

На правах рукописи

ЛУКАШОВ Олег Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТОВ,
ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН
ПО РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Томск - 2003

Работа выполнена в Томском государственном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, ст. н. с.
Палеев Дмитрий Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Глазунов Анатолий Алексеевич

доктор физико-математических наук
Ткаченко Алексей Степанович

Ведущая организация – Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН

Защита диссертации состоится «30» января 2004 г. в « » часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13. при Томском государственном университете по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «25» декабря 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., ст. н. с.



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наибольшую опасность в угольных шахтах представляют аварии, вызванные взрывом метана и угольной пыли, которые составляют 18,9% от общего количества, а несчастные случаи со смертельным исходом при этих авариях - 86%. При взрывах шансы на выживание в 112 раз меньше, чем при других авариях.

Особую опасность представляют взрывы, возникающие в ходе ведения горноспасательных работ, когда нарушено проветривание и существует реальная угроза быстрого формирования зон с высокой концентрацией метана вблизи источников высокой температуры. В этих условиях требуются оперативность и точность прогнозирования параметров и области распространения ударной волны в горных выработках, а также знание того, насколько близко можно подойти к аварийному участку, оставаясь при этом в безопасной для жизни и здоровья зоне.

В настоящее время для расчёта взрывобезопасных расстояний горноспасатели пользуются полуэмпирической методикой, которая даёт ответ только на один вопрос – какое будет давление в переднем фронте ударной волны при её распространении только по одному маршруту. Однако при взрыве по горным выработкам всегда распространяются не одна, а несколько ударных волн, которые, взаимодействуя друг с другом, испытывают многократные отражения при поворотах. На людей воздействует целый ряд поражающих факторов, в числе которых динамическое воздействие набегающего потока, концентрация и высокая температура ядовитых продуктов взрыва. По этой причине точность существующих методов расчёта в сложных ситуациях перестала удовлетворять горноспасателей, а возможности их уточнения исчерпаны.

Для корректного расчёта распространения воздушных ударных волн в сложной разветвлённой сети горных выработок необходима разработка принципиально новой методики, в основу которой должен быть положен газодинамический подход, основанный на численном решении системы нестационарных уравнений газовой динамики. Это даст возможность описать процесс распространения ударных волн более детально и не только по заданному маршруту, а одновременно по всем направлениям, учитывая такие эффекты, как усиление и ослабление волн при их взаимодействии между собой, отражение волн в тупиках, влияние волн разрежения, а также взаимодействие ударных волн с различными защитными сооружениями и горным оборудованием.

Все исследования выполнялись по тематике Томского государственного университета и Российского научно-исследовательского института горноспасательного дела (РосНИИГД). Диссертационная работа обобщает результаты трёх научно-исследовательских тем, выполненных в 1999-2003 гг. при непосредственном участии автора (№№ Г.Р.: 01200304101, 01200211619, 0980009368).

Цель работы – усовершенствование газодинамического метода расчёта параметров распространения воздушных ударных волн при взрывах метановоздушных смесей в угольных шахтах и исследование волновых эффектов, возни-

кающих при распространении ударных волн по разветвлённой сети горных выработок.

Идея работы заключается в повышении точности расчёта зон поражения при взрывах метановоздушных смесей в угольных шахтах за счёт учёта волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн в разветвлённой сети горных выработок.

Задачи исследований:

1. Усовершенствовать газодинамический подход и разработать методику расчёта волновых процессов, возникающих при распространении воздушных ударных волн по шахтной сети с учётом пространственной топологии горных выработок.

2. Исследовать затухание ударной волны на прямолинейных участках горных выработок в зависимости от коэффициента их аэродинамического сопротивления.

3. Исследовать влияние волновых процессов, возникающих в тупиковых выработках, на интенсивность распространяющихся ударных волн.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели исследований использовался комплекс методов, включающий анализ и обобщение данных научно-технической литературы по рассматриваемым вопросам, методы механики сплошных сред и математической физики для построения и обоснования математических моделей по распространению ударных волн в горных выработках и их численное решение с применением ЭВМ, проведение тестовых расчётов, сравнение полученных результатов математического моделирования с существующими эмпирическими методиками аналогичных расчётов и экспериментальными данными других авторов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. На величину взрывобезопасного расстояния при взрывах в угольных шахтах сильное влияние оказывают волновые эффекты, возникающие в разветвлённой сети горных выработок при формировании, распространении, отражении и взаимодействии воздушных ударных волн, волн сжатия и волн разрежения.

2. Интенсивность ударной волны определяется энергией взрыва, не зависит от формы начального распределения давления и на расстояниях, превышающих размеры первоначального объёма загазования в три-пять раз, может быть рассчитана на основе простейшей модели мгновенного взрыва.

3. Силу трения газа о стенки горных выработок можно согласовать с экспериментальными данными путём введения безразмерного коррелирующего коэффициента, функционально зависящего от коэффициента аэродинамического сопротивления выработки.

4. При переходе потока, втекающего в тупиковую выработку длиной 100 м и более, в дозвуковой режим возникает эффект торможения сверхзвукового потока, подходящего к этой выработке. В сопряжении с тупиковой выработкой наблюдается повышение давления с выходом из него слабой волны сжатия.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- обоснованностью исходных предпосылок и использованием апробированных методов математического моделирования распространения ударных волн в горных выработках в широком диапазоне изменения их геометрических и аэродинамических параметров;

- удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования и расчётов по существующим аналитическим методикам других авторов;

- положительными результатами опытно-промышленной проверки «Методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» и программного комплекса «Ударная волна» в отрядах ВГСЧ и в экспертных комиссиях по расследованию аварий на угольных шахтах Кузбасса.

Научная новизна работы:

1. Усовершенствован газодинамический метод и разработана методика газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах в угольных шахтах, позволяющие рассчитывать формирование, распространение, отражение и взаимодействие ударных волн, волн сжатия и волн разрежения с учётом пространственной топологии сети горных выработок.

2. Установлено, что на расстояниях, превышающих в три-пять раз взорвавшийся объём, интенсивность ударной волны определяется энергией, выделившейся при взрыве, не зависит от формы начального распределения давления и может быть рассчитана на основе простейшей модели мгновенного взрыва

3. Получен коррелирующий коэффициент $\kappa = 3.0 \ln(\alpha) + 19.2$, позволяющий рассчитывать затухание воздушных ударных волн на прямолинейных участках горных выработок с учётом коэффициента их аэродинамического сопротивления α .

4. Установлено, что при переходе потока, втекающего в тупиковую выработку длиной 100 м и более, в дозвуковой режим возникает эффект торможения сверхзвукового потока, подходящего к этой выработке. В сопряжении с тупиковой выработкой наблюдается повышение давления с выходом из него слабой волны сжатия.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- в создании методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах метановоздушных смесей в угольных шахтах;

- в разработке программного комплекса «Ударная волна».

Результаты выполненных исследований позволяют:

- 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 определения зон поражения при взрывах от воздействия поражаю-

щих факторов: давления и скорости набегающего потока, температуры и концентрации продуктов взрыва;

- прогнозировать интенсивность распространения ударных волн по горным выработкам при составлении планов ликвидации аварии и проводить экспертные оценки с целью выявления причин и возможных мест взрыва в ходе расследования аварий.

Личным вкладом автора является:

- проведение многопараметрических расчётов, обработка и анализ полученных результатов;

- получение безразмерного коррелирующего коэффициента, позволяющего рассчитывать затухание воздушных ударных волн на прямолинейных участках горных выработок с учётом их аэродинамического сопротивления;

- разработка алгоритма расчёта потокораспределения газа по сети горных выработок;

- разработка и внедрение в ВГСЧ угольной промышленности нормативного документа и программного комплекса для расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли в угольных шахтах.

Реализация работ в промышленности. Результаты исследований вошли в «Методику газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли», которая утверждена Госгортехнадзором РФ (2003 г.). Программный комплекс «Ударная волна» имеет сертификат Госгортехнадзора РФ и используется в ВГСЧ угольной промышленности с 2000 г. С его помощью создан банк данных трёхмерных координат горных выработок угольных шахт Российской Федерации. «Методика ...» и программный комплекс использовались экспертными комиссиями при расследовании аварий на шахтах «Распадская» (2000 г.), «Алардинская» (2003 г.), «Зиминка» (2003 г.).

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные ее части докладывались и обсуждались на заседаниях Ученого совета РосНИИГД, на семинарах кафедры прикладной аэромеханики ТГУ, на технических советах Центрального штаба ВГСЧ угольной промышленности РФ, на IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (г. Кемерово, 2000), на Международной конференции «Современные методы математического моделирования природных и техногенных катастроф» (г. Красноярск, 2001, 2003), на IV Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (г. Кемерово, 2001), на Всероссийской научно-практической конференции «Промышленная безопасность» (г. Москва, 2001), на VIII Всероссийской научно-технической конференции «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (г. Томск, 2002), на 3-й Международной научной конференции «Физические проблемы разрушения горных пород» (г. Абаза, 2002), на 1-й Международной конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», (г. Москва, 2002), на Научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2002), на научной конференции «Физика и химия высокоэнергетических систем» (г. Томск, 2003), на

XII Международной конференции по Вычислительной Механике и Современным Программным Системам (г. Владимир, 2003), на Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (г. Кемерово, 2003), 30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Johannesburg, 2003).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 13 печатных работах и одном нормативном документе.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 141 странице машинописного текста, включая 52 рисунка, 10 таблиц, список литературы из 107 наименований и приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и идея работы. Даётся описание научных положений, выносимых на защиту, подчёркивается их обоснованность, достоверность, новизна и практическая ценность.

В первой главе (п. 1.1) дан краткий анализ взрывов метана и угольной пыли в шахтах и приведены особенности распространения воздушных ударных волн в горных выработках.

Основные поражающие факторы взрыва в условиях угольных шахт: сейсмические волны, воздушные ударные волны; высокая температура во фронте горения; токсичные газы и низкое содержание кислорода в продуктах реакции. Радиус действия сейсмических волн, опасных для людей и подземных инженерных сооружений, сравнительно невелик и не превышает 100 м, что значительно меньше зон действия токсичных газов и ударных волн. Из поражающих факторов ударной волны следует выделить: избыточное давление, время его действия и скоростной напор газа, движущегося за фронтом волны. Ослабление ударной волны при движении ее вдоль горных выработок происходит за счет вовлечения в движение дополнительных масс воздуха, трения о стенки выработок, теплообмена и потерь энергии на сопряжениях и поворотах.

Действующие в угольной промышленности нормативные документы требуют обязательного определения зоны воздействия для каждого поражающего фактора. Однако в настоящее время рассчитывается зона воздействия только одного поражающего фактора – ударной волны.

В СССР изучение взрывов угольной пыли и газа в шахтах и разработка мер предупреждения их были начаты в 1925 г. в МакНИИ (г. Макеевка). Затем они были развёрнуты в ВостНИИ (г. Кемерово), ИГД им. А.А. Скочинского (г. Люберцы), ВНИИГД (г. Донецк), РосНИИГД (г. Кемерово), ТГУ (г. Томск).

Классические работы советских ученых Н.Н. Семенова, Л.Д. Ландау, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецкого, К.И. Щелкина, Я. К. Трошина, Л.Н. Хитрина, Л.И. Седова, К.П. Станюковича, В.Н. Вилюнова и многих других, а также зарубежных исследователей Е. Гюгонио, В. Деринга, Р. Льюиса, Г. Эльбе, Р.

Куранта, Г. Тейлора, Ф. Вильямса и других в области физики взрыва послужили основой для выполнения работ прикладного характера, посвященных проблеме борьбы с взрывами газа и пыли в угольных шахтах.

Широко известны работы А.Г. Абинова, А.М. Быкова, И.М. Васенина, Ф. М. Гельфанда, А.С. Голика, В.И. Гудкова, А.А. Гурина, Н.Д. Зрелого, А.Ю. Крайнова, Б.Н. Кутузова, А.В. Мишуева, М.И. Нецепляева, Е.И. Онтина, Д.Ю. Палеева, П.М. Петрухина, В.М. Плотникова, В.С. Сергеева, А.М. Чеховских, Э.Р. Шрагера и других ученых, выполнивших ряд экспериментальных и теоретических исследований по разработке мер предупреждения и локализации взрывов газа и пыли в шахтах.

Анализ вышеприведённых работ показал, что корректный расчёт зон воздействия поражающих факторов взрыва возможен и сдерживается он отсутствием методики основанной на газодинамических принципах расчёта распространения ударных волн по сети горных выработок.

В п. 1.2 дан анализ двух наиболее известных методов расчёта взрывобезопасных расстояний А.М. Чеховских и В.М. Плотникова. Показывается, что эти методики разработаны на основе упрощенных аналитических соотношений, допускающих ручной счёт. Все методики опираются на экспериментальные данные, полученные в условиях не всегда соответствующих условиям угольных шахт, и содержат большое количество эмпирических коэффициентов. Основным выходным параметром расчёта является давление во фронте ударной волны, распространяющейся только по одному маршруту, который необходимо выбирать на схеме горных выработок. Методики не рассматривают отражение ударных волн от твердых поверхностей в местах поворота, взаимодействие ударных волн и формирование волн разрежения.

В итоге горноспасатели получают недостаточную точность при расчёте главного параметра взрывного процесса – избыточного давления во фронте ударной волны. Кроме того, горноспасателей не устраивает длительность подготовки исходных данных и необходимость в сложных ситуациях поочередно проводить расчёты по нескольким маршрутам движения ударной волны.

При ликвидации подземных аварий, когда в стрессовых ситуациях решения необходимо принимать быстро, человеческий фактор появления вычислительных ошибок должен быть по возможности исключён. Методика должна предоставлять информацию о затухании ударных волн распространяющихся по всей сети горных выработок с учётом их волнового взаимодействия. Результатом расчёта должна быть зона поражения, фиксируемая на плане горных работ, включающая зоны динамического воздействия ударной волны, теплового и токсического воздействия продуктов взрыва. Расчёт должен также выдать информацию обо всех возможных разрушениях (повреждениях) вентиляционных дверей, шлюзов и других инженерных сооружений и оборудования, размещённых в выработках аварийного участка. Иными словами, руководитель ликвидации аварии должен в результате расчёта иметь целостную картину всех негативных последствий взрыва.

В п. 1.3 показывается, что альтернативой известным методикам может стать новая методика, опирающаяся на разработанный в РосНИИГД и Томском госу-

дарственном университете газодинамический метод расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах в угольных шахтах. Метод учитывает такие эффекты, как усиление и ослабление волн при их взаимодействии, отражение волн в тупиках, влияние волн разрежения, а также взаимодействие ударных волн с различными взрывозащитными сооружениями и горным оборудованием. Метод позволяет автоматически рассчитывать параметры ударных волн не только по заданному маршруту, но одновременно во всех направлениях. При этом, процесс распространения ударной волны можно наблюдать во времени, начиная с момента взрыва и заканчивая её затуханием.

В главе 2 проведено исследование и доработка газодинамического метода до возможности расчёта распространения ударных волн по разветвлённой сети горных выработок реальной шахты.

В п. 2.1. приводится математическая модель газодинамического метода. Для расчета течения продуктов взрыва и распространения ударных волн в прямолинейных выработках используются одномерные уравнения газовой динамики, где в правых частях учитываются процессы силового и теплового взаимодействия потока со стенками:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u S}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = -\tau_{mp} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} = q \Pi \quad (4)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2}{2}; \quad p = \rho R T, \quad (5)$$

$$\tau_{mp} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}, \quad \text{Re} = \frac{\rho u D_{\text{экв}}}{\mu}, \quad D_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (6)$$

$$q = \alpha (T_s - T), \quad \text{Nu} = 0,022 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,47} B, \quad \text{Pr} = \frac{\rho c}{\lambda_g}, \quad \text{Nu} = \frac{\alpha D_{\text{экв}}}{\lambda_g}, \quad (7)$$

$$B = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{\text{opt}}}{(l/\delta)}\right), & \frac{l}{\delta} > \left(\frac{l}{\delta}\right)_{\text{opt}} \\ \exp\left(\frac{(l/\delta)}{(l/\delta)_{\text{opt}}}\right), & \frac{l}{\delta} < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{\text{opt}} \end{cases} \quad \left(\frac{l}{\delta}\right)_{\text{opt}} = 13, \quad (8)$$

где t – время; x – координата; ρ – плотность; p – давление; ρ_f – плотность продуктов взрыва; T – температура; R – газовая постоянная; u – скорость; E – полная энергия; S – площадь поперечного сечения канала; Π – периметр канала; τ_{mp} – сила трения о стенки канала; q – тепловой поток в стенки канала; c_f – коэффициент сопротивления; Re – число Рейнольдса; $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка канала; μ – коэффициент динамической

вязкости; Nu - число Нуссельта; Pr - число Прандтля; T_S – температура стенки; 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.

Сопряжения горных выработок будем предполагать кубической формы и течение газа в них описывать трехмерными уравнениями газовой динамики (трением и теплообменом на участках стенок пренебрегаем из-за их малости):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_f v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_f w}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2 + p)}{\partial z} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Eu + pu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Ev + pv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho Ew + pw)}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad p = \rho RT. \quad (15)$$

Здесь u - скорость вдоль оси x , v - вдоль оси y , w - вдоль оси z .

Начальные условия.

$$p(x, 0) = \begin{cases} P_b & x \in \Gamma \\ P_0 & x \notin \Gamma \end{cases}, \quad T(x, 0) = \begin{cases} T_b & x \in \Gamma \\ T_0 & x \notin \Gamma \end{cases}, \quad \rho_f(x, 0) = \begin{cases} \rho_f & x \in \Gamma \\ 0 & x \notin \Gamma \end{cases}, \quad u(x, 0) = 0, \quad (16)$$

$$p(x, y, z, 0) = \begin{cases} P_b & \text{в } \Gamma \\ P_0 & \text{вне } \Gamma \end{cases}, \quad T(x, y, z, 0) = \begin{cases} T_b & \text{в } \Gamma \\ T_0 & \text{вне } \Gamma \end{cases}, \quad \rho_f(x, y, z, 0) = \begin{cases} \rho_f & \text{в } \Gamma \\ 0 & \text{вне } \Gamma \end{cases}, \quad (17)$$

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0,$$

где P_b , T_b - давление и температура области взрыва; P_0 , T_0 – начальное давление и температура в выработке; Γ – зона загазования.

Граничные условия для уравнений (1)-(4), описывающих движение потока в горной выработке, ставятся в зависимости от конфигурации и сечения другой выработки, с которой она граничит. Если граница выработки тупик или изолирующая перемычка, то используется условие непротекания:

$$u|_{z_p} = 0 \quad (18)$$

Если выработка выходит на дневную поверхность:

$$p|_{z_p} = P_{атм}, \quad \rho|_{z_p} = \rho_{атм} \quad (19)$$

Если выработка граничит с сопряжением, то используются значения потоков массы, импульса и энергии, определяемые из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа:

$$M|_{\text{гп}} = M(t), \quad I|_{\text{гп}} = I(t), \quad E|_{\text{гп}} = E(t) \quad (20)$$

Для системы уравнений (9)-(15) на границах сопряжения используются условия в виде (20), если на соответствующей стороне есть примыкающая выработка; если нет - используется условие непротекания (18) на соответствующей стороне сопряжения. Если площадь сечения примыкающей выработки отличается от площади боковой поверхности сопряжения, то используется процедура расчета распада произвольного разрыва в параметрах газа на скачке сечения.

Необходимость решения системы уравнений (1)-(5) и (9)-(15) соответственно для каждой выработки и каждого сопряжения с учётом граничных условий (18)-(20), требует автоматического учёта пространственных углов соединения выработок, направления потоков в них и ситуаций взаимодействия двух и более потоков, сходящихся в сопряжениях. Это потребовало разработки универсального алгоритма организации вычислительного процесса, обеспечивающего моделирование взрыва метановоздушной смеси в любой точке шахты (п.2.2). Для этого пространственная топология сети горных выработок шахты представляется в виде конечного графа, в котором каждому узлу, кроме его номера, ставится в соответствие три декартовых координаты X, Y, Z .

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.) Тестирование подтвердило выполнимость законов сохранения массы и полной энергии при расчёте течения в N каналах (при отсутствии теплообмена и потерь энергии на трение) и непротиворечивость получаемых результатов при решении модельных задач.

Численное решение систем уравнений (1)-(5) и (9)-(15) представляет собой совместное использование одномерной и трёхмерной модификации метода С.К. Годунова. В п.2.3. показано, что не всегда имеет смысл решать задачу о распаде произвольного разрыва в полной постановке. В случаях, когда перепад давления в двух соседних ячейках небольшой, образуются слабые разрывы, поэтому параметры состояния после распада разрыва могут быть найдены с хорошей точностью исходя из формул для акустического приближения. Для перехода к линеаризованной схеме С.К. Годунова принято выполнение условий:

$$\left| \frac{p_{i+1/2} - p_{i-1/2}}{p_{i+1/2}} \right| \leq \varepsilon_1 \quad \text{и} \quad |u_{i+1/2} - u_{i-1/2}| \leq \varepsilon_2 c_0, \quad \text{где} \quad \square_1 = 1.01 \quad \text{и} \quad \square_2 = 0.05.$$
 Это позволило ускорить расчеты в несколько раз без потери точности вычислений.

В п. 2.4. проанализировано влияние неравномерности распределения давления в зоне взрыва на интенсивность ударной волны (рис. 1). Предполагалось, что зона загазования расположена в тупике выработки. Формы начального распределения давления: a – равномерное распределение давления; b – убывающий профиль давления, моделирующий случай, когда источник воспламенения на границе зоны загазования и фронт быстрого горения, переходящий в

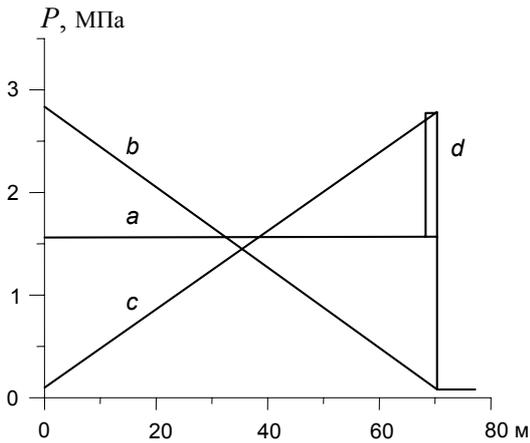


Рис. 1. Формы начального распределения давления

детонацию, распространяется к тупику выработки; *c* – возрастающий профиль давления, источник воспламенения в тупике; *d* – равномерный профиль давления с зоной повышенного давления (2,8 МПа), моделирующей «химпик» в детонационной волне. Формы *a-d* построены так, что внутренняя энергия продуктов сгорания во всех вариантах одинакова. Температура меняется пропорционально давлению. Расчёты показали, что давления в ударной волне при различных формах его начального распределения после прохождения 3-5 длин зон начальной загазованности, практически совпадают.

В газодинамическом методе предполагается мгновенный взрыв метановоздушной смеси. В реальных же условиях процесс взрыва протекает во времени. Поэтому в п. 2.5 проведено сравнение результатов расчётов для взрывов в тупиковой и в сквозной выработках при задании начальных распределений параметров взрыва в виде: *a*) аналитического решения задачи о детонации загазованного объёма; *б*) гипотетического мгновенного взрыва. При взрыве в тупике, когда детонация возникает у закрытого конца, аналитическое решение в начальный момент даёт давление в детонационном пике более чем в 1,5 раза превышающее давление мгновенного взрыва в постоянном объёме. Затем это давление быстро падает, и с момента времени $t=0,16$ с оба давления практически совпадают. При взрыве в сквозной выработке, когда детонация начинается на левой границе загазованного объёма, уже через 0,0125 с максимальные давления очень близки друг к другу (рис. 2).

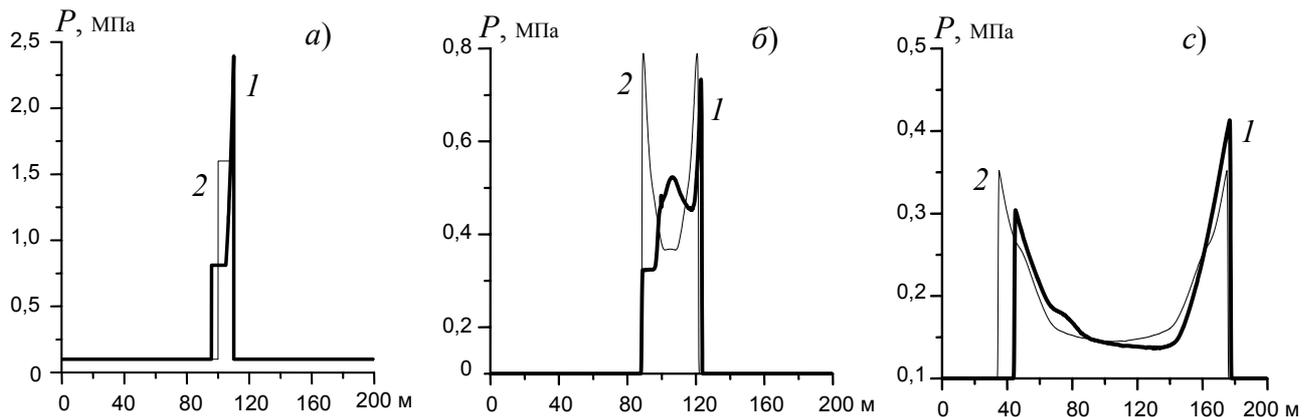


Рис. 2. Распределение давления при взрыве в сквозной выработке: *a*) $t = 0$ с; *б*) $t = 0,0125$ с; *с*) $t = 0,875$ с; 1 – детонация; 2 – мгновенный взрыв;

Рассмотрено распространение ударной волны после детонации объёма метановоздушной смеси, расположенного под сводом горной выработки. Сравнение результатов численных расчётов в двумерной и одномерной постановках показало, что при $t=0,003$ с процесс распространения ударной волны становится практически одномерным. Давление под сводом выработки при двумерном

взрыве несколько меньше, чем давление, рассчитанное в одномерной постановке при мгновенном взрыве.

Проведенные расчеты позволяют сделать следующий вывод: при взрыве объема метановоздушной смеси в горных выработках давление в ударных волнах существенно зависит от точки инициирования и места расположения объема. На расстояниях превышающих размеры этого объема в 3-5 раз, интенсивность ударной волны определяется энергией взрыва, не зависит от формы начального распределения давления и может быть рассчитана на основе простейшей модели мгновенного взрыва.

В главе 3 проведена проверка адекватности и осуществлена коррекция газодинамического метода по отношению к существующим методикам. Разработана альтернативная методика, превосходящая как по точности, так и по своим функциональным возможностям официально действующую.

При расчёте силы трения газа о стенки выработки (6) в газодинамическом методе основную сложность представляет задание эмпирического коэффициента сопротивления c_f . Эту величину удобно связать с хорошо известной величиной аэродинамического сопротивления горной выработки α . Поскольку прямые эксперименты по выявлению такой связи в мировой практике не проводились, в п. 3.1 использованы экспериментальные результаты, на которых построены методики А.М. Чеховских и В.М. Плотникова. Расчёты показали, что газодинамический метод даёт более близкие к официально действующей методике В.М. Плотникова результаты, которые можно легко скоррелировать путём введения в формулу (6) поправочного коэффициента κ :

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{\kappa}{8} c_f \rho u^2, \quad \kappa = 3.0 \ln(\alpha) + 19.2. \quad (21)$$

Анализ изменения интенсивности ударных волн при проходе ими сопряжений горных выработок, проведённый в п. 3.2 путём сравнения коэффициентов затекания из газодинамического метода и методики В.М. Плотникова, показал, что трёхмерная ячейка при расчёте параметров течения в местах сопряжения горных выработок в большинстве случаев даёт удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Это говорит о том, что, несмотря на сложный характер течения в местах сопряжения выработок, принятый упрощенный подход оправдан при проведении инженерных расчётов, позволяя резко сократить машинное время.

В п. 3.3 на примере схемы аварийного участка (рис. 3) проанализированы возможности газодинамического метода и проведено сравнение с методикой В.М. Плотникова. При взрыве в лаве 1 горноспасатели рассчитывают два самых коротких маршрута распространения ударной волны: 1-2-3-4 и 1-10-12-13-14-15. Расчёты показали, что взрывобезопасные расстояния, на которых избыточное давление в волне снижается до 0,009 МПа (сопряжения 4 и 16), совпадают только при отсутствии эффектов волнового взаимодействия. Для корректности сравнения при газодинамическом расчёте в сопряжениях 2-4, 10, 12, 13, 15 волны уходили по ответвлениям 3, 4, 6, 8, 11, 15, 16, 18, 20, 23 без последующего взаимодействия с потоком. Причём наличие даже одного взаимодействия при-

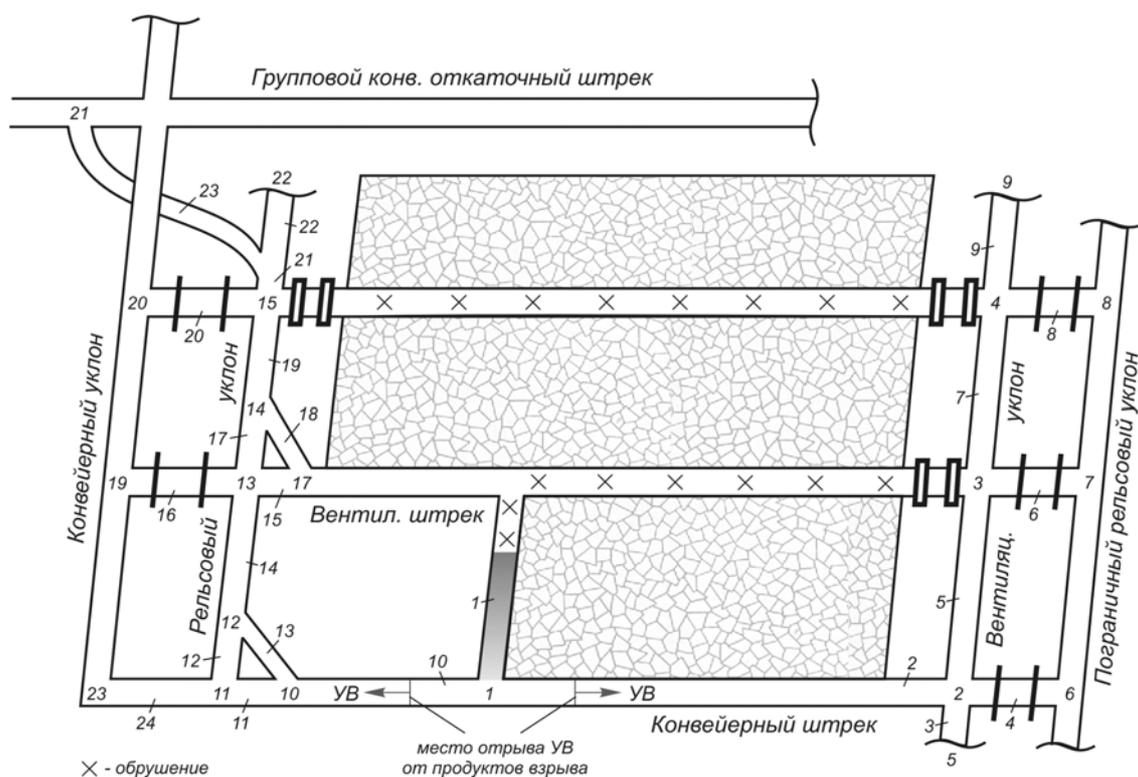


Рис. 3. Схема аварийного участка.

водит к расхождению результатов в сторону увеличения взрывобезопасного расстояния. Так введение в расчёт сопряжения 11 и установка перемычки в выработке 24 приводит к тому, что в сопряжение 12 приходят две волны из выработок 12 и 13 с более высоким результирующим давлением (рис. 4). Давление в сопряжении 16 повышается, а взрывобезопасная отметка отодвигается далеко за его пределы.

При газодинамическом расчёте взрыва, когда волны могут распространяться по всем выработкам аварийного участка, изображённого на рис. 3, программа автоматически оценивает взрывоустойчивость перемычек. И если давление

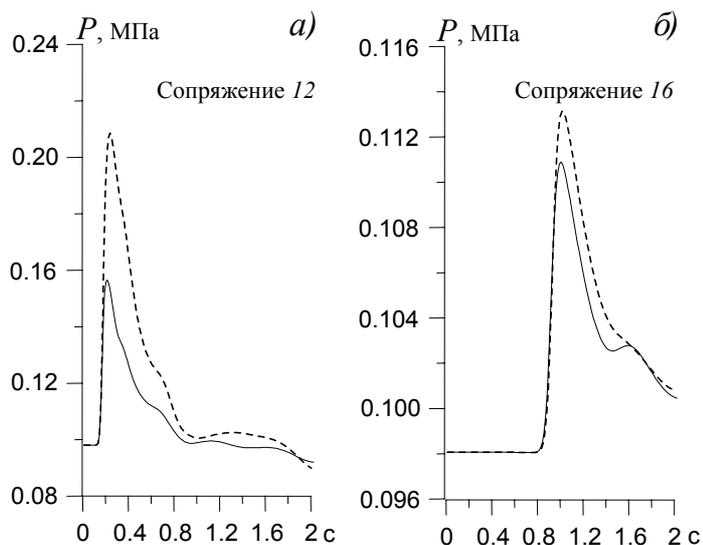


Рис. 4. Изменение давления потока в сопряжениях 12, 16: ----- - с учётом сопряжения 11; — - без учёта сопряжения 11

торможения на перемычке превышает её предельную нагрузку, то она убирается, предоставляя возможность потоку распространяться дальше. При таком расчёте газодинамический метод даёт следующие результаты:

Первый. Давление в потоке, распространяющемся по вентиляционному уклону, не уменьшается а, наоборот, возрастает. Это связано с разрушением шлюзов, повышением давления при торможении потока в сопряжении б, распространением волн по двум параллельным уклонам и их взаи-

модействием по сбойкам 4, 6, 8. В сопряжениях 3 и 4 давление заметно увеличивается, что приводит к увеличению взрывобезопасного расстояния на этом участке распространения взрыва.

Второй. Давление в потоке, распространяющемся по второму, расположенному дальше рельсовому уклону, выше, чем в потоке, распространяющемся по первому (рис. 5).

Эти два результата, которые никак не проявляются при расчётах по методике В.М. Плотникова, объясняются следующим образом. Распространяющаяся по конвейерному штреку волна сжатия при проходе сопряжения 2 разделяется на три потока. Два потока симметрично расходятся по выработкам 3 и 5. Третий поток, являющийся продолжением основного и в котором заключена основная масса газа, двигается по инерции в прежнем направлении, входит в сбойку 4 и в сопряжении 6 затормаживается, что приводит к увеличению статического давления в потоке. В

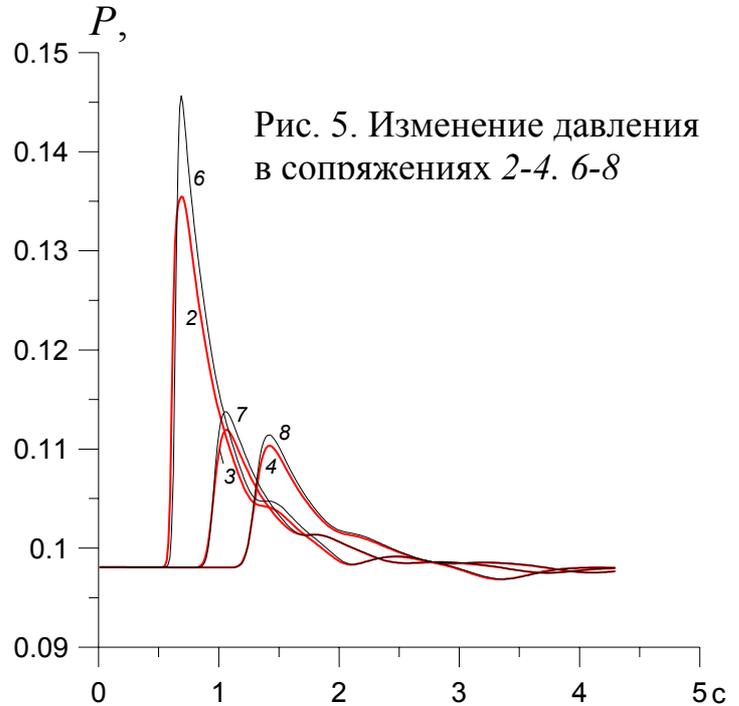


Рис. 5. Изменение давления в сопряжениях 2-4, 6-8

результате по второму уклону начинает распространяться волна с интенсивностью большей, чем по первому. При взаимодействии потоков происходит перераспределение их энергии и в результате давление в первом уклоне становится выше, чем давление в нём без учёта взаимодействия потоков.

В п. 3.4 проведено сравнение газодинамического метода с методикой А.М. Чеховских на примере, исключая волновое взаимодействие потоков. Обе методики дали одинаковое взрывобезопасное расстояние. В ходе сравнения двух методик показано, как при взрыве в тупиковой выработке возникает затухающий колебательный процесс. Получено, что под действием волн разрежения в выработке падает давление и формируется обратный высокоскоростной поток газа, который, затормозившись в тупиковой части, выходит из выработки в виде слабой догоняющей волны сжатия. Этим самым подтверждено существование так называемого обратного удара при взрывах метана в угольных шахтах. Причём основной причиной формирования обратного удара является не остывание продуктов взрыва и конденсация образующихся при взрыве паров воды, а центрированная волна разрежения, которая образуется в момент формирования фронта ударной волны.

Выполненные исследования позволили в п. 3.5 предложить в качестве альтернативы стоящей на вооружении ВГСЧ методике В.М. Плотникова новую «Методику газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли», в основу которой положен газодинамический подход. Все вычисления основываются на пространственной топологии сети гор-

ных выработок шахты. Расчёты ведутся на персональном компьютере с использованием программного комплекса «Ударная волна», автоматизирующего весь ход вычислительного процесса.

Новая методика при задании начального давления в зоне взрыва использует экспериментальный факт разгона фронта горения и ударной волны вдоль горной выработки по детонационному сценарию. При соответствующей длине загазования возникает детонация, и давление в её продуктах принимается равным 1.6 МПа. Снижение интенсивности ударной волны на прямолинейных участках скоррелировано с официально действующей методикой посредством соотношений (20).

В главе 4 проведены численные исследования по влиянию тупиковых выработок на волновые эффекты, возникающие при распространении воздушных ударных волн по сети горных выработок.

В п. 4.1 рассмотрена ситуация взрыва метановоздушной смеси на некотором расстоянии от тупика. В этом случае волна, распространяющаяся к тупику, отражается от него и идет вдогонку волны, распространяющейся к выходу из тупиковой выработки. И если взрыв произошел недалеко от тупика, то отраженная волна догоняет переднюю волну. Если взрыв произошел на расстоянии более 200 м от тупика, то перепад давления в первой волне не зависит от этого расстояния. Отражённая волна не успевает догнать переднюю и изменить её интенсивность (рис. 6).

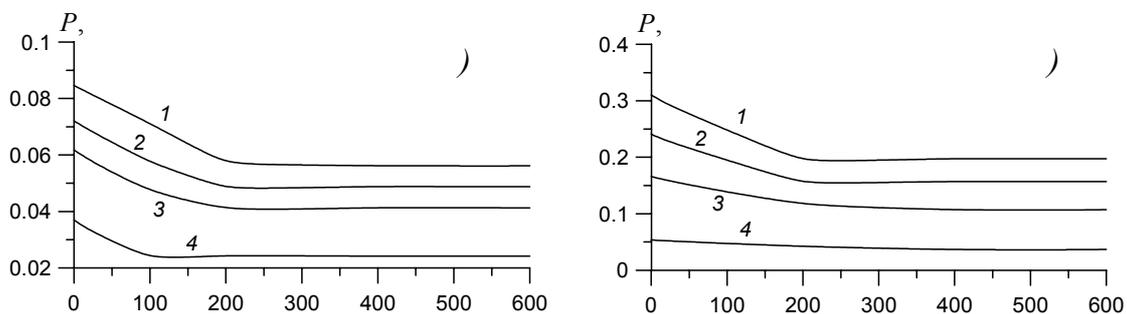


Рис. 6. Избыточное давление в передней волне сжатия после прохождения ею 1000 м в зависимости от расстояния зоны загазования до тупика: а) Длина зоны загазования $L_{\text{взр}} = 24$ м; Давление в зоне взрыва $P_{\text{взр}}$: 1 – 1.6 МПа; 2 – 1.27 МПа; 3 – 0.1 МПа; 4 – 0.5 МПа; б) 1 - $L_{\text{взр}} = 222$ м; $P_{\text{взр}} = 1,6$ МПа; 2 - $L_{\text{взр}} = 190$ м; $P_{\text{взр}} = 1,27$ МПа; 3 - $L_{\text{взр}} = 144$ м; $P_{\text{взр}} = 1.0$ МПа; 4 - $L_{\text{взр}} = 52$ м; $P_{\text{взр}} = 0.5$ МПа

В п. 4.2 проведено исследование динамики формирования и распространения отражённых от груди забоя волн. Так при сильном взрыве на расстоянии ≤ 200 м от груди забоя в прямолинейной тупиковой выработке всегда образуется серия отражённых от поверхности забоя волн. Причём, первая отражённая волна – ударная, все последующие – волны сжатия. Первая отражённая волна по интенсивности всегда превосходит головную и обязательно её догоняет, последующие – не догоняют. Зарождение отражённых волн сжатия обусловлено периодическим формированием у груди забоя волн разрежения, формирующих обратный, в сторону тупика, поток газа.

Рассмотрено влияние ударной волны, пересекающей высокотемпературную зону продуктов взрыва, на положение её границ. На рис. 7.а показана ситуация, когда через 0.4 с после взрыва одна ударная волна, подошедшая к груди забоя, отразилась от него со скоростью 600 м/с. Левая граница продуктов взрыва подошла вплотную к груди забоя. От поверхности груди забоя её отделяет только прогретый за счёт ударного сжатия слой воздуха. На последующих рисунках 4.7.б, в, г хорошо видно как отражённая ударная волна, пересекая область продуктов взрыва, сносит по ходу своего движения левую и правую границы высокотемпературных продуктов взрыва.

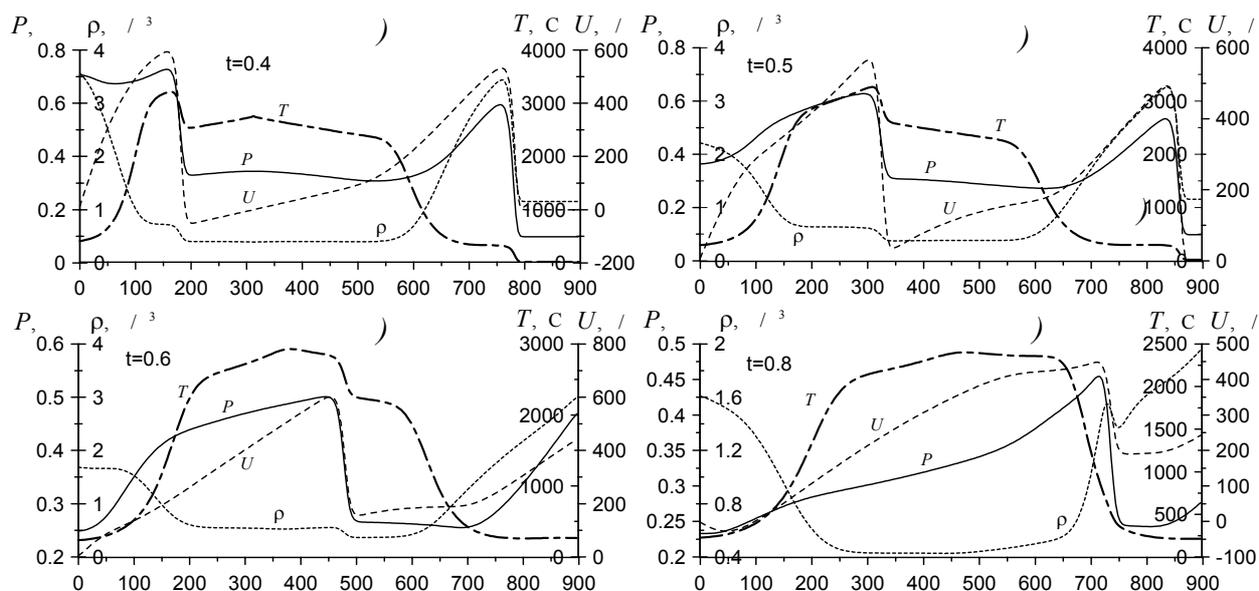
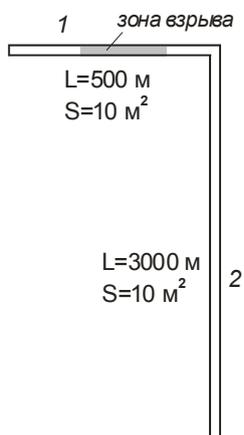


Рис. 7. Смещение границ высокотемпературной зоны при прохождении через неё отражённой ударной волны. Зона взрыва находится на расстоянии 200 м от груди забоя: $L_{\text{взр}} = 222$ м; $P_{\text{взр}} = 1,6$ МПа

Ударная волна, проходя по продуктам взрыва, ещё больше повышает их температуру. Точно также ударная волна повышает температуру воздуха, по которому она распространяется. Степень повышения температуры сжатого воздуха зависит от интенсивности ударной волны.

Наличие прямого поворота выработки на 90° сильно меняет волновую картину в выработке 1 (рис. 8). В ней формируется система встречных волн, отражающихся от груди забоя и от противоположной поверхности сопряжения. Причём, отражённые от сопряжения волны, гасят образование зон пониженного давления вблизи груди забоя и формирование обратного тока газа. В результате от поверхности забоя отражаются только пришедшие от сопряжения волны. В процессе такого колебательного движения волн раскалённые продукты взрыва также испытывают колебательные перемещения вдоль выработки 1.



На рис. 9 показана динамика изменения давления, скорости и температуры газа в ветви 2 за поворотом тупиковой выработки. Видно, что через 1.9 с по выработке распространяются сле-

ны. Степень ослабления зависит от размеров тупиковой выработки. Из тупиковой выработки всегда выходит отражённая волна, которая увеличивает импульс головной волны и при благоприятных обстоятельствах способна догнать и усилить передний фронт головной волны.

В конфигурации выработок, представленной на рис. 10, при переходе потока в тупиковой выработке длиной 100 м и более в дозвуковой режим возможно возникновение эффекта торможения сверхзвукового потока, подходящего к этой выработке. В результате в сопряжении с тупиковой выработкой наблюдается повышение давления (рис. 11) с выходом из него слабой волны сжатия, которая затем поглощается вышедшей из тупика более сильной отраженной волной (рис. 12).

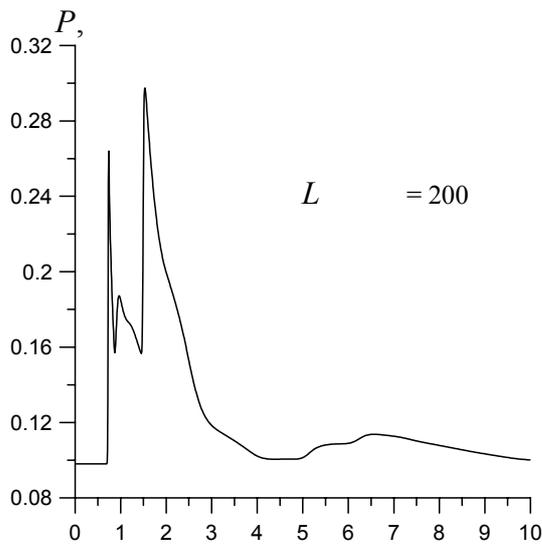


Рис. 11. Динамика изменения давления в сопряжении

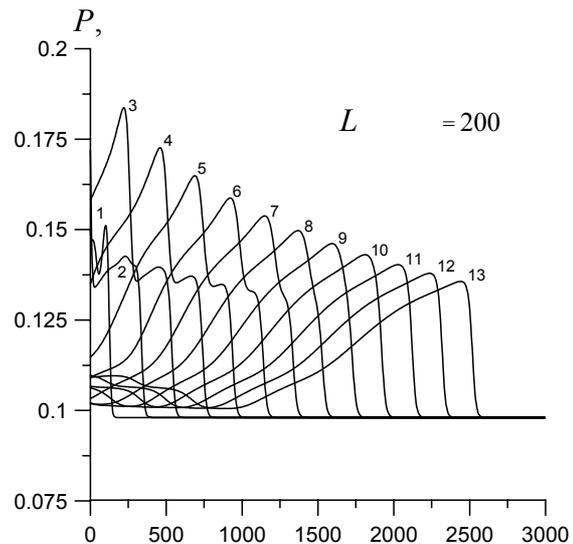


Рис. 12. Динамика изменения давления в волне

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных теоретических исследований решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке «Методики газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» и исследовании волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвлённой сети горных выработок. Внедрение результатов исследований повышает эффективность и безопасность ликвидации подземных аварий.

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

1. Современная угольная шахта представляет собой сложную разветвлённую сеть горных выработок большой протяжённости. Взрыв в одной из таких выработок всегда приводит к формированию серии воздушных ударных волн.

2. Установлено, что на величину взрывобезопасного расстояния при взрывах в угольных шахтах сильное влияние оказывают волновые эффекты, возникающие в разветвлённой сети горных выработок при формировании, распространении, отражении и взаимодействии воздушных ударных волн, волн сжатия и волн разрежения.

3. Усовершенствован газодинамический метод для расчёта волновых процессов в разветвлённой сети горных выработок любой сложности. Он основан на решении системы нестационарных уравнений газовой динамики, где в правых частях учитываются процессы силового и теплового взаимодействия газового потока со стенками выработок.

4. Разработан универсальный алгоритм расчёта потокораспределения газа по сети горных выработок, автоматически учитывающий пространственные углы соединений выработок, направления потоков в них и взаимодействие двух и более потоков, сходящихся в сопряжениях.

5. Установлено, что давление в воздушных ударных волнах, распространяющихся по горным выработкам, существенно зависит от точки инициирования и места расположения объёма. На расстояниях, превышающих размеры этого объёма в три-пять раз, интенсивность ударной волны определяется энергией взрыва, не зависит от формы начального распределения давления и может быть рассчитана на основе простейшей модели мгновенного взрыва.

6. Получен коррелирующий коэффициент $\kappa = 3.0 \ln(\alpha) + 19.2$, позволяющий рассчитывать затухание воздушных ударных волн на прямолинейных участках горных выработок с учётом коэффициента их аэродинамического сопротивления α .

7. При сильном взрыве на расстоянии ≤ 200 м от груди забоя в тупиковой выработке всегда образуется серия отражённых от поверхности забоя волн. Причём, первая отражённая волна – ударная, все последующие – волны сжатия. Первая отражённая волна по интенсивности всегда превосходит головную и обязательно её догоняет, последующие – не догоняют. Зарождение отражённых волн сжатия обусловлено периодическим формированием у груди забоя волн разрежения, формирующих обратный, в сторону тупика, поток газа.

8. Если тупиковая выработка имеет крутой поворот или сопряжение с другой выработкой, то в тупике формируются встречные, отражённые от груди забоя и сопряжения волны. В результате в тупике происходит сложный колебательный процесс из встречающихся и расходящихся волн. Причём, отражённые от сопряжения волны, гасят образование зон пониженного давления вблизи груди забоя и формирование обратного тока газа. От поверхности забоя отражаются только пришедшие от сопряжения волны.

9. Сопряжения с тупиковой выработкой любой длины оказывают влияние на проходящую мимо неё УВ. Тупиковая выработка при любой её ориентации относительно главной, по которой проходит УВ, является своеобразным резервуаром, в который уходит часть газа. Это приводит к некоторому ослаблению распространяющейся УВ. Степень ослабления зависит от размеров тупиковой выработки.

10. При переходе потока, втекающего в тупиковую выработку длиной 100 м и более, в дозвуковой режим возникает эффект торможения сверхзвукового потока, подходящего к этой выработке. В сопряжении с тупиковой выработкой наблюдается повышение давления с выходом из него слабой волны сжатия, которая затем поглощается вышедшей из тупика более сильной отраженной волной.

11. Разработана методика численного решения системы газодинамических уравнений, в основу которой положен метод С.К. Годунова, использующий решение задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа для определения потоков массы, импульса и энергии на границах расчётных ячеек. Методика утверждена Госгортехнадзором РФ и находится в опытно-промышленной эксплуатации в ВГСЧ угольной промышленности.

12. Разработан программный комплекс «Ударная волна» автоматизирует расчёт распространения поражающих факторов взрыва, исключает «человеческий фактор» появления вычислительных ошибок, позволяет быстро оценивать аварийную ситуацию целиком во всех её взаимосвязях, повышая уровень обоснованности принимаемых в ходе ликвидации аварий управляющих решений. С его помощью создан банк данных трёхмерных координат горных выработок угольных шахт Российской Федерации. Программный комплекс «Ударная волна» имеет сертификат Госгортехнадзора РФ, используется ВГСЧ и экспертными комиссиями при ликвидации и расследовании аварий на угольных шахтах

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Крайнов А.Ю. Программный комплекс для расчёта распространения ударных волн по горным выработкам // Материалы докладов IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах». – Кемерово, 2000. – С. 143–145.

2. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Мячин В.В., Костеренко В.Н. Оценка влияния волновых эффектов распространения ударных волн на величину взрывобезопасного расстояния // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах». – Кемерово, 2000. – С. 143-145.

3. Лукашов О.Ю., Палеев Д.Ю. Применение двух- и трёхмерного компьютерного представления сети горных выработок при моделировании аварийных ситуаций в угольных шахтах // Материалы VI Международной конференции «Современные методы математического моделирования природных и техногенных катастроф». – Красноярск, 2001. – С. 228–232.

4. Васенин И.М., Крайнов А.Ю. Шрагер Э.Р., Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Газодинамический метод расчёта взрывобезопасных расстояний при взрывах в угольных шахтах // Труды научных мероприятий «Природно-техногенная безопасность Сибири»: Доклады VI Международной конференции «Современные

методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». – Красноярск, 2001. – Т. 1. – С. 244–253.

5. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. Горение пылегазовой смеси при распространении ударных волн по горным выработкам // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – Кемерово, 2001. – С. 87-89.

6. Палеев Д.Ю., Костеренко В.Н., Лукашов О.Ю. Методика и программа расчёта параметров воздушных ударных волн и взрывобезопасных расстояний // Всероссийской научно-практической конференции «Промышленная безопасность»: Тезисы докладов. – Москва, 2001. – С. 90-92.

7. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н., Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. Взаимодействие ударных волн с водяными и сланцевыми заслонами // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 7.

8. Лукашов О.Ю., Палеев Д.Ю., Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Шрагер Э.Р., Костеренко В.Н. Комплекс программ для решения задач вентиляции, расчета распространения воздушных ударных волн по выработкам и водоснабжения шахт // Доклады XII Международной Конференции по Вычислительной Механике и Современным Прикладным Системам (ВМСПС '2003). – Владимир, 2003. – С. 137–138.

9. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. Расчет затухания ударных волн при взрывах метана в шахтах с учетом взрывозащитных сооружений // Труды Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». – Кемерово, 2003. – С.105-106

10. Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Палеев Д.Ю., Шрагер Э.Р. Влияние места взрыва метановоздушной смеси на интенсивность ударной волны в горной выработке // Доклады VII Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». – Красноярск, 2003.

11. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Затухание давления воздушной ударной волны на прямолинейных участках горных выработок // Вопросы безопасности труда на горных предприятиях: Сборник научных трудов, посвящённый 70-летию со дня рождения д.т.н. В.Н. Пузырёва/ КузГТУ.- Кемерово, 2003.

12. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Распространение поражающих факторов взрыва в сети горных выработок// Вопросы безопасности труда на горных предприятиях: Сборник научных трудов, посвящённый 70-летию со дня рождения д.т.н. В.Н. Пузырёва / КузГТУ.- Кемерово, 2003.

13. Paleev D.Y., Lukashov O.Y., Vasenin I.M., Krainov A.Y., Shragher E.R. The gasdynamic method of calculation of explosion-proof distances after explosion during explosions of methane-air mixture in mines with regard to explosion protective structures// 30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Johannesburg, 2003).