вентилятора при неизменной производительности (рис. 2.3).

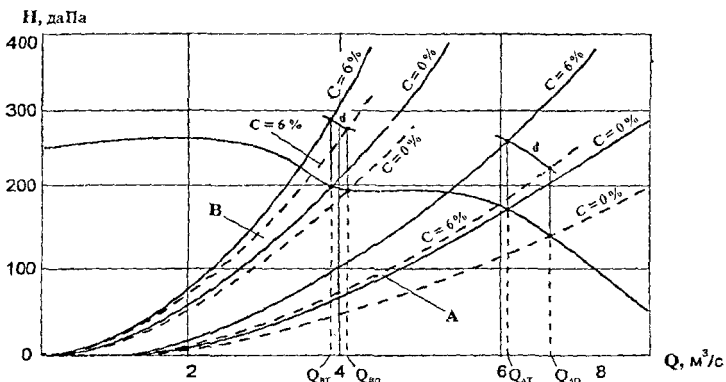


Рис. 2.3. Изменение режима работы вентилятора СВМ-6М при работе на горизонтальный трубопровод длиной: A - 100 м; B - 400 м при введении в него 6 % паров хладона 114В2; d - отрезок аэродинамической характеристики вентилятора при $C = 6\%$ хладона 114В2;

----- $T_L = 16^\circ\text{C}$; ———— $T_L = 150^\circ\text{C}$

Качественная картина влияния угла наклона выработки на режим работы вентилятора остается прежней. Изменяется только количественная сторона этого влияния. Так, депрессия вентилятора при $\gamma > 0^\circ$, будет меньше, а при $\gamma < 0^\circ$, наоборот, больше соответствующей депрессии вентилятора при отсутствии прогрева трубопровода со стороны пожарных газов.

Специальные стендовые исследования процесса запуска хладона 114В2 в воздушный поток горизонтального вентиляционного трубопровода подтвердили возможность эффективного распыления жидких огнегасительных составов с помощью вентилятора с последующим полным их испарением в воздушном потоке трубопровода. Эксперименты зафиксировали линейный характер изменения депрессии вентилятора и развиваемой им мощности (при неизменной производительности) от концентрации транспортируемых паров галоидоуглеводородов и подтвердили возможность использования в практических расчетах зависимости (2.5).

3. Оптимальные флегматизирующие концентрации галоидоуглеводородов для подавления пламенного горения и предотвращения взрывов в шахтах по отношению к метановоздушным и метановодородовоздушным средам определялись на установке ВНИИГД по методике, учитывающей не только стационарное распространение пламени в реакционном сосуде, но и короткую вспышку. Поскольку водород при пожарах в выработках может присутствовать в концентрациях не более 3 %, то исследования для метановодородовоздушных сред проводились при содержании водорода 1, 2 и 3 %. Сравнительная оценка эффективности галоидоуглеводородов проводилась по их концентрациям в точке флегматизации (табл. 3.1) и по характеру их воздействия в области бедных и богатых горючих смесей.

Таблица 3.1

Минимальные флегматизирующие концентрации (МФК)
для метановодородовоздушных сред

Содержание водорода, %	МФК, %				МФК, г/м ³			
	Хладон 114В2	БФ(1:1)	БФ-2	Бромистый этил	Хладон 114В2	БФ(1:1)	БФ-2	Бромистый этил
0	1,1	2,0	2,9	3,8	145	169	190	210
1	2,1	3,1	3,7	4,3	276	263	242	232
2	2,4	3,9	4,3	5,1	315	330	281	278
3	3,3	4,6	6,3	6,2	434	390	346	336

Из рис. 3.1,а видно, что по степени убывающей эффективности в области бедных метановоздушных смесей (с концентрацией метана менее стехиометрической - 9,5 %) галоидоуглеводороды располагаются в следующей последовательности:

Хладон 114В2 > БФ(1:1) > БФ-2 > Бромистый этил.

Для богатых смесей их эффективность практически одинакова.

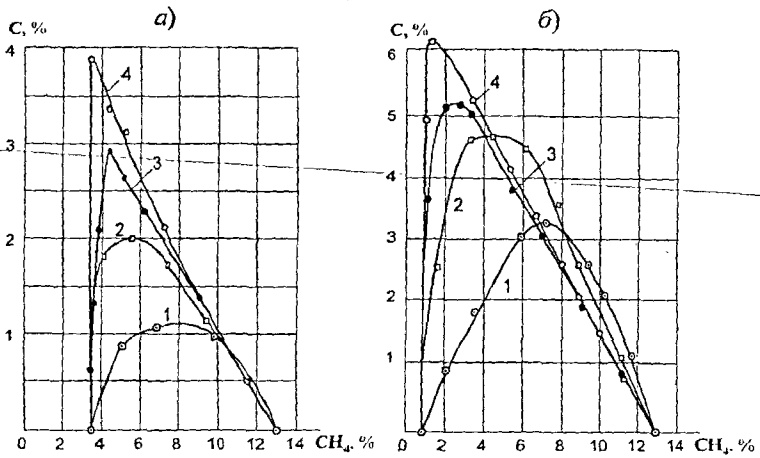


Рис. 3.1. Влияние галоидоуглеводородов на область воспламенения
а - метана в воздухе; *б* - метановоздушной смеси с добавкой 3 % водорода:
 1 - хладон 114В2; 2 - состав БФ(1:1); 3 - состав БФ-2; 4 - бромистый этил.

Бромистый этил расширяет нижний концентрационный предел метана на 0,5 % и в определенных условиях может оказаться даже катализатором реакции горения. Поэтому в аварийных ситуациях при нарастании концентрации метана необходимо принимать меры для быстрого создания во взрывоопасном объеме его флегматизирующей концентрации 3,8 %. Наоборот, хладон 114В2 не требует создания в первоначальный момент, по мере приближения концентрации метана к нижнему концентрационному пределу, максимальной флегматизирующей концентрации 1,1 %. Поэтому хладон 114В2 в области бедных метановоздушных смесей более эффективен и более экономичен, чем бромистый этил.

Добавление в метановоздушную смесь водорода приводит к увеличению МФК галоидоуглеводородов (см. табл. 3.1) и расширяет область воспламенения (рис. 3.1,б). Добавка бромистого этила не расширяет пределы воспламенения. Хладон 114В2 несколько хуже флегматизирует метановодородовоздушную смесь, чем метановоздушную. Точка флегматизации у него смещена в сторону богатых смесей. У остальных флегматизаторов эта точка смещена в сторону бедных смесей.

По степени эффективности для бедных метановодородовоздушных смесей данные галоидоуглеводороды располагаются в той же последовательности, что и метановоздушных. Однако для богатых смесей эта последовательность меняется на противоположную. Это говорит об отсутствии универсальности в огнегасительном действии галоидоуглеводородов. Поэтому выбор флегматизатора в аварийной обстановке следует вести с учетом конкретной газовой ситуации.

Полученные флегматизирующие концентрации метановодородовоздушных сред оказались выше огнегасительных при объемном пожаротушении. Следовательно, подавая в выработку тот или иной флегматизатор в количестве, достаточном для флегматизации взрыва, в ней одновременно создаются и условия, способствующие прекращению горения.

Установленные флегматизирующие концентрации хладона 114В2, бромистого этила и их смесей не превышают 7 %, что вписывается в ограничения, полученные в результате теоретических исследований, и говорит о возможности их транспортирования в воздушном потоке вентиляционного трубопровода.

4. Математическая модель диффузионно-фильтрационного движения газа в выработанных пространствах крутых пластов. При построении математической модели было выполнено обоснование перехода от пространственной к двумерной модели фильтрации газа в плоскости пласта и выполнен её критериальный анализ. Показано, что учёт сил плавучести, вклад которых сопоставим с вкладом градиента давления и силы сопротивления, может привести к сильному искажению картины течения. Поскольку при исследовании выработанных пространств разными авторами применяются три формы записи силы сопротивления в двучленном законе фильтрации, то была проведена проверка на выполнение условия инвариантности для всех трёх аналитических выражений вектора силы сопротивления относительно преобразования координат. Физически корректным оказалось только одно выражение, которое и было использовано в дальнейших исследованиях. В результате математическая модель диффузионно-фильтрационного движения смеси газов с учетом сил плавучести в выработанных пространствах крутых пластов описывается следующей системой уравнений

$$m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v) = q_1, \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) = -\frac{\partial P'}{\partial x} - \left[\frac{v}{k} + \frac{|V|}{l} \right] \rho u, \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) = -\frac{\partial P'}{\partial z} - \left[\frac{v}{k} + \frac{|V|}{l} \right] \rho v - (\rho - \rho_0) g \cdot \sin \alpha, \quad (4.3)$$

$$m \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_1) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_1 u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho C_1 v) = m \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho D \frac{\partial C_1}{\partial x} \right] + m \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho D \frac{\partial C_1}{\partial z} \right] + q_1, \quad (4.4)$$

$$P_0 = \rho R T_0 \sum_{j=1}^2 \frac{C_j}{M_j}, \quad \sum_{j=1}^2 C_j = 1, \quad (4.5)$$

де x - координата, направленная по простиранию пласта, м; z - координата, направленная по восстанию пласта, м; $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ - вектор скорости газа; u - скорость газа вдоль оси X , м/с; v - скорость газа вдоль оси Z , м/с; ρ - плотность газа, кг/м³; ρ_0 - исходная плотность смеси газов, кг/м³; P - давление газа, Па; P' - отклонение давления смеси газов от состояния гидростатического равновесия, Па; P_0 - атмосферное давление на дневной поверхности, Па; T_0 - температура газа, К; q_1 - интенсивность источников метановыделения в выработанном пространстве, кг/м³с; m - пористость выработанного пространства; D - коэффициент диффузии газа, м²/с; g - ускорение свободного падения, м/с²; R - универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль·К; C_j - концентрация j -газа ($j = 1$ - метан, 2 - воздух); M_j - молекулярная масса j -газа, кг/моль; α - угол падения пласта,

град; ν - коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$; l - коэффициент шероховатости, м ; k - коэффициент проницаемости пород, м^2 ; t - время, с

Область интегрирования $ABCPDEFKNMA$ системы уравнений (4.1) - (4.2) располагается в плоскости пласта и включает в себя выработанное пространство действующего участка $AQ_1EFKNMA$ и выработанные пространства вышележащих горизонтов $Q_1BCPDEQ_1$ вплоть до земной поверхности BC (рис. 4.1) начальный момент среда считается невозмущенной.

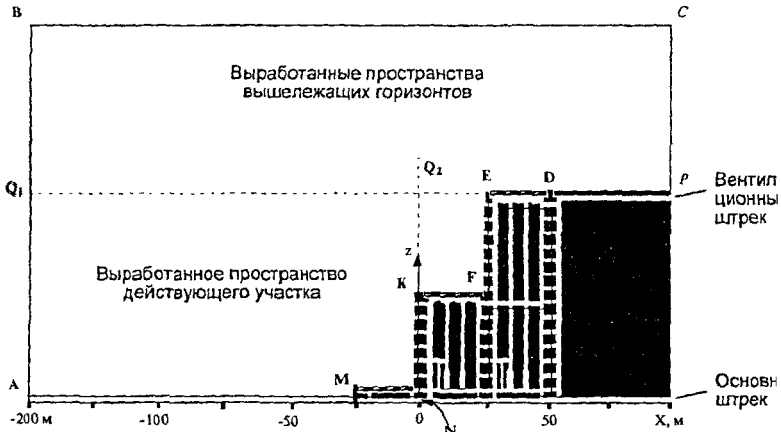


Рис. 4.1. Схема области счёта

На непроницаемых границах AB , CP , PD , EF , KN , MA выставляются граничные условия вида

$$\text{- на вертикальных: } \frac{\partial P'}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial C_1}{\partial n} = 0,$$

$$\text{- на горизонтальных: } \frac{\partial P'}{\partial n} = (\rho - \rho_0)g \sin \alpha, \quad \frac{\partial C_1}{\partial n} = 0,$$

где n - внешняя нормаль к границе.

На проницаемых границах BC , подготавливаемом к работе щите DE , р чем щите FK и отработанном щите NM для переменной P' задаются граничные условия первого рода, а для переменной C_1 равенство нулю её градиентов вытеснения газа из области счёта и условия первого рода при втекании.

Атмосферное давление на границе BC принято равным 0 Па. Расстояние между основным и вентиляционным штреками в плоскости пласта принимается высотой столба, тогда перепад давления по столбу $h_{ст}$ при расчётах будет равняться как разность давлений между точками N и D , т.е. $h_{ст} = P_{ст} - P_B$.

При проведении расчётов отработанный щит NM будет проницаем, изолирующая перемычка установлена в точке M и к щиту имеется доступ воздуха из проветриваемых выработок, и непроницаем, если он изолирован от действующих выработок перемычкой в точке N . Поступление воздуха в область счёта через проницаемые границы (отработанный, рабочий и подготовленный щиты) будем называть утечками, обратный процесс - притечками.

Методика численного решения системы уравнений строится на методах решения гидродинамических задач Патанкара и установления. Расчёт конвективных и диффузионных членов уравнений переноса производился по полиномиальной аппроксимации экспоненциальной схемы что снимает ограничения по точному числу Рейнольдса. Интегрирование уравнений переноса осуществлялось по методу Зейделя. Разработанная методика обеспечивает получение стационарного решения методом установления с дефектом массы, практически авным нулю (менее 0,005 %). Расчет поля давления, концентраций, плотности скорости фильтрации производится на неравномерной сетке со сгущением в произвольной части области расчета.

Тестирование математической модели и методики расчета обнаружило совпадение численных результатов с аналитическим решением с относительной погрешностью в определении полей давления не более 3,8 % на сетках 15×15 и 4 % на сетках 40×40. Проверка адекватности математической модели, выполненная путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными для ряда шахт Прокопьевско-Киселевского района Кузбасса, показала, что относительная погрешность в определении полей концентрации метана и притока воздуха в выработанное пространство не превышает 25 %.

5. Численное моделирование газодинамических процессов в выработанном пространстве щитового участка проводилось с использованием фильтрационных характеристик k и l , вычисляемых по формулам, предложенным ВостНИИ. Для определения интенсивности метановыделения $q_1 = q_1(x, z)$, ответственного за неоднородность газовой среды, была разработана методика, в основу которой положено осреднение величины q_1 , выполняемое для отдельных частей выработанного пространства. Выделение метана в этих частях вычислялось на основе Руководств по вентиляции шахт.

Картины течения, представленные на рис. 5.1, получены при перепаде давления по столбу $h_{ст} = 100$ Па и соответствуют двум различным газодинамическим ситуациям. В одном случае имеют место утечки через последний отработанный щит, в другом - утечки отсутствуют.

Учет метановыделения и, как его следствие, наличие сил плавучести качественно меняет картину течения. Выявлены следующие закономерности:

- линии тока не перпендикулярны изобарам;
- часть воздуха, поступающего через рабочий щит KF , стекает в зону ранее отработанных щитов со скоростями, попадающими в интервал пожароопасных;
- в наименее проветриваемой части выработанного пространства формируются области повышенного давления;
- метан скапливается в областях, примыкающих к областям с повышенным давлением, а также над рабочим щитом KF на уровне подготавливаемого щита DE ;
- в местах разворота потока формируются области с пониженными скоростями и застойные зоны со скоростями менее 1 мм/с, ограниченные замкнутыми изолиниями скоростей;

- в условиях уравненного давления между дневной поверхностью и вентиляционным участком, когда $P_{от} = P_{в} = 0$, ликвидировать нежелательный приток воздуха в выработанное пространство из-за наличия естественной тяги, порождаемой неоднородностью метановоздушной среды, не удаётся;
- прекратить утечки в выработанное пространство можно только при выполнении условия $P_{от} = P_{в} = q_1 = 0$.

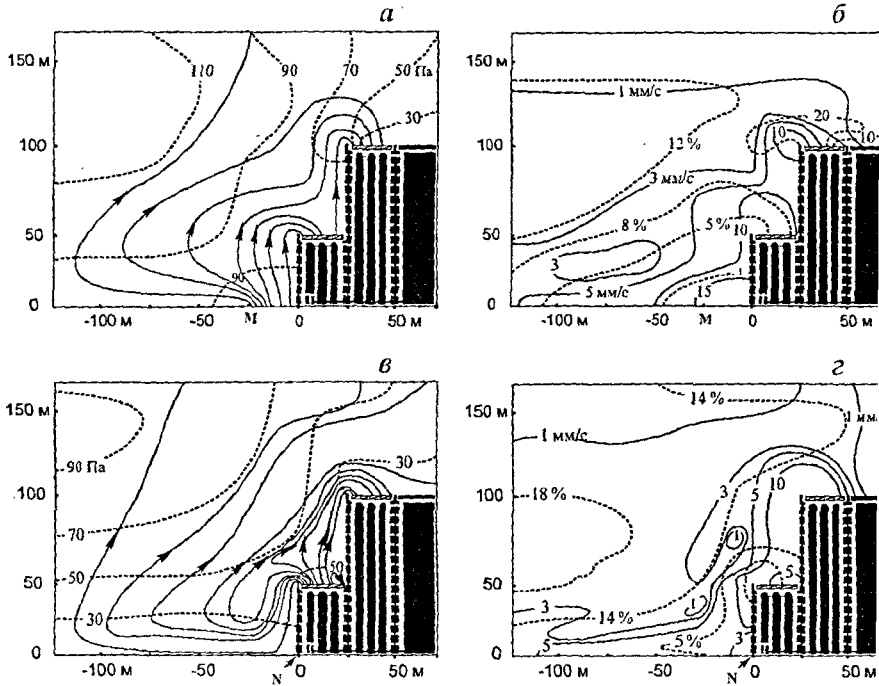


Рис. 5.1. Картины течения при $h_{ст} = 100$ Па:

а, б - перемычка в точке *М*; *в, г* - перемычка в точке *Н*;

а, в ———— - линии тока; - изобары;

б, г ———— - изолинии скорости; - изоконцентрации метана

Утечки практически не зависят от глубины опускания рабочего щита. Однако поток через него не является однонаправленным. По мере опускания рабочего щита с уплотнением пород над ним и уменьшением их проницаемости возрастает обратный поток притечек. Воздух, поступающий через щитовое перекрытие в выработанное пространство, разделяется. Одна его часть уходит в вентиляционных штрек и к дневной поверхности, а другая в виде притечек фильтруется обратно в призабойное пространство. Уплотнение пород над штритом приводит к уменьшению первой части потока и увеличению второй. При глубине опускания 0,65 от высоты столба половина воздуха, поступающего в выработанное пространство, обогатившись метаном возвращается. Поэтому

увеличением глубины опускания рабочего щита в забое могут создаваться ситуации опасные по газовому фактору.

Интенсивность метановыделения является фактором, способствующим увеличению утечек в выработанное пространство. Причем с уменьшением перепада по столбу, вклад этого фактора в формирование течек возрастает, о чем свидетельствует серия кривых на рис. 5.2. Здесь безразмерный параметр θ_1 представляет собой отношение утечек, рассчитанных с учетом метановыделения в выработанном пространстве, к утечкам, полученным при $q_1 = 0$. Во всех случаях неучет метановыделения приводит к занижению абсолютного значения течек, причем это занижение составляет менее 10 % при $h_{CT} > 100$ Па и более 20 % при $h_{CT} < 50$ Па.

С ростом интенсивности метановыделения (рис. 5.3) уменьшается доля газа, вытекающего из выработанного пространства через рабочий щит (кривая 1), и увеличивается вклад фильтрационных потоков, направленных к дневной поверхности (кривая 2) и на подготавливаемый щит (кривая 3).

В результате исследования зависимости утечек от основных параметров забоя удалось построить аппроксимационную формулу

$$Q_M = K_n \cdot S_\sigma \cdot H_{OT}^{-0.5} \cdot \left[a + b \frac{P_3}{h_{CT}} \right] \cdot h_{CT}^n \cdot \left[\frac{d_1}{h_{CT}} \cdot q_1 + 1 \right] d_2 \exp(-d_3 \cdot h_{CT}) \quad (5.1)$$

где Q_M – утечки в выработанное пространство, м³/мин; S_σ – площадь щитового перекрытия, м²; H_{OT} – глубина отработки; P_3 – давление в забое; K_n – коэффициент, зависящий от положения перемычки ($K_n = 23,4$ м³/мин Паⁿ при наличии перемычки в точке М; $K_n = 18,7$ м³/мин Паⁿ – в точке N); $d_1 = 1,2 \cdot 10^6$ Па·м³с/кг; $d_2 = 0,562$; $d_3 = 10^{-2}$ Па⁻¹; a , b и n – соответственно коэффициенты и показатель степени, зависящие от свойств вмещающих пород.

Формула (5.1) работает при $h_{CT} > 1$ Па и $H_{OT} > 100$ м и учитывает влияние целого ряда факторов, оказывающих воздействие на величину утечек: аэродинамическую связь с дневной поверхностью, мощность обрабатываемого пласта, интенсивность метановыделения в выработанном пространстве, глубину отработки, положение перемычки, физические свойства вмещающих пород и перепад давления по столбу. Сравнение величины утечек, определенных по формуле (5.1), с данными экспериментов, выполненное для трех типов пород в условиях II и III горизонтов, показало удовлетворительное совпадение результатов.

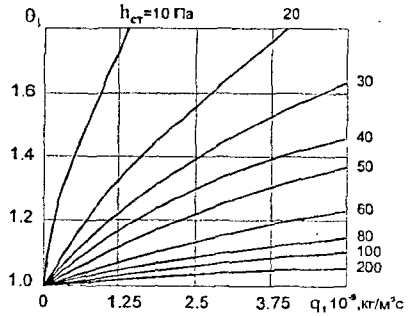


Рис. 5.2. Зависимость безразмерного параметра θ_1 от q_1 и h_{CT}

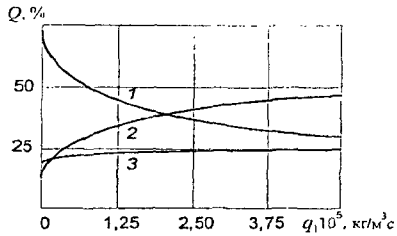


Рис. 5.3. Зависимость процентного распределения потоков

6. Потенциально взрывоопасные области в выработанном пространстве щитового участка. Учет метановыделения в выработанном пространстве, заложенный в математическую модель (4.1) - (4.6), позволяет выявить закономерности формирования потенциально взрывоопасных областей. Для этого все выработанное пространство, заполненное метановоздушной смесью, делится по уровню объемной концентрации метана C_1 с учетом нижнего и верхнего пределов взрываемости метана в воздухе на три области. При $C_1 < 5\%$ имеем область 1-го типа, при $5\% \leq C_1 < 15\%$ - область 2-го типа, при $C_1 \geq 15\%$ - область 3-го типа. При таком способе разбиения область 2-го типа представляет собой потенциально взрывоопасную.

Расчеты, проведенные в интервале изменения параметра q_1 от $1,25 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³с (рис. 6.1), показали, что при наличии перемычки в точке N область 1-го типа оттесняет взрывоопасную область от рабочего щита в глубь выработанного пространства, а при наличии перемычки в точке M имеет место ее прикрытие к рабочему щиту.

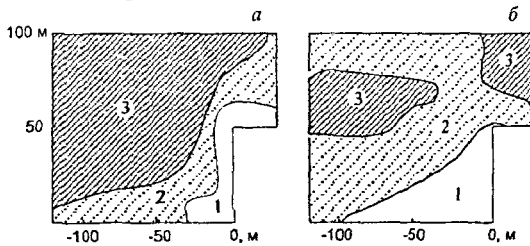


Рис. 6.1. Расположение областей 1, 2 и 3-го типа в условиях среднеустойчивых вмещающих пород при $q_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³с: а - перемычка в точке M ; б - перемычка в точке N

Представляя размер областей χ_i как долю площади выработанного пространства, приходящуюся на область данного типа, получено, что зависимости $\chi_1 = f_1(q_1)$ и $\chi_3 = f_3(q_1)$ носят монотонный характер (рис. 6.2, а), причем первая имеет характер монотонного убывания, а вторая - возрастания. Зависимость $\chi_2 = f_2(q_1)$ немонотонна. Её максимум смещается с ростом перепада давления $h_{ст}$ в сторону больших значений параметра q_1 .

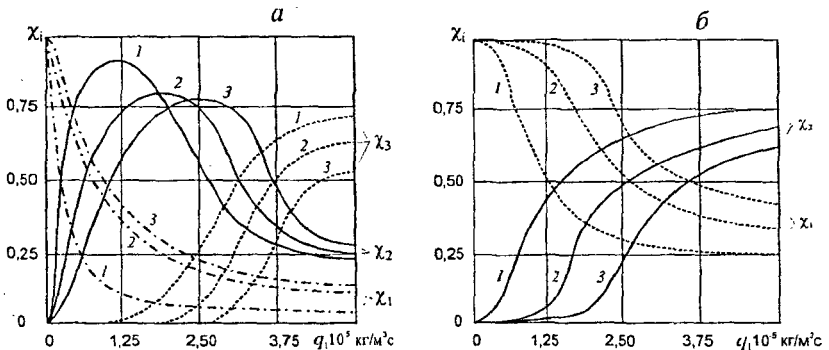


Рис. 6.2. Зависимость параметра χ_i от интенсивности метановыделения: а - среднеустойчивые вмещающие породы; б - устойчивые вмещающие породы. 1 - $h_{ст} = 0$, 2 - $h_{ст} = 50$, 3 - $h_{ст} = 100$ Па

Характер влияния перепада давления по столбу на величину χ_2 зависит от интенсивности метановыделения в выработанном пространстве. Для среднеустойчивых и неустойчивых вмещающих пород при $q_1 < 1,25 \cdot 10^{-5}$ рост параметра $h_{ст}$, способствующий улучшению проветривания выработанного пространства, вызывает уменьшение χ_2 в связи с ростом χ_1 . При $q_1 > 3,75 \cdot 10^{-5}$ улучшение проветривания, наоборот, ведет к увеличению χ_2 в силу уменьшения χ_3 .

Качественно иная ситуация складывается в условиях устойчивых вмещающих пород, где при изменении параметра q_1 в указанном выше диапазоне область 3-го типа не наблюдается. Это меняет характер зависимостей χ_2 от q_1 и $h_{ст}$, которые в этих условиях ведут себя как монотонно возрастающие (рис. 6.2,б).

Проведенное исследование показало, что размеры потенциально взрывоопасных областей сложным образом зависят от входных параметров задачи. При этом можно выделить два основных фактора, совместное влияние которых определяет величину χ_2 , это интенсивность метановыделения и утечки в выработанное пространство. На их основе был построен симплекс ξ , равный отношению дебита метана в зоне интенсивного дробления к утечкам в выработанное пространство, позволяющий проводить оценки размеров потенциально взрывоопасных областей: $\chi_2 < 0,1$ при $\xi < 0,005$, и $\chi_2 \geq 0,5$ при $0,025 \leq \xi \leq 0,043$.

7. Активное управление газодинамической ситуацией в выработанном пространстве. Применяемые в настоящее время способы борьбы с эндогенными пожарами нарушают состояние равновесия в очаге горения, не позволяют регулировать параметры фильтрующегося газа, а только сокращают утечки воздуха, приводя к частичной инертизации атмосферы пожарными газами и метаном. В данной главе сформулирован принцип активного управления газодинамической ситуацией в выработанном пространстве, который заключается в формировании в выработанном пространстве с помощью пенных завес, азотоподающих и газоотсасывающих скважин искусственных потоков газа с регулируемыми параметрами. Эти элементы управления дают возможность эффективно воздействовать на очаг эндогенного пожара и даже управлять им, регулируя поступление кислорода воздуха в зону горения и теплоотвод. С помощью таких «газодинамических рычагов» можно перемещать очаг пожара в необходимом направлении, фиксировать его в определённой точке, поддерживать необходимую интенсивность горения или снижать её.

Для осуществления численного моделирования управления газодинамикой выработанного пространства система уравнений (4.1) - (4.6) дополняется уравнением переноса концентрации азота C_3 . Это уравнение аналогично уравнению (4.4), взятому с источниковым членом, равным нулю. Пенные завесы моделируются в виде прямоугольных областей с непроницаемыми границами, дегазационные скважины - заданием давлений, которые в соответствии с их характером являются пониженными, азотоподающие скважины - расходом.

Результаты расчётов показали:

- наличие пенной завесы приводит к повышению давления в области, расположенной между нею и рабочим щитом при нагнетательном способе про-

ветривания, и при расстояниях между рабочим щитом и пенной завесой, меньших её максимального размера, утечки в выработанное пространство сокращаются более чем на 30 %;

- пенная завеса разделяет поток утечек на две части с образованием застойной зоны и области низких скоростей между ними;
- перераспределяя фильтрационный поток пенная завеса увеличивает проветривание других частей выработанного пространства;
- совместное применение пенных завес и газоотсасывающих скважин позволяет полностью блокировать утечки воздуха в глубь выработанного пространства;
- газоотсасывающие скважины изменяют градиент давления в зоне своего влияния в сторону его увеличения и повышают в этой зоне скорости фильтрации воздуха.

Эффективность подачи азота по скважине зависит от целого ряда трудноучитываемых факторов, среди которых основными являются интенсивность и направление фильтрационного потока в точке ввода азота. Именно эти факторы, а также расход азота определяют величину и конфигурацию инертизируемой области, в которой относительная концентрация $C_3 \geq 0,9$. Кроме того, могут иметь место ситуации, при которых отсутствует возможность подачи азота непосредственно в область выработанного пространства, подлежащую инертизации, а скважина, пробуренная поблизости, не обеспечивает нужного эффекта, так как азот сносится в нежелательном направлении. В этом случае можно использовать пенные завесы и газоотсасывающие скважины как средства, обеспечивающие изменение направления фильтрационного потока и регулирующие его интенсивность. На рис. 7.1 отражена ситуация, когда пенная завеса создает перераспределение фильтрационного потока таким образом, чтобы обеспечить инертизацию области, расположенной в стороне от азотоподающей скважины с расходом 60 м³/мин. Газоотсасывающая скважина блокирует утечки, направленные в сторону инертизируемой области и работает на понижение скоростей в её окрестности, уменьшая тем самым вынос из неё азота и увеличивая её объем в 1,8 раза.

Таким образом, алгоритм активного воздействия на недоступную часть выработанного пространства, содержащую объект повышенной опасности, заключается в следующем:

- пробуравив азотоподающую скважину вдали от инертизируемой области и используя фильтрационный поток в качестве несущей фазы, можно дистанционно транспортировать азот в требуемую область выработанного пространства. Направить фильтрационный поток в требуемую область выработанного пространства можно с помощью пенной завесы;
- с помощью газоотсасывающей скважины можно блокировать фильтрационный поток и свести до минимума проветривание заданной области выработанного пространства, в которую подается азот. Вынос азота фильтрационным потоком из этой области будет минимальным, а расход азота для инертизации резко сократится.

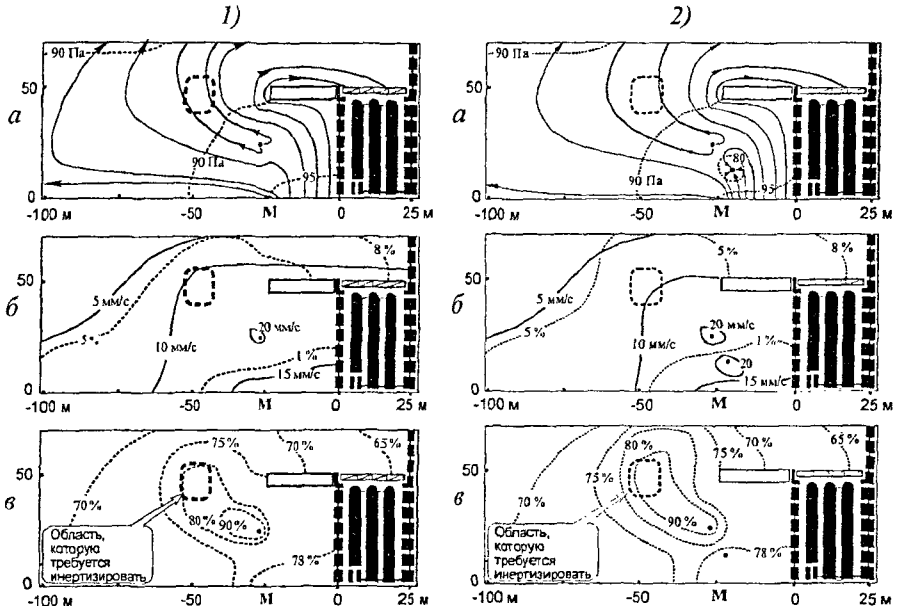


Рис. 7.1. Управление фильтрационным потоком, $h_{ст} = 100$ Па: 1 – пенная завеса и азотоподающая скважина; 2 – пенная завеса, азотоподающая и газоотсасывающая скважины; а — линии тока; ----- изобары; б — изолинии скорости; ----- изоконцентрации метана; в ----- изоконцентрации азота

Любому сложному воздействию на фильтрационное поле обязательно должен предшествовать численный расчёт конкретной газодинамической ситуации с учетом максимального числа факторов, влияющих на неё. Поэтому было исследовано каким образом и в какой степени влияет на газодинамическую ситуацию в выработанном пространстве очаг эндогенного пожара. Для этого система уравнений (4.1) – (4.6) была дополнена уравнением переноса тепла для газовой и уравнением теплопроводности для твердой фазы (пористого породного скелета).

$$m \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v c_p T) = m \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + m \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \alpha_T S (T_C - T), \quad (7.1)$$

$$c_c \rho_c (1-m) \frac{\partial T_C}{\partial t} = (1-m) \cdot \lambda_c \left(\frac{\partial^2 T_C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_C}{\partial z^2} \right) + \alpha_T S (T - T_C), \quad (7.2)$$

где T , T_C – соответственно температура газа и скелета, К; c_p , c_c – соответственно теплоёмкость газа и скелета, Дж/кг; $S = 4m/d_{cp}$ – удельная поверхность кусков, составляющих скелет, 1/м; d_{cp} – средний диаметр кусков, м; λ , λ_c – соответственно коэффициент теплопроводности газа и скелета, Вт/кг; α_T – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; ρ_c – плотность скелета, кг/м³.

Исследование проводилось на примере гидродобычного участка. Область интегрирования, ограниченная многоугольником $ABCDEFK$, совпадающая с выработанным пространством гидроучастка в плоскости падения пласта, приведена на рис. 7.2. Границы AB , CD , ED , AK непроницаемы. Границы гидромониторной камеры KF и FE , а также граница с дневной поверхностью BC проницаемы.

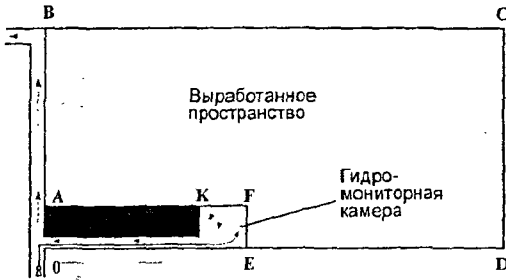


Рис. 7.2. Схема области интегрирования для гидроучастка

Граничные условия для температуры скелета на всех границах и для температуры газа на непроницаемых границах ставились в виде условий первого рода. На проницаемых границах граничные условия для температуры газа определялись в виде, аналогичном граничным условиям, которые налагались на концентрации.

Очаг эндогенного пожара моделировался в виде области с повышенной температурой породного скелета $T_c = 750$ К. Расчетная сетка строилась со сгущением в окрестности очага. Расчеты показали, что вклад механизма теплопроводности в прогрев породного скелета существенно меньше вклада теплоотдачи газа, прошедшего через очаг пожара. Это подтверждается видом изотерм на рис. 7.3, форма которых близка к эллипсоидальной, причем главная ось эллипсов вытянута вдоль направления потока, а очаг пожара расположен в окрестности нижнего фокуса. Сравнение изотерм породного скелета и изотерм газа указывает на существенное отличие температур твердой и газовой фазы, что является подтверждением

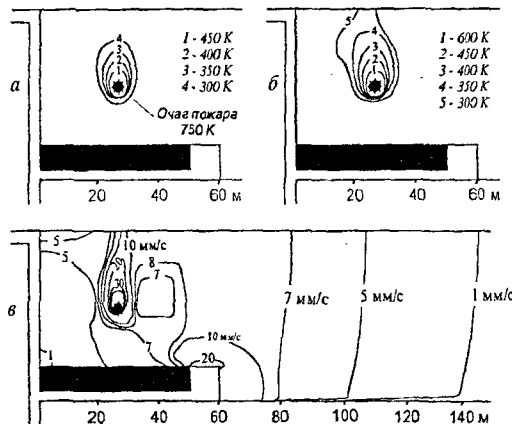


Рис. 7.3. Газодинамическая ситуация при наличии очага эндогенного пожара: а - изотермы скелета; б - изотермы газа; в - изолинии скорости

необходимости решения поставленной задачи в рамках двухтемпературной математической модели.

Наложение очага пожара на поле течения ведёт к перераспределению давления в области повышенных температур в сторону его понижения. Линии тока искривляются и проходят через зону пониженного давления. Из рис. 7.3, в видно сильное изменение поля скоростей в зоне очага пожара. Проходя через очаг эндогенного пожара, газ прогревается, его скорость резко возрастает (под воздействием сил пла-

вучести, порождаемых уменьшением плотности газа в силу его прогрева) и снижается только после его остывания. Восходящий от очага пожара поток прогретого газа притормаживает набегающий на него фильтрационный поток воздуха, о чём свидетельствует расположенная справа от него область пониженных скоростей фильтрации.

Таким образом, воздействие эндогенного пожара на фильтрационное течение является локальным и обнаруживает себя лишь при учёте сил плавучести. Очаг пожара в наибольшей степени изменяет характеристики фильтрационного потока, протекающего через него к дневной поверхности, почти не меняя при этом интенсивности набегающего потока. При температуре очага $T_C \leq 750$ К его наличие практически не влияет на величину утечек из гидромониторной камеры, так как при расстояниях между ней и очагом больших 30 м, увеличение утечек не превышает 5 %.

Результат управления газодинамической ситуацией, складывающейся в окрестности очага эндогенного пожара, с помощью одной азотоподающей и двух газоотсасывающих скважин на показан на рис. 7.4. Можно отметить следующие закономерности:

1. Азотоподающая скважина притормаживает набегающий на неё фильтрационный поток и повышает давление в зоне своего влияния. Скважина инертизирует пространство в районе очага пожара. Однако область максимальных концентраций несколько смещена за пределы очага пожара набегающим справа фильтрационным потоком. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении места заложения скважины.

2. Газоотсасывающие скважины понижают давление в зоне своего влияния и отсасывают часть газов, проходящих через очаг пожара. Газоотсасывающие скважины в данной ситуации увеличивают область повышенных скоростей в промежутке между очагом пожара и скважинами и уменьшают скорости течения в вышележащей области. Кроме того, они увеличивают инертизируемую область.

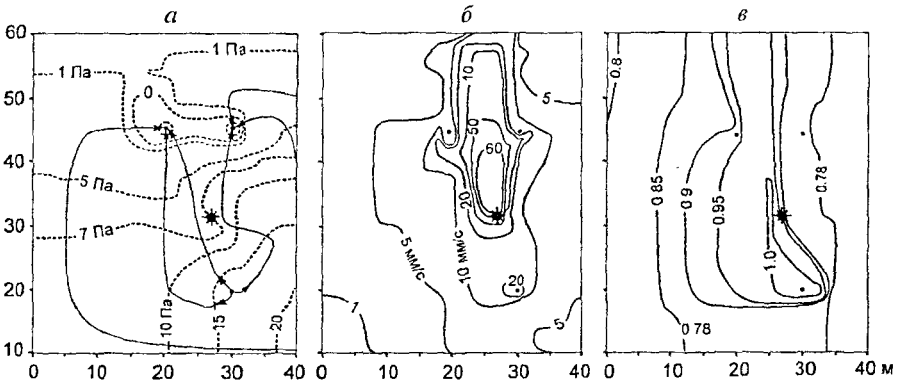


Рис. 7.4. Поле течения вблизи очага пожара с азотоподающей и двумя газоотсасывающими скважинами: а – поле изобар и линий тока; б – изолинии скорости; в – изоконцентрации азота. $Q_{СКВ} = 60$ м³/мин, $P_{СКВ} = -10$ Па

8. Моделирование процесса распространения ударных волн по сети горных выработок. Угольная шахта представляет собой сложную разветвленную сеть горных выработок большой протяженности. Взрыв в любой из выработок всегда приводит к формированию воздушных ударных волн, которые распространяются по горным выработкам, претерпевают многократные отражения в местах поворотов при изменении направления своего движения и сложным образом взаимодействуют друг с другом. В данной главе предложен газодинамический подход и методика расчёта распространения ударных волн по горным выработкам, позволяющие анализировать динамическую ситуацию в различных их точках и определять зоны, которые безопасны для пребывания людей и размещения горноспасательного оборудования.

Сеть горных выработок угольной шахты представляет собой систему каналов известного поперечного сечения, которые можно разбить на N прямолинейных участков. Тогда концы участков будут сопрягаться с зонами изменения конфигурации горных выработок. Эти зоны могут быть трех типов: 1) тупик; 2) выход на поверхность; 3) ветвление канала, поворот, изменение площади сечения.

Прямолинейные участки выработок. Для расчета газодинамического течения и распространения воздушной ударной волны в прямолинейных каналах постоянного поперечного сечения будем использовать одномерные уравнения газовой динамики, где в правых частях учитываются процессы силового и теплового взаимодействия газового потока со стенками канала

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u S) = 0, \quad (8.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_b S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_b u S) = 0, \quad (8.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho u^2 + p)S] = -\tau_{мр} \Pi, \quad (8.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E S) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho E u + p u)S] = q \Pi, \quad (8.4)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2}{2}, \quad p = \rho R T, \quad (8.5)$$

где t – время; x – координата; ρ – плотность; p – давление; ρ_b – плотность продуктов взрыва; T – температура; R – газовая постоянная; u – скорость; E – полная энергия; S – площадь поперечного сечения канала; Π – периметр канала; $\tau_{мр}$ – сила трения о стенки канала; q – тепловой поток в стенки канала.

Силовое и тепловое взаимодействие потока газа со стенками. Для турбулентного течения газа в канале будем использовать эмпирические зависимости для определения сил трения потока о стенки и теплового потока в стенки:

$$\tau_{мр} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}, \quad Re = \frac{\rho u D_{экв}}{\mu}, \quad D_{экв} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (8.6)$$

где c_f – коэффициент сопротивления; Re – число Рейнольдса; $D_{экв}$ – эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка канала; μ – коэффициент динамической вязкости.

При определении теплового потока для коэффициента теплообмена использовалась критериальная зависимость:

$$\text{Nu} = 0,022 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,47} B, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c}{\lambda_g}, \quad \text{Nu} = \frac{\alpha D_{экв}}{\lambda_g},$$

$$B = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{opt}}{(l/\delta)}\right), & \frac{l}{\delta} > \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \\ \exp\left(\frac{(l/\delta)}{(l/\delta)_{opt}}\right), & \frac{l}{\delta} < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} \end{cases} \quad \left(\frac{l}{\delta}\right)_{opt} = 13, \quad (8.7)$$

де Nu - число Нуссельта; Pr - число Прандтля; λ_g - коэффициент теплопроводности; α - коэффициент теплообмена; c - теплоемкость; B - поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена; l - характерное расстояние между выступами шероховатости; δ - характерная величина выступа шероховатости.

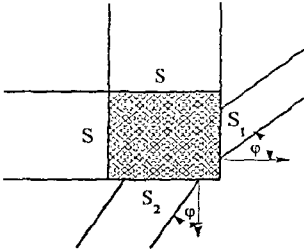


рис. 8.1. Типичная зона изменения конфигурации и сечения каналов

Зоны изменения сечения и ветвления каналов.

В этих зонах (рис. 8.1) сходятся каналы различного сечения и под различными углами и одномерный подход для моделирования течения является недостаточным. Поэтому будем предполагать эту зону плоской а течение газа описывать уравнениями газовой динамики с двумя пространственными переменными (трением и теплообменом на участках стенок пренебрегаем из-за их малости):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0, \quad (8.8)$$

$$\frac{\partial \rho b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_b u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_b v) = 0 \quad (8.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = 0, \quad (8.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p) = 0, \quad (8.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho E u + p u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho E v + p v) = 0, \quad (8.12)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2}{2}, \quad p = \rho R T, \quad (8.13)$$

де u - скорость вдоль оси x ; v - скорость вдоль оси y .

Начальные условия. В качестве начальных условий для систем уравнений 8.1) - (8.5) и (8.8) - (8.13) берутся значения давления, температуры и скорости газа как функции длины каналов в некоторый фиксированный момент времени, принимаемый за начало отсчета (момент взрыва). Из-за незнания реальных параметров взрыва в качестве начальных условий используются параметры, опре-

деляемые из термодинамических расчётов для продуктов сгорания метановоздушной смеси стехиометрического состава. Полагая, что протяжённость взрывоопасных зон в горных выработках известна, в них задаются давление, температура и плотность продуктов взрыва, а в остальных координатах – параметры газа, соответствующих нормальным условиям в шахте.

Граничные условия для уравнений (8.1) - (8.4) ставятся в зависимости от типа области изменения конфигурации и сечения горной выработки, с которой канал граничит. Если граница канала – тупик, то используется условие непротекания:

$$u_{гp}^{\downarrow} = 0. \quad (8.14)$$

Если канал выходит на поверхность земли, то на этой границе предполагается постоянство давления и плотности:

$$p_{гp}^{\downarrow} = p_{атм}, \quad \rho_{гp}^{\downarrow} = \rho_{атм}. \quad (8.15)$$

Если канал граничит с зоной ветвления, то в качестве граничных условий используются значения потоков массы, импульса и энергии, определяемые из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа в соответствии:

$$M_{гp}^{\downarrow} = M(t), \quad I_{гp}^{\downarrow} = I(t), \quad E_{гp}^{\downarrow} = E(t). \quad (8.16)$$

Для системы уравнений (8.8) - (8.13) используются условия на границах зоны в виде (8.16), если на соответствующей стороне есть примыкающий канал; если нет - используется условие непротекания (8.14) на соответствующей стороне зоны.

Метод и методика численного решения. Для решения систем уравнений (8.1) - (8.5) и (8.8) - (8.13) применяется метод С.К. Годунова, основанный на использовании решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа для определения потоков массы, импульса и энергии на границах расчётных ячеек. Для расчёта параметров течения в «двумерной зоне» используется метод С.К. Годунова для двумерных уравнений газовой динамики. В случае, если из ячейки «двумерной зоны» выходят каналы отличающегося сечения от площади боковой поверхности «двумерной зоны», то для расчёта потоков массы, импульса и энергии используется процедура расчёта распада произвольного разрыва параметров газа на скачке сечения канала.

На основе системы уравнений с соответствующими краевыми условиями (8.1) - (8.16) разработана программа расчёта течения газа в системе горных выработок шахты. Выработки могут смыкаться друг с другом под различными углами в количестве двух, трёх или четырёх соединяющихся каналов. То есть в основу положена точная пространственная топология горных выработок.

Тестирование программы и отдельных её блоков проводилось на выполнимость законов сохранения массы и полной энергии и на решении ряда модельных задач (расчёт на установление давления, расчёт в симметричных конфигурациях расположения каналов и т.д.) Проведённые тесты показали выполнимость законов сохранения массы и полной энергии при расчёте течения в N ка-

галах (при отсутствии теплообмена и потерь энергии на трение) и непротиворечивость получаемых результатов при решении модельных задач.

Для сравнения газодинамической методики с официально действующей¹ было проведено: 1) исследование ослабления ударной волны на 13 типах изменениях конфигурации горных выработок; 2) сравнение затухания ударной волны на конкретной последовательности соединения горных выработок.

Выяснилось, что используемая двумерная ячейка при расчёте параметров течения в местах сопряжения горных выработок в большинстве случаев даёт допустимое совпадение с экспериментальными данными за исключением конфигураций 6 – 8, 10 – 13 (табл. 8.1).

Наблюдается следующая закономерность: если расчёт ведётся для ударной волны, двигающейся в прямом направлении мимо бокового сопряжения с другой выработкой (конфигурации 6 – 8, 10), то расхождения наблюдаются при $S/F > 1$. Если же расчёт ведётся для ударной волны, пришедшей из боковой выработки и изменившей направление движения (конфигурации 11 – 13), то расхождения наблюдаются при $S/F < 1$.

Отмеченное расхождение в результатах объясняется очень сложным характером течения на таких конфигурациях. В практическом плане эти расхождения могут быть сняты путём введения поправок к давлению с учётом законов сохранения. Однако при этом не будут выяснены причины расхождения. В действительности, из-за импульсного характера сложной системы пространственных ударных волн в сопряжениях выработок экспериментальные результаты не всегда могут вызывать доверие. Тем более, что эти результаты получены в условиях рудников при взрывах промышленных ВВ, при которых амплитуды и длины образующихся ударных волн сильно отличаются от аналогичных параметров при взрывах газовых смесей в угольных шахтах. С другой стороны, в силу пространственной структуры газодинамических процессов в окрестности сопряжения использованное в газодинамическом подходе приближение может привести к ошибкам в расчётах. Поэтому имеет смысл в будущем провести в рассматриваемых областях численные исследования на более мелкой сетке. Поскольку в этих областях газовая динамика процесса является определяющим фактором, можно надеяться, что полученные на мелкой сетке результаты будут ближе к действительности, чем данные экспериментальных замеров.

Сравнение затухания ударной волны на конкретной последовательности соединения горных выработок показало, что при отсутствии волнового характера взаимодействия распространяющихся ударных волн наблюдается хорошее совпадение результатов расчётов по обоим методикам. Однако учёт в официальной методике возможного одновременного прихода ударных волн в одну сопряжения двух выработок приводит к большим погрешностям в определении взрывобезопасного расстояния.

¹ Устав воензированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. – М., 1997. – 201 с.

Таблица 8.1

Сравнение расчётных и экспериментальных коэффициентов затекания ударных волн при проходе ими местных сопротивлений

$\delta = S/F$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,2	1,24 1,33	1,41 1,24	0,72 0,69	0,47 0,46	0,43 0,367	0,93 0,94	0,95 0,96	0,96 0,97	0,39 0,43	0,92 0,92	0,52 0,34	0,55 1,18	0,58 0,86
0,4	1,05 1,18	1,32 1,17	0,63 0,62	0,39 0,43	0,38 0,34	0,87 0,88	0,92 0,92	0,92 0,94	0,29 0,34	0,87 0,83	0,46 0,32	0,52 0,90	0,56 0,81
0,6	0,89 1,03	1,22 1,12	0,55 0,543	0,33 0,40	0,34 0,31	0,83 0,82	0,89 0,87	0,89 0,91	0,23 0,28	0,85 0,76	0,41 0,30	0,48 0,79	0,53 0,78
0,8	0,77 0,90	1,11 1,06	0,48 0,473	0,28 0,34	0,30 0,28	0,80 0,76	0,88 0,83	0,87 0,87	0,19 0,24	0,83 0,68	0,36 0,29	0,45 0,65	0,50 0,74
1,0	0,67 0,80	1,00 1,00	0,42 0,40	0,25 0,30	0,27 0,25	0,79 0,73	0,86 0,80	0,85 0,835	0,16 0,20	0,82 0,60	0,31 0,27	0,41 0,51	0,47 0,70
1,25	0,57 0,70	0,89 0,88	0,36 0,35	0,21 0,263	0,243 0,22	0,77 0,62	0,85 0,70	0,84 0,73	0,13 0,18	0,81 0,52	0,27 0,24	0,38 0,48	0,43 0,61
1,67	0,47 0,57	0,67 0,70	0,29 0,28	0,17 0,21	0,207 0,177	0,76 0,51	0,84 0,56	0,81 0,59	0,105 0,14	0,80 0,42	0,22 0,19	0,34 0,39	0,40 0,49
2,5	0,32 0,48	0,46 0,52	0,21 0,207	0,13 0,157	0,165 0,13	0,75 0,38	0,82 0,42	0,78 0,43	0,07 0,10	0,78 0,31	0,14 0,13	0,24 0,30	0,31 0,36
5,0	0,17 0,30	0,24 0,30	0,12 0,12	0,07 0,09	0,102 0,077	0,75 0,21	0,79 0,24	0,75 0,25	0,04 0,06	0,76 0,18	0,074 0,08	0,13 0,16	0,16 0,20

Предлагаемый газодинамический подход изменяет традиционный порядок расчёта затухания ударной волны с помощью калькулятора и специальных программ. Он учитывает пространственную топологию сети горных выработок, позволяет рассчитывать распространение ударных волн сразу по всем возможным направлениям и предоставляется возможность получения информации по любому рассчитываемому параметру в любой точке выработки в любой момент времени.

В отличие от официальной методики газодинамический подход учитывает: а) возможный одновременный приход ударных волн в места сопряжения выработок; б) взаимодействие ударных волн друг с другом; в) наличие тупиковых выработок, из которых выходит отражённая ударная волна и способная догнать оловную ударную волну; г) наличие волн разрежения.

Расчёты показали, что после отрыва от продуктов взрыва интенсивность ударной волны быстро снижается, скорость её движения становится дозвуковой. По горным выработкам распространяется уже затухающая волна сжатия. При этом необходимо учитывать, что:

- повороты и сопряжения выработок являются возмущающими факторами, источником встречных и догоняющих волн, сложным образом взаимодействующих друг с другом;

- возможные ситуации, когда давление усиливается как по ходу распространения ударной волны, так и с течением времени в отдельных точках горных выработок;

- слабая волна сжатия, давление которой упало ниже опасного для человека предела (1,09 атм), распространяясь по выработке может отразиться от встречной преграды или встретиться с такой же очень слабой волной. В результате такого взаимодействия возможно образование уже в другой выработке волны сжатия, превышающим безопасный предел 1,09 атм;

- зона безопасного нахождения людей может иметь разрывный характер и отдельные её участки могут находиться в самых неожиданных местах, определяемых условиями взрыва и пространственной топологией сети горных выработок.

Распространяясь от первоначального очага воспламенения, ударная волна по ходу своего движения может подойти к другому локальному скоплению метана и взорвать его. Поскольку при подходе к удалённому скоплению взрывчатой смеси ударная волна теряет свою первоначальную интенсивность и уже не способна за счёт ударного сжатия воспламенить эту среду, то воспламенение может произойти, например, за счёт электрической дуги при обрыве силового кабеля или фрикционной искры при соударении стальных металлоконструкций. Математическая модель такого процесса строится на основе уравнений (8.1) - (8.5), причём в зонах локального скопления метана (загазованности), в случае его воспламенения, в правой части уравнения энергии учитывается тепловыделение от горения:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho ES) + \frac{\partial}{\partial x} [(\rho Eu + pu)S] = Q\rho S U_{гор}g(x), \quad (8.17)$$

где Q - теплота сгорания единицы массы метановоздушной смеси заданной концентрации, $g(x)$ - П-образная функция:

$$g(x) = \eta(x - x_0) \eta(x_1 - x), \quad \eta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & x \geq 0, \end{cases} \quad (8.18)$$

где x_0 и x_1 - координаты начала и конца зоны загазованности, которые определяются из уравнений:

$$\frac{dx_0}{dt} = U_{\text{гор}} + u(x_0), \quad \frac{dx_1}{dt} = u(x_1), \quad (8.19)$$

$$U_{\text{гор}} = U_H \delta(x_0), \quad \delta(x_0) = \begin{cases} 1, & x = x_0, \\ 0, & x \neq x_0, \end{cases} \quad (8.20)$$

где U_H - скорость нормального распространения пламени.

На рис 8.2 приведены результаты расчёта распространения ударной волны по прямой выработке длиной 800 м с площадью поперечного сечения 10 м^2 . В начале выработки произошёл взрыв метановоздушной смеси и сформировалась зона повышенного давления длиной 50 м. На расстоянии 400 м от начала выработки находится зона скопления метановоздушной смеси стехиометрической концентрации длиной 50 м. В момент когда волна сжатия, распространяющаяся по горной выработке от места взрыва, доходит до границы этой зоны, происходит воспламенение метановоздушной смеси.

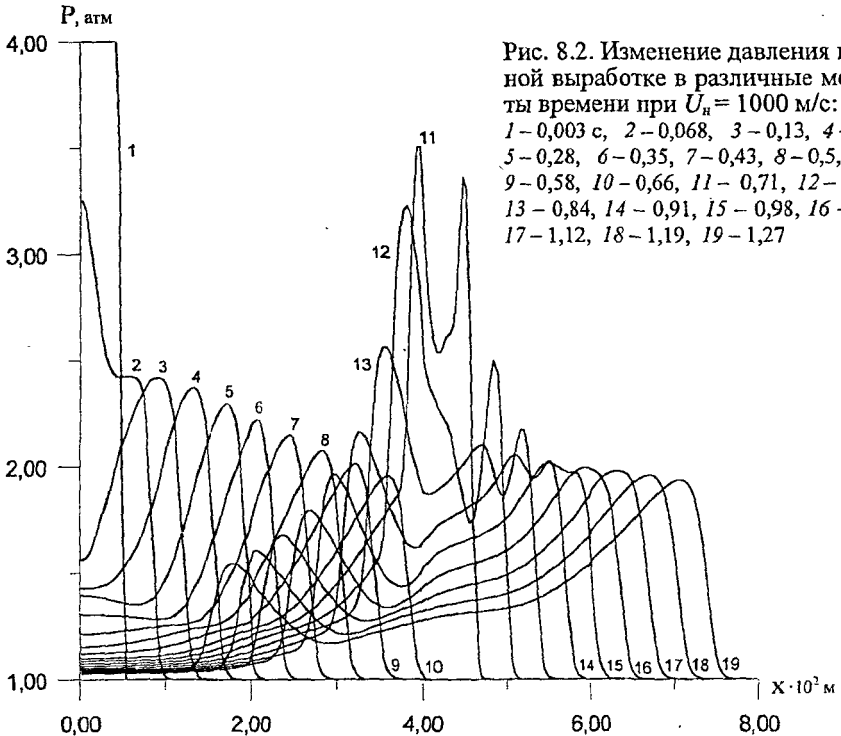


Рис. 8.2. Изменение давления в горной выработке в различные моменты времени при $U_H = 1000 \text{ м/с}$:

1 - 0,003 с, 2 - 0,068, 3 - 0,13, 4 - 0,21, 5 - 0,28, 6 - 0,35, 7 - 0,43, 8 - 0,5, 9 - 0,58, 10 - 0,66, 11 - 0,71, 12 - 0,78, 13 - 0,84, 14 - 0,91, 15 - 0,98, 16 - 1,05, 17 - 1,12, 18 - 1,19, 19 - 1,27

Из рис. 8.2 видно, что от места первоначального взрыва по выработке распространяется ударная волна, интенсивность которой постепенно падает (кривые 1-10). В момент прихода ее на границу зоны загазованности происходит воспламенение и давление в волне начинает повышаться за счет тепловыделения от горения метановоздушной смеси. Смесь быстро сгорает и в этой области наблюдается достаточно большой всплеск давления, имеющий "двугорбый" вид (кривая 11). За счет движения газа зона загазованности смещается вдоль выработки и к моменту её сгорания правая граница x_1 сдвигается на расстояние Δm . После завершения процесса горения формируется двухволновая структура распределения давления, распространяющаяся в противоположные стороны, интенсивность которой уменьшается по мере её движения по негорящему газу (кривые 12, 13, 14, ..., 19).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложены и научно обоснованы новые технические решения по активному воздействию на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение безопасности горноспасательных работ при ликвидации сложных подземных аварий.

Основные научные результаты, выводы и практические рекомендации изложены в следующем:

1. Предложен принципиально новый дистанционный способ тушения пожаров и предотвращения взрывов в подготовительных выработках и устройство для его осуществления (А.с. 863881, 964185, 1059210, 1245714, 1270366, 161350). Способ позволяет с безопасного расстояния быстро подавлять плазменное горение в очаге пожара и флегматизировать атмосферу подготовительной выработки без изменения концентрации кислорода, что обеспечивает безопасность ведения горноспасательных работ.

2. Разработана математическая модель транспортирования паров галоидоуглеводородов в воздушном потоке негерметичного вентиляционного трубопровода, позволяющая рассчитывать его аэродинамическую характеристику и исследовать режим работы вентилятора в зависимости от концентрации транспортируемых паров и угла наклона выработки к горизонту. Расчёты показали, что введение галоидоуглеводородов в вентиляционный трубопровод увеличивает его аэродинамическое сопротивление и повышает депрессию вентилятора, причём при горизонтальном расположении трубопровода снижается расход на входе при неизменной производительности вентилятора, при положительных углах наклона трубопровода производительность вентилятора и расход на входе его уменьшаются, при отрицательных – увеличиваются.

3. Разработана математическая модель, описывающая транспортирование паров галоидоуглеводородов в условиях прогрева трубопровода пожарными газами, численное решение которой показало, что прогрев трубопровода даже без

введения в него галоидоуглеводородов приводит к увеличению его аэродинамического сопротивления, снижению производительности вентилятора и увеличению его депрессии.

4. Установлены минимальные флегматизирующие концентрации для метановоздушных сред: хладона 114В2 – 1,1 %, бромистого этила – 3,8 %, составов БФ-2 – 2,9 % и БФ(1:1) – 2,0 % и для метановоздушных сред при содержании водорода 1, 2 и 3 %, которые являются выше огнегасительных при объёмном пожаротушении. В частности, при содержании водорода 3 % минимальные флегматизирующие концентрации хладона 114В2 – 3,3 %, бромистого этила – 6,2 %, составов БФ-2 – 6,3 %, БФ(1:1) – 4,6 %. Бедные смеси рекомендуются флегматизировать хладоном 114В2, богатые – составом БФ(1:1).

5. Разработана двумерная математическая модель газодинамических процессов, протекающих в выработанных пространствах крутых пластов с углом падения более 55° , построенная на двухчленном законе фильтрации газа в обрушенном массиве и учитывающая неоднородность газовой среды, которая выражается в неоднородности поля плотности газа, вызываемой наличием градиентов концентраций и температур. Силы плавучести, возникающие за счёт неоднородности поля плотности, сопоставимы по вкладу с силами сопротивления и градиентом давления.

6. Разработана двухтемпературная математическая модель тепломассопереноса в окрестности очага эндогенного пожара в обрушенном массиве, позволяющая учитывать теплообмен подвижной газовой фазы с породным скелетом и рассчитывать поля скоростей фильтрации, плотности смеси газов, давления концентраций и температур твёрдой и газовой фазы.

7. На основе метода контрольного объёма Патанкара разработана эффективная методика расчёта тепломассопереноса в выработанных пространствах обеспечивающая получение стационарного решения методом установления с дефектом массы менее 0,005 %. Проверка адекватности математической модели показала удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных величин с относительной погрешностью, не превышающей 25 %. Тестирование математической модели и методики расчёта дало совпадение численных результатов с аналитическим решением с погрешностью 3,8 % на сетках 15×15 и 1,4 % на сетках 40×40 .

8. Численное моделирование газодинамических процессов в выработанном пространстве щитового участка показало:

- метановыделение как фактор, порождающий неоднородность газовой среды, существенно влияет на структуру течения в выработанных пространствах крутых пластов. Устранение перепада давления по столбу и уравнению давления на действующем участке с давлением на дневной поверхности не обеспечивают полного прекращения утечек в выработанное пространство вследствие наличия естественной тяги;

- величина утечек зависит от интенсивности метановыделения и влияния этого фактора, увеличивающего утечки, тем значительнее, чем меньше перепад давления по столбу $h_{ст}$. При $h_{ст} > 100$ Па расчёт утечек может производиться без

зёта метановыделения, при $50 < h_{cr} < 100$ Па неучёт метановыделения приводит к занижению значения утечек на 10 – 25 %, при $h_{cr} < 50$ Па неучёт этого фактора ведёт к грубым ошибкам в определении величины утечек;

- в условиях устойчивых вмещающих пород при интенсивности метановыделения $q_1 < 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³с рост перепада давления по столбу h_{cr} ведёт к сокращению размеров потенциально взрывоопасных областей. В условиях среднеустойчивых и неустойчивых вмещающих пород зависимость размеров взрывоопасных областей от параметра h_{cr} имеет немонотонный характер. Доля площади выработанного пространства χ_2 , приходящаяся на потенциально взрывоопасные области, не превышает 0,1, если отношение ξ утечек в выработанное пространство к дебиту метана в зоне интенсивного дробления менее $5 \cdot 10^{-3}$, при изменении ξ в интервале от $2,5 \cdot 10^{-2}$ до $4,3 \cdot 10^{-3}$ $\chi_2 \geq 0,5$.

9. Предложен принцип управления газодинамическими процессами при локализации очагов эндогенных пожаров – формирование в выработанном пространстве потоков газов с регулируемыми параметрами (А.с. 1317157, 1573204, 701937). Реализация этого принципа позволяет активно воздействовать на взрывоопасные области и очаги горения и позволяет: а) перемещать очаг в нужном направлении; б) фиксировать его в определенной точке; в) поддерживать необходимую интенсивность горения или снижать её.

10. Моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в выработанном пространстве показало, что

- наличие пенной завесы приводит к повышению давления в области, расположенной между нею и рабочим щитом при нагнетательном способе проветривания. При расстояниях между рабочим щитом и пенной завесой, меньших её аксимального размера, наличие пенной завесы сокращает утечки в выработанное пространство более чем на 30 %;

- перераспределяя фильтрационный поток, пенная завеса увеличивает интенсивность проветривания отдельных частей выработанного пространства, поэтому рекомендуется осуществлять применение пенных завес в сочетании с газотсасывающими скважинами, блокирующими нежелательные потоки утечек;

- используя фильтрационный поток в качестве несущей фазы, можно транспортировать инертный газ в требуемую область выработанного пространства, обеспечивая нужное направление потока при помощи пенных завес и газотсасывающих скважин. Этот способ рекомендуется для тех случаев, когда отсутствует возможность пробурить скважину непосредственно в область, подлежащую инертизации;

- совместное применение азотоподающей и газоотсасывающей скважины, используемой для блокирования проветривания области, подлежащей инертизации, сокращает вынос из неё инертного газа, что позволяет увеличить объём инертизируемой области;

- воздействие эндогенного пожара на фильтрационное течение является значительным и в наибольшей степени проявляется в области, расположенной в плоскости падения пласта над очагом пожара. При температуре очага $T_c \leq 750$ его наличие практически не влияет на величину утечек из гидромониторной

камеры, так как при расстояниях между нею и очагом больших 30 м увеличение утечек, вызываемое его наличием, не превышает 5 %.

11. Предложен газодинамический подход и методика расчёта ударно-волновых процессов, позволяющие рассчитывать распространение, отражение и взаимодействие ударных волн и волн разрежения в разветвлённой сети горных выработок любой сложности

12. Рассмотрен вопрос о прохождении пламени и ударной волны по горным выработкам с учётом локальных скоплений метана по пути перемещения. Расчёты показали, что при воспламенении зон локального скопления метана происходят резкое усиление ударной волны, формирование двухволновой структуры распределения давления, распространяющейся в противоположные стороны, и смещение зоны загазованности за счёт движения газа.

13. Внедрение в частях ВГСЧ предложенных способов, средств, научных рекомендаций, методики расчёта параметров ударных волн и нормативных документов по активному воздействию на взрывоопасные области и очаги горения в выработках и выработанных пространствах позволяет предупреждать взрывы, обеспечивать охрану труда горноспасателей в зоне ведения аварийных работ и имеет важное социальное и народнохозяйственное значение.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Палеев Д.Ю., Браундер О.П. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах.- Томск: Изд. том. гос. ун-та, 1999.- 202 с.

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

3. Петров А.И., Голик А.С., Палеев Д.Ю., Лагутин В.И. Опыт предотвращения взрывов и тушение пожаров на шахтах Кузбасса.- М.: ЦНИЭИуголь, 1984.- 53 с.: ил.- (Серия «Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело»: Обзорная информация; Вып. 5).

4. Лагутин В.И., Палеев Д.Ю. Принцип управления газодинамическими процессами при локализации очагов эндогенных пожаров// Уголь.- 1995, № 5.- С. 55-57.

5. Голик А.С., Палеев Д.Ю., Орлов Н.В. Флегматизация взрывов и тушение пожаров в тупиковых выработках угольных шахт// Вентиляция шахт и рудников: Сб. научных трудов/ ЛГИ.- Л, 1981.- № 8.- С. 75-78.

6. Голик А.С., Палеев Д.Ю., Чуриков Ю.В., Левчук В.Ф. Превентивная флегматизация сложных газовых сред хладонами при тушении эндогенных пожаров// Безопасность труда в промышленности.- 1983.- № 2.- С. 29-30.

7. Голик А.С., Палеев Д.Ю. Флегматизация сложных газовых сред в шахтах// Первый Всесоюзный симпозиум по макроскопической кинетике и химической газодинамике: Тезисы докладов, Алма-Ата, октябрь 1984.- Черногловка, 1984.- Т.2, ч.2. С. 21.

8. Палеев Д.Ю., Пагрушева С.Л. Расчёт испарения отдельной капли галоидоуглеводорода.- Вост. отделение ВНИИГД. Прокопьевск, 1986.- 9 с. (Рукопись деп. ЦНИЭИуголь, 07.01.86, № 3574-уп).

9. Голик А.С., Палеев Д.Ю., Квашнин В.И. Предотвращение взрывов и тушение пламени в тупиковых выработках// Локализация и тушение подземных пожаров.- Кемерово: Кн. изд-во, 1989. Вып. 11. – С. 82-85.

10. Бранднер О.П., Палеев Д.Ю. Обоснование перехода к двумерной модели фильтрации газа в выработанном пространстве// Борьба с подземными пожарами.- Кемерово: Кн. изд-во, 1992. Вып. 13. – С. 22-26.

11. Палеев Д.Ю., Бранднер О.П. Методика расчета газодинамики выработанного пространства при запуске азота в пожароопасные зоны// Борьба с подземными пожарами.- Кемерово: Кн. изд-во, 1992. Вып. 13. – С. 15-21.

12. Бранднер О.П., Палеев Д.Ю. Особенности фильтрационного течения в выработанных пространствах крутых пластов// Борьба с подземными пожарами.- Кемерово: Кн. изд-во, 1995. Вып. 14. – С. 150-156.

13. Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю., Шрагер Э.Р. Моделирование распространения воздушных ударных волн от взрыва метановоздушной смеси в разветвленной системе горных выработок угольных шахт// Доклады Всероссийской научной конференции «Байкальские чтения по математическому моделированию процессов в синергетических системах». Улан-Удэ – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1999.

14. Временное руководство по применению хладонов и их смесей при ведении горноспасательных работ на шахтах Кузбасса/ Голик А.С., Лагутин В.И., Палеев Д.Ю. и др.// Кемерово, 1984.- 132 с.

15. Руководство по тушению пожаров в тупиковых выработках (первая редакция)/ Юрьев А.П., Продан И.Д., Лагутин В.И., Палеев Д.Ю. и др.// Донецк, 1985.- 93 с.

16. Руководство по флегматизации взрывов в тупиковых подготовительных выработках хладоновыми составами на шахтах Кузбасса и Карагандинского бассейна/Лагутин В.И., Голик А.С., Палеев Д.Ю. и др.// Кемерово, 1987.- 94 с.

17. Руководство по применению инертных газов при ликвидации подземных пожаров в шахтах/ Болбаг И.Е., Лагутин В.И., Палеев Д.Ю. и др.// Донецк, 1989.- 187 с.

18. А.с. № 863881 СССР, МКИ E21 F 5/00. Способ тушения пожара в горной выработке/ Голик А.С., Лагутин В.И., Чуприков А.Е., Палеев Д.Ю., Глазков П.С. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 2649985/22-03; Заявл. 31.01.78; Оpubл. 15.09.81; Бюл. № 34.- 3 с.-: ил. 3.

19. А.с. № 964185 СССР, МКИ E21 F 5/00. Устройство для подачи ингибитора в очаг пожара/ Чуприков А.Е., Голик А.С., Палеев Д.Ю., Торгашин И.Н. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 2928717/22-03; Заявл. 23.05.80; Оpubл. 07.1082; Бюл. № 37.- 3 с.-: ил. 2.

20. А.с. № 1059210 СССР, МКИ E21 F 5/00. Устройство для подачи ингибитора в очаг пожара/ Чуприков А.Е., Мещеряков Б.Г., Скляр А.А., Гилёв Г.Н.,

Палеев Д.Ю. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 3395765/22-03; Заявл. 11.02.82; Опубл. 07.12.83; Бюл. № 45.- 3 с.-: ил. 3.

21. А.с. № 1245714 СССР, МКИ E21 F 5/00. Способ предотвращения взрыва газовоздушной смеси/ Голик А.С., Баринов Г.П., Палеев Д.Ю., Чуриков Ю.В. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 2548100/22-03; Заявл. 25.11.77; Опубл. 23.07.86; Бюл. № 27.- 2 с.-: ил. 1.

22. А.с. № 1270366 СССР, МКИ E21 F 5/00. Способ тушения пожаров и предотвращения взрывов в подземных горных выработках/ Беляев О.Н., Палеев Д.Ю., Чуриков Ю.В., Филиппов А.И. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 3896713/22-03; Заявл. 20.05.85; Опубл. 15.11.86; Бюл. № 42.- 3 с.-: ил. 4.

23. А.с. № 1361350 СССР, МКИ E21 F 5/04. Устройство для подачи ингибитора в очаг пожара/ Чуприков А.Е., Палеев Д.Ю., Голубев В.М. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 4017948/22-03; Заявл. 04.02.86; Опубл. 23.12.87; Бюл. № 47.- 4 с.-: ил. 3.

24. А.с. № 1701937 СССР, МКИ E21 F 5/00. Способ тушения очагов подземных пожаров/ Портола В.А., Гуттер А.А., Лагутин В.И., Чуприков А.Е., Палеев Д.Ю. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 4764727/03; Заявл. 30.11.89; Опубл. 30.12.91; Бюл. № 48.- 3 с.-: ил. 2.

25. А.с. № 1573204 СССР, МКИ E21 F 5/00. Способ предупреждения и активной локализации эндогенных пожаров/ Лагутин В.И., Чуприков А.Е., Палеев Д.Ю., Кудрявцев Г.И. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 4417700/23-03; Заявл. 27.04.88; Опубл. 23.06.90; Бюл. № 23.- 4 с.-: ил. 2.

26. А.с. № 1317157 СССР, МКИ E21 F 5/00. Способ тушения эндогенного пожара/ Голик А.С., Голик Г.А., Палеев Д.Ю., Лапин В.А. (СССР); ВО ВНИИГД.- № 3993392/22-03; Заявл. 19.12.85; Опубл. 15.06.87; Бюл. № 22.- 4 с.-: ил. 3.