

На правах рукописи

Астанин Александр Владимирович

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОМЕРНЫХ ЗАДАЧ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ВЗРЫВА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ

01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск — 2005

Работа выполнена в Томском государственном университете.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Глазунов А. А.

доктор физико-математических наук,
профессор
Ткаченко А. С.

Ведущая организация: Институт угля и углехимии СО РАН

Защита состоится “ 23 ” сентября 2005г. в 14 ч. 00 мин.
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 “ 19 ” августа 2005г.

Учёный секретарь Диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Нарушение технологии угледобычи в угольных шахтах влечет за собой аварийные ситуации, часто проявляющиеся в виде взрывов метановоздушных или пылеуглеметановоздушных смесей. Особо опасны для жизни людей взрывы, возникающие во время горноспасательных работ, так как существует угроза формирования объемов газа с взрывоопасной концентрацией метана из-за нарушения системы вентиляции. В таких условиях требуется оперативность и точность прогнозирования расстояний, на которых пребывание шахтеров и горноспасателей будет безопасным. В связи с этим, исследования, направленные на детальное изучение прохождения ударных волн через повороты, пересечения, загромождения горных выработок, через дисперсные защитные сооружения, парашютные перемычки, а так же расчет выброса метана при прохождении ударной волны являются актуальными.

Исследования выполнялись по плану Томского государственного университета, тематике Научно-образовательного Центра "Физика и химия высокоэнергетических систем" и по договорам с Российским научно-исследовательским институтом горноспасательного дела (РосНИИГД).

Цель работы. Основными целями работы являются:

- Исследовать распространение ударных волн в горных выработках с учетом их сложной геометрии в двумерной и трехмерной постановках;
- Построить физико-математическую модель и провести исследования взаимодействия ударных волн с выработанными пространствами, заполненными обрушенными породами;
- Провести аналитические и численные исследования газодинамических процессов, возникающих при взаимодействии ударной волны взрыва с защитной дисперсной преградой с учетом влияния различных факторов.

Задачи исследований:

1. Провести исследования газодинамических процессов, возникающих при распространении ударных волн через места поворотов,

- пересечений, загромождений горных выработок, через парашютные перемычки в двумерной постановке;
2. Провести исследования волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн через пересечения горных выработок в трехмерной постановке;
 3. Исследовать влияние ударной волны на вытеснение метана из обрушенных пространств выработок;
 4. Исследовать затухание ударной волны при прохождении пылевых и водных защитных перемычек.

Апробация работы. Результаты работы по мере их получения докладывались и обсуждались на Международной конференции "Математические модели и методы их исследования" (Красноярск, 2001г.), VI международной конференции "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф" (Красноярск, 2001г.), IV Международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири" (Кемерово, 2001г.), II Всероссийской научной конференции молодых ученых "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (Томск, 2001г.), Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2002г.), XLI Международной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, 2003г.), Международной конференции "VII Забабахинские научные чтения" (Снежинск, 2003г.), I Всероссийской конференции молодых ученых "Физика и химия высокоэнергетических систем" (Томск, 2005г.).

Научная новизна работы. В работе показано, что течение газа в области сопряжений и поворотов горных выработок имеет сложный характер и для корректного определения коэффициента затухания в каждом случае необходимы тщательные исследования, в том числе численные. Так же показано, что измерять давление газа для определения коэффициента затухания ударной волны при прохождении сопряжения следует в некотором сечении, расположение которого можно выбирать в результате численных расчетов.

Построена физическая и математическая модель взаимодействия ударной волны взрыва в угольных шахтах с выработанным пространством. Исследования в этом направлении позволили рассчитать объемы выброса метана при взаимодействии ударной волны взрыва с выработанным пространством. Хотя о наличии подобных выбросов известно было давно, количественные результаты, позволяющие оценивать эти выбросы, получены впервые.

В ходе исследований показана правомерность использования равновесной модели двухфазной среды при расчетах взрывозащитных пылевых и водных перемычек. Показано, что волны давления, в которые превращается ударная волна внутри перемычки, многократно отражаются от её границ, постепенно затухая за счет ухода слабых преломленных волн. Построена модель, учитывающая распыление водоналивных перемычек во времени. Показано, что времена распыления водных заслонов влияют на характер течения, однако на давления за перемычкой влияют слабо. Добавление поверхностно-активных веществ при создании водоналивных перемычек так же не приводит к заметному понижению запреградного давления. Основным фактором понижения давления является масса перемычки.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается корректностью физико-математических постановок, сравнением с результатами расчетов проведенных другими авторами и с экспериментальными данными.

Практическая значимость Результаты исследований взаимодействия ударных волн с сопряжениями, поворотами и пересечениями горных выработок позволяют уточнять имеющиеся данные, используемые в расчетах взрывобезопасных расстояний в угольных шахтах.

Полученные в диссертации оценки объемов вытесненного метана при прохождении ударных волн через обрушенные пространства позволяют рассчитывать возможность повторных взрывов и уточнять взрывобезопасные расстояния, что можно использовать при оценках безопасности работ в угольных шахтах.

Полученные результаты по моделированию взаимодействия ударных волн с дисперсными взрывозащитными перемычками вошли в "Аналитическую инженерную методику оценки затухания ударных волн при их прохождении через защитные сооружения", утвержденную 02.03.2003г. Госгортехнадзором России.

Положения, выносимые на защиту:

1. Картина течения при прохождении ударной волны через сопряжения и повороты горных выработок весьма сложна и поэтому значение коэффициента затухания ударной волны существенно зависит от места измерения параметров газа;
2. Прохождение ударных волн через выработанные пространства, заполненные обрушенными породами, а так же взрывы внутри этих пространств способны вытеснять объемы метана.
3. При взаимодействии ударной волны с водной или пылевой перемычкой волны давления, в которые превращается ударная волна внутри преграды, многократно отражаются от её границ, постепенно затухая за счет ухода слабых преломленных волн.
4. При взаимодействии ударной волны с водоналивной или пылевой перемычкой основным фактором, влияющим на понижение давления за преградой является масса перемычки.
5. Времена диспергирования защитной водной перемычки влияют на характер течения, однако на давление за перемычкой оказывают слабое влияние.
6. При взаимодействии ударных волн с системой, состоящей из водоналивной или пылевой перемычки и твердой преграды, процесс носит существенно волновой характер и поэтому может быть рассчитан путем численного решения уравнений газовой динамики.

Публикации Основное содержание работы отражено содержание работы изложено в статьях, докладах и тезисах [1-11].

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 153 страницах машинописного

текста, включая 65 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 114 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту и описана структура диссертации.

В первой главе (п.1.1) приведен краткий обзор существующих работ связанных с изучением формирования и распространения взрывов в горных выработках.

Метан, выделение которого сопряжено с добычей угля, смешиваясь вместе с кислородом образует горючую смесь. Горение такой смеси в угольной шахте может перейти в детонацию с образованием ударных волн, которые представляют опасность для жизни шахтеров и горноспасателей. Скорость детонации газовой смеси зависит от ее состава и изменяется в широких пределах, в несколько раз превышая скорость звука в этих смесях в исходном состоянии.

Степень поражения человека при воздействии ударных волн определяется давлением ударной волны, временем спада давления и удельным импульсом ударной волны взрыва, которые зависят от энергии взрыва и расстояния до центра взрыва.

Задачи теории взрыва имеют весьма сложную структуру решения. Для взрывных течений характерно чрезвычайно высокая нестационарность, одновременное наличие в потоке очень больших и очень малых плотностей, давлений, температур, положительных и отрицательных скоростей, больших пространственных и временных градиентов этих величин.

Для решения одномерных и двумерных задач о взрыве широкое распространение получили конечно-разностные методы. Один из высокоэффективных конечно-разностных методов явного типа был предложен С.К. Годуновым для расчета одномерных нестационарных течений со сложной структурой. Позже этот метод был обобщен на двух

и трехмерные случаи.

Метод Годунова физичен и допускает использование подвижных и неподвижных, а так же равномерных и неравномерных сеток. Стоит отметить, что, несмотря на все преимущества, метод Годунова имеет первый порядок точности.

В последнее время большие достижения в моделировании распространения ударных волн взрыва в угольных шахтах были получены благодаря применению газодинамических методов и компьютерного моделирования Д.Ю. Палеевым, А.Ю. Крайновым, Э.Р. Шрагером, И.М. Васениным и Лукашовым О.Ю. В работах проводились исследования распространения ударных волн взрыва по сети горных выработок с учетом различных факторов. Для расчета распространения ударных волн по горным выработкам использовалась одномерное приближение, в то же время в местах сопряжения выработок использовалась одна трехмерная ячейка.

С целью повышения безопасности работ горноспасателей и шахтеров используют взрывозащитные перемычки — они представляют собой перегородку выработки из прочных материалов и требуют много времени на возведение. Для уменьшения избыточного давления во фронте ударной волны возможно использование дисперсных перемычек, выполненные в виде подвешенных мешков с водой или инертной пылью. При взаимодействии ударной волны с такими перемычками происходит распыление конденсированной фазы и возникает двухфазное течение с жидкими и твердыми частицами. Возникает вопрос о разработке методики расчета таких перемычек.

В п. 1.2 кратко рассмотрены существующие методы расчёта взрывобезопасных расстояний. С 1997 до 2003 года в России действовала методика В.М. Плотникова, основанная на упрощенных аналитических соотношения, допускающих ручной счет. Методика опирается на данные представленные в СНиП 2.01.54-84. Основным выходным параметром расчета является давление во фронте ударной волны, распространяющейся по одному маршруту.

С 2003 года в России действует "Методика газодинамического

расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли". Для расчета распространения воздушной ударной волны по участкам выработок используются одномерные дифференциальные уравнения газовой динамики, в которых учитываются процессы силового и теплового взаимодействия газового потока со стенками выработки. В местах сопряжения горных выработок под различными углами течение газа описывается трехмерными дифференциальными уравнениями газовой динамики. Расчет ведется на персональном компьютере по специальной программе, автоматизирующей весь ход вычислительного процесса и позволяющей рассчитывать давление, плотность и температуру в горных выработках в любой момент времени.

Обзор современного состояния математического моделирования взрывов смесей, методов расчета взрывобезопасных расстояний и взрывозащитных сооружений в угольных шахтах показывает, что в результате применения газодинамических методов и компьютерного моделирования в последние годы произошел качественный скачок в исследованиях подземной газовой динамики взрывов. Тем не менее, существует очень много вопросов, требующих дополнительных исследований, а такая проблема как выбросы метана практически не изучена. Поэтому целью данной диссертации являлось совершенствование методов расчета распространения ударных волн в горных выработках угольных шахт и учета их влияния на возможные выбросы метана .

В главе 2 поставлена задача о распространении ударных волн взрыва через сопряжения, повороты, пересечения, загромождения горных выработок, а так же через парашютные перемычки. В п.2.1 приводится математическая постановка задачи распространения ударной волны взрыва через сопряжения и повороты горных выработок в двумерной постановке. Течение среды, в которой параметры течения терпят разрыв, описываются в плоском случае интегральными законами сохранения в виде:

$$\int \int \vec{\sigma} dx dy + \vec{a} dy dt + \vec{b} dx dt = 0, \quad (1)$$

где

$$\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix} \quad \vec{a} = \begin{bmatrix} \rho u \\ P + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e + P)u \end{bmatrix} \quad \vec{b} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ P + \rho v^2 \\ (e + P)v \end{bmatrix}$$

ρ — плотность, $\vec{u} = (u, v)$ — вектор скорости, P — давление, $e = \rho(\varepsilon + (u^2 + v^2)/2)$ — полная энергия. Система уравнений (1) замыкается уравнением состояния, которое в случае идеального газа имеет вид

$$\varepsilon = P / [(k - 1) \rho] \quad (2)$$

где k — показатель адиабаты. В расчетах перед ударной волной в начальный момент времени задавались параметры покоящейся атмосферы. За ударной волной заданной интенсивности параметры газа в начальный момент времени рассчитывались с помощью соотношения на прямом скачке. Величина скорости газа $|\vec{u}|$ за ударной волной находилась по формуле

$$|\vec{u}| = \sqrt{\frac{2}{k} \frac{(P_2/P_1 - 1) c}{\sqrt{(k - 1) + (k + 1) P_2/P_1}}} \quad (3)$$

где c — скорость звука перед ударной волной. Плотность рассчитывалась по уравнению Гюгонио

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(k - 1) + (k + 1) P_2/P_1}{(k + 1) + (k - 1) P_2/P_1} \quad (4)$$

В качестве граничных условий на стенках выработанного пространства использовались условия непротекания $(\vec{u}, \vec{n}) = 0$, где \vec{n} — единичная нормаль к границе. Решение задачи проводилось численно методом Годунова с использованием ограничителя minmod.

В ходе работы проводились исследования изменения осредненного по сечению коэффициента затухания при удалении от сопряжения. Было показано, что коэффициенты затухания в этом случае слабо меняются при удалении от сопряжения выработок, однако имеют свои максимумы.

В работе были проведены исследования влияния места расположения точек измерения давления на коэффициент затухания. На рисунке 1 представлена схема расположения таких точек. Точки 1, 2 и 3 располагались непосредственно на линии границы основного и

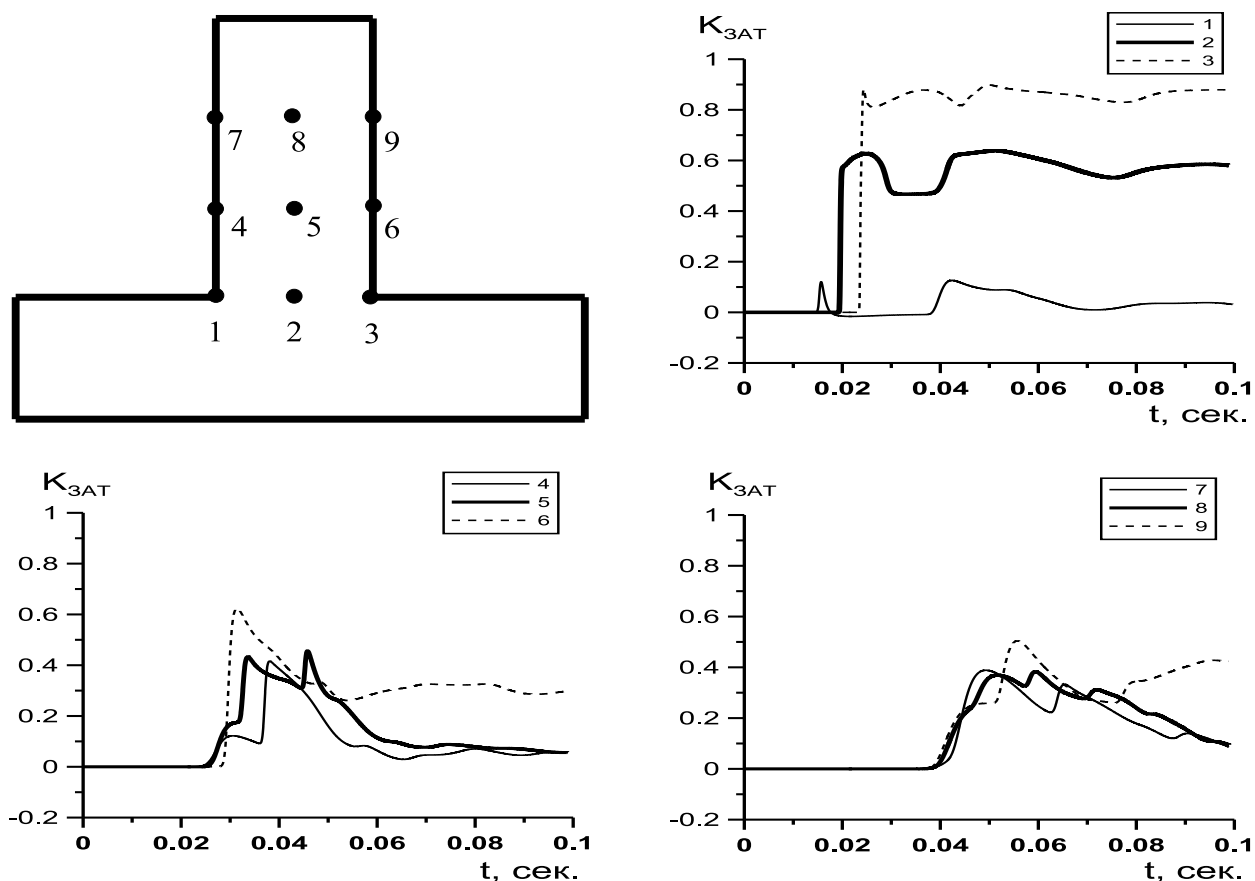


Рис. 1. Схема расположения точек измерения давления и значения коэффициента затухания с течением времени в этих точках

примыкающего каналов, при этом точка 2 располагалась в середине отрезка 1-3. Точки 7, 8 и 9 располагались в том ортогональном канале сечения, в котором осредненное по ширине выработки значение $K_{\text{ЗАТ}}$ имело максимальное значение. Расчеты показали, что это точки 7, 8 и 9 необходимо поместить на расстоянии 10 метров от начала примыкающего канала. Значения коэффициента затухания с течением времени в этих точках представлено на трех графиках. Легко заметить, что максимальное значение (~ 0.9) $K_{\text{ЗАТ}}$ принимает в точке 3 — ударная волна отражается маховским образом от поверхности выработки. В точке 1 $K_{\text{ЗАТ}}$ принимает даже отрицательные значения, что обусловлено дифрагированием ударной волны на угле. В точках 4, 5, 6 и 7, 8, 9 разброс значений коэффициента затухания заметно меньше.

В дальнейших исследованиях использовалось значение коэффициента затухания, осредненное по ортогональному сечению выработки. В ходе работы были проведены расчеты $K_{\text{ЗАТ}}$ для различных

углов сопряжений и различных отношений сечений горных выработок.

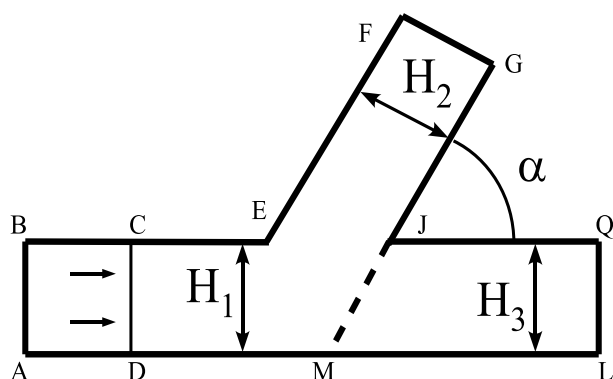


Рис. 2. Область сопряжения горных выработок

В таблице 1 приведена небольшая часть полученных результатов. Обозначения для этой таблицы представлены на рисунке 2. Величина $K_{\text{зат}2}$ измерялась в боковой выработке, $K_{\text{зат}3}$ — в продолжении прямой выработки. Значения, представленные в круглых скобках получены по газодинамической методике, значение в фигурных — по методике В.М. Плотникова.

Следует отметить, что в целом результаты двумерного моделирования коррелируют с результатами, представленными для сравнения.

Таблица 1.

$H_1 : H_2 : H_3$	α	$K_{\text{зат}2}$	$K_{\text{зат}3}$	$H_1 : H_2 : H_3$	α	$K_{\text{зат}2}$	$K_{\text{зат}3}$
5:5:5	90	0.378 (0.25) {0.30}	0.862 (0.86) {0.80}	5:2:5	90	0.378 (0.39) {0.43}	0.862 (0.86) {0.8}
	120	0.349 (0.27) {0.25}	0.864 (0.85) {0.835}		120	0.321 (0.38) {0.34}	0.937 (0.85) {0.833}
	60	0.475 (0.42) {0.40}	0.827 (0.79) {0.73}		60	0.425 (0.63) {0.62}	0.92 (0.79) {0.73}
$H_1 : H_2 : H_3$	α	$K_{\text{зат}1}$	$K_{\text{зат}2}$	$H_1 : H_2 : H_3$	α	$K_{\text{зат}1}$	$K_{\text{зат}2}$
2:5:5	90	0.16 (0.13) {0.157}	0.50 (0.82) {0.42}	2:2:5	90	0.09 (0.25) {0.3}	0.54 (0.87) {0.88}
	120	0.093 (0.165) {0.13}	0.51 (0.78) {0.43}		120	0.08 (0.27) {0.25}	0.52 (0.82) {0.42}
	60	0.26 (0.21) {0.207}	0.48 (0.75) {0.38}		60	0.24 (0.42) {0.4}	0.51 (0.75) {0.43}

В п.2.2 представлены исследования распространения ударной волны через пересечение горных выработок в трехмерной постановке.

Полученные при расчетах значения коэффициента затухания качественно совпадают с данными, представленными в СНиП 2.01.54-84.

В работе (п. 2.3) так же проведены исследования прохождения ударных волн через парашютные перемычки горных выработок в плоской постановке. Численное моделирование показало, что результаты качественно согласуются с результатами других авторов. Расчеты прохождения ударных волн через загромождения горных выработок показали, что длина завала оказывает слабое влияние на величину давления после преграды. Основным фактором, влияющим на понижение давления является отношение проходного сечения для ударной волны к сечению выработки.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что расположение точки измерения давления при исследовании прохождения ударной волны через сопряжения, повороты, пересечения, загромождения горных выработок и через парашютные перемычки может влиять на коэффициент затухания и приводить к существенно различным результатам. Измерять давление газа для расчета коэффициента затухания ударной волны при её прохождении через сопряжения, повороты и пересечения следует в некотором сечении, расположение которого можно выбирать в результате численных расчетов.

В главе 3 поставлена и решена задача о взаимодействии ударных волн с обрушенным пространством, заполненным метаном и проведен анализ полученных результатов. Примерная картина вертикального сечения выработанного пространства, сопряженного с горной выработкой, имеет вид, показанный на рисунке 3. На этом рисунке заштрихованная область,



Рис. 3. Вертикальное сечение выработанного пространства

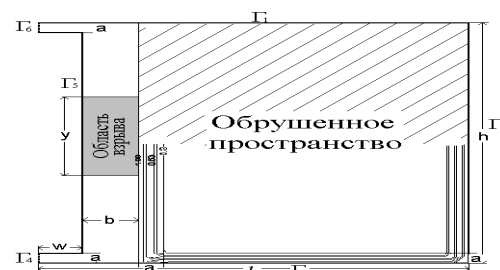


Рис. 4. Расчетная область

отмеченная индексом "1", обозначает часть сечения выработанного пространства, заполненного обрушенными породами, область "2" свободна от породы, а индекс "3" обозначает сечение горной выработки. Свободное от породы пространство "4" образуется из-за среза породы, возникающего при подготовительных работах.

Интегральные законы сохранения массы, импульса, энергии, применяемые в теории фильтрации газов и жидкостей имеют следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \varepsilon d\Omega + \int_S \varepsilon \rho (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \varepsilon \vec{u} d\Omega - \int_{\Omega} p \operatorname{grad} \varepsilon d\Omega + \int_S \varepsilon \rho \vec{u} (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} \vec{F}_c d\Omega \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \varepsilon \left(e + \frac{|\vec{u}|^2}{2} \right) d\Omega + \int_S \rho (\vec{u} \cdot \vec{n}) \varepsilon \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{|\vec{u}|^2}{2} \right) dS = \int_{\Omega} \dot{q}_{\text{тепл}} d\Omega \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \varepsilon \rho_m d\Omega + \int_S \varepsilon \rho_m (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (8)$$

$$\vec{F}_c = - \left(\frac{150 \eta u (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75 \rho u^2 (1 - \varepsilon)}{d \varepsilon^3} \right) \quad (9)$$

Здесь ρ — плотность газа; ε — пористость обрушенных пород; $(\vec{u} \cdot \vec{n})$ — скалярное произведение скорости газа \vec{u} и вектора единичной нормали \vec{n} к поверхности S ; p — давление; e — удельная внутренняя энергия (известная функция p и ρ); F_c — объемная сила сопротивления пористой среды; $q_{\text{тепл}}$ — поток тепла между газовой фазой и породным скелетом.

Так как поставленная задача является достаточно сложной для решения в трехмерной постановке, то она решалась численно в плоском случае, пренебрегая изменениями параметров по высоте выработки. Расчетная область представлена на рисунке 4. Разрывы пористости в данной постановке задачи не предполагались, поэтому, от границ до центра обрушенного пространства ε менялась по линейному закону. На границах $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_5$ выставлялось граничное условие непротекания $(\vec{u}, \vec{n}) = 0$. На границах Γ_4, Γ_6 задача состыковывалась с одномерной.

В качестве начальных условий во всей области задавалось

атмосферное давление и плотность при температуре 20 °С. Ударная волна взрыва задавалась в центре выработки, показанной на рисунке 4 серым прямоугольником. Концентрация метана задавалась только в обрушенном пространстве и принималась равной 1.

Поставленная задача решалась численно методом Годунова. В задаче исследовалась массовая доля выделившегося метана из обрушенного пространства с течением времени. На рисунке 5 представлена зависимость доли вытесненного метана с течением времени для различных характерных диаметров частиц породы. Жирной сплошной линией показана зависимость для частиц диаметром 4,76 м; тонкой сплошной – 0,476 м; жирной прерывистой – 0,0476 м; тонкой прерывистой – 0,00476 м. Расчеты показывают существенное влияние размеров частиц породы на количество вытесненного метана и скорость его вытеснения. Размер области в этом расчете составляли 100 м на 100 м.

На таком же участке обрушенного пространства изучалось влияние интенсивности первоначальной ударной волны взрыва на долю вытесненного метана (рис. 6). Тонкой сплошной линии соответствует ударная волна с интенсивностью 2 (отношение давления за ударной волной к атмосферному); тонкой прерывистой – интенсивность 4; жирной прерывистой – интенсивность 6. Из графиков видно, что при увеличении интенсивности ударной волны взрыва, количество вытесненного метана из обрушенного пространства так же увеличивается.

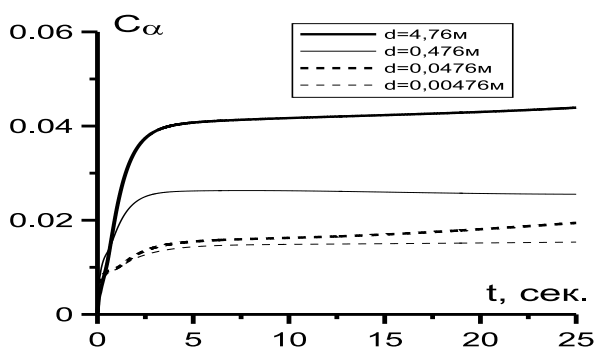


Рис. 5. Вытеснение метана для различных диаметров частиц породы

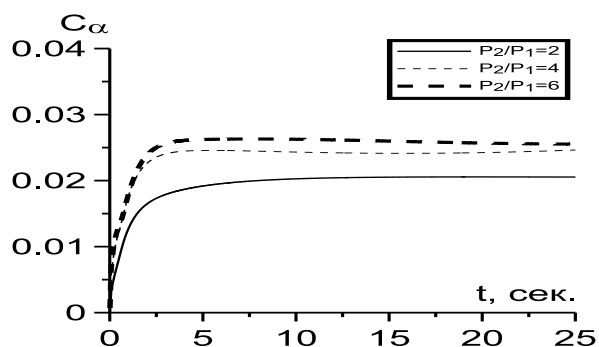


Рис. 6. Вытеснение метана при различной интенсивности ударной волны взрыва

В данной работе проводились исследования влияния взрыва внутри

обрушенного пространства на количество вытесненного метана. На рисунке 7 схематично представлены варианты расположения областей взрывов (квадрат со стороной 10 м с давлением 6 атмосфер). На графиках (рис. 8) представлены зависимости массовой доли вытесненного метана от времени с течением времени для различных вариантов взрыва. Отчетливо видно, что чем ближе область взрыва к области, свободной от обрушенных пород, тем больше метана может быть вытеснено. Для вариантов взрыва 4,5 и 6 количество вытесненного метана слабо различается, однако взрыв, который находится ближе к границе обрушенных пород, вытесняет немного меньшее количество метана, чем взрывы расположенные глубже в обрушенном пространстве.



Рис. 7. Схема расположения взрывов

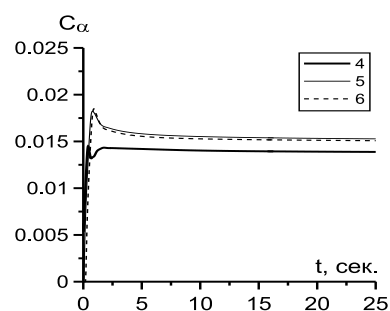
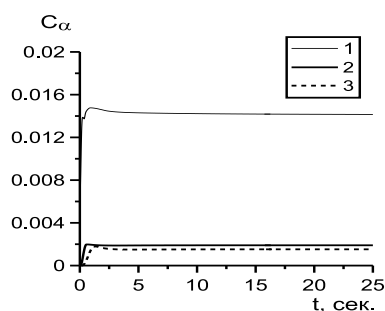


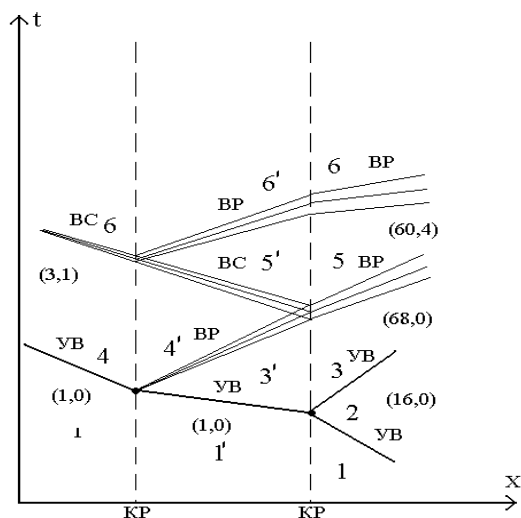
Рис. 8. Вытеснение метана для различных вариантов взрыва

В главе 4 поставлена задача о взаимодействии ударных волн взрыва с водоналивными и пылевыми взрывозащитными перемычками. В п. 4.1 проведена оценка параметров физических процессов, сопровождающих прохождение ударной волны через двухфазную среду водных и пылевых защитных перемычек. Показано, что частицы с размерами, используемыми в расчетах, имеют скорости и температуры практически совпадающие со скоростью и температурой газа.

В п. 4.2 приведена равновесная модель двухфазного течения газа с частицами с учетом объема, занимаемого конденсированной фазой.

В п. 4.3 проведены аналитические исследования прохождения ударной волны через защитную перемычку. Картину взаимодействия волн и контактных разрывов в плоскости (x, t) изображена на рис. 9. На этом рисунке изображена система волн, возникающих при взаимодействии

УВ с защитной преградой. Наряду с аббревиатурой названия волн, контактных разрывов и номерами областей на этом рисунке в скобках приведены значения давления в атмосферах, которые получаются при



взаимодействию с преградой исходной УВ с давлением 16 атм. Видно, что при проникновении за преграду начальная ударная волна ослабляется до 3,1 атм. Но, если вслед за исходной УВ не движется сильная волна разрежения, то вслед за первичной УВ влево может проникнуть волна сжатия, которая усилит исходящую волну.

Результаты аналитических расчетов подтверждаются численными исследованиями. В п. 4.4 представлена численная методика расчета

Рис. 9. Картина взаимодействия УВ с дисперсной перемычкой

взаимодействия ударных волн взрыва с пылевыми и водными защитными преградами. Постановка задачи выглядит следующим образом: в области $a < x < b, t > 0$ требуется найти обобщенное решение уравнений

$$\oint_{\Gamma} \rho dx - \rho u dt = 0; \quad (10)$$

$$\oint_{\Gamma} \rho_s dx - \rho_s u dt = 0; \quad (11)$$

$$\oint_{\Gamma} \rho u dx - (P + \rho u^2) dt = - \iint_S F_c dx dt; \quad (12)$$

$$\oint \rho \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) dx - \left[Pu + \rho u \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right] dt = - \iint_S Q dx dt; \quad (13)$$

$$\varepsilon = [c_g z + (1 - z) c_v] T; \quad (14)$$

$$\frac{P}{\rho} \left(1 - z \frac{\rho}{\rho_g} \right) = (1 - z) \frac{R}{\mu} T, \quad (15)$$

где ρ — плотность смеси газа и частиц, u — скорость смеси, ρ_s — масса частиц в единице объема, P — давление, ε — внутренняя энергия (известная функция P и ρ , $z = \rho_s/\rho$).

Сопротивление среды F_c вследствие трения среды о стенки горной

выработки и теплоотдача в стенки задаются соответственно формулами

$$F_c = c_f \Pi \frac{\rho u^2}{2}; \quad Q = \alpha \Pi (T - T_{cm})$$

где c_f — коэффициент трения, Π — периметр выработки, α — коэффициент теплоотдачи, T_{cm} — температура стенки.

Задача (10)–(15) решалась с начальными условиями

$$\begin{aligned} \rho(x, 0) &= \rho_0(x); & \rho_s(x, 0) &= \rho_{s0}(x); \\ u(x, 0) &= u_0(x); & P(x, 0) &= P_0(x); \\ \rho_s &= \rho_{s0} [\eta(x - x_0) - \eta(x - x_1)] \end{aligned} \quad (16)$$

где $\eta(x)$ — функция Хэвисайда, а плотность ρ вычислялась из формулы $1/\rho = z/\rho_{\text{в}} + (1 - z)/\rho_{\text{г}}$, где $\rho_{\text{в}}$ — плотность материала, из которого состоит конденсированная фаза, $\rho_{\text{г}}$ — масса газа в единице объема. Взрыв газа имитировался повышением давления и температуры на некотором участке $(x_2, x_3) \in (a, b)$.

Левая граница, условие на которой совпадают с данными неподвижной атмосферы, устанавливалась столь далеко от преграды, чтобы в течении заданного промежутка времени она не сказывалась на событиях в окрестности преграды. За преградой на правой границе может предусматриваться твердая стенка, имитирующая прочную преграду $u|_{x=b} = 0$.

На рис. 10 в некоторый момент времени приведена зависимость $P(x)$ для случая $z = 0,99$ и отношения давления в падающей ударной волне $\frac{P_2}{P_1} = 8$. На этом рисунке хорошо видна запреградная УВ и система волн сжатия, которая её нагоняет. В том случае, когда с преградой взаимодействует короткая УВ, до момента падения давления система запреградных волн сжатия не успевает образоваться. Зависимость $P(x)$ в этом случае, рассчитанная для ударной волны, за которой следует сильная волна разрежения, показана на рис. 11.

Затухание ударных волн при их взаимодействии с системой, состоящей из дисперсной защитной перемычки и твердой преграды рассмотрено в п.4.5. Результаты приведены в виде графиков, позволяющих при известном возможном давлении на прочной преграде вычислить

толщину перемычки и расстояние от перемычки до преграды. Представленные результаты вошли в "Аналитическую инженерную методику оценки затухания ударных волн при их прохождении через защитные сооружения", которая утверждена Госгортехнадзором России.

При взаимодействии ударных волн с водными защитными перемычками происходит превращение больших объемов воды в мелкие капли. В п.4.6 представлен газодинамический метод расчета взаимодействия ударной волны с защитными преградами с учетом потерь энергии на образование новой поверхности. Результаты расчетов показали, что учет работы на дробление воды приводит к понижению давления за водной перемычкой с концентрацией воды 100кг/м^3 на 7%, а при концентрации 30кг/м^3 — всего на 2%.

В реальных условиях жидкость не мгновенно дробится потоком, на разрушение требуется определенное время, называемое временем задержки. В работе показано, что чем раньше наступает дробление капель, тем больше понижается давление в моменты времени близкие к начальному. Вместе с тем окончательный результат понижения давления за водяной завесой практически не зависит от времени дробления.

На параметры разбрызгиваемой воды можно влиять добавляя в нее поверхностно-активные вещества, которые на порядок уменьшают коэффициент поверхностного натяжения. Однако, результаты расчетов показали, что для жидкостей, имеющих в 1000 раз большее и в 1000 раз меньшее значение коэффициента поверхностного натяжения, чем для

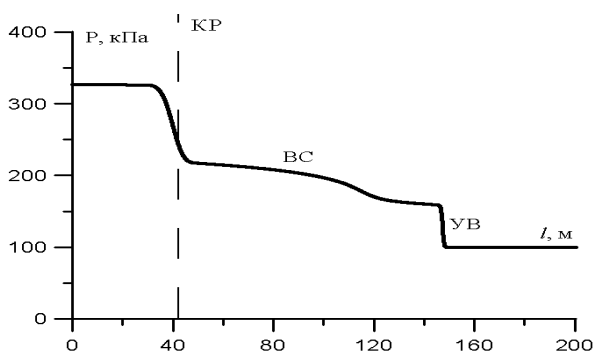


Рис. 10. Распределение давления за дисперсной преградой и проникновение волн сжатия

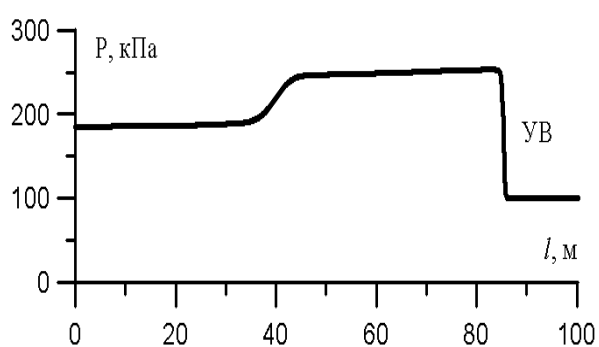


Рис. 11. Распределение давления за дисперсной преградой в случае короткой ударной волны

воды, запреградное давление практически не различается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основании выполненных теоретических исследований решена актуальная задача, заключающаяся в исследовании газодинамических процессов, влияющих на безопасность работы шахтеров и горноспасателей.

На основе проведенных в работе исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Результаты двумерного газодинамического расчета коэффициента затухания ударной волны взрыва при прохождении через сопряжения и повороты горных выработок имеют хорошее соответствие с результатом, полученным в ходе экспериментальных исследований и в случае одномерного приближения.
2. Проведенные исследования газодинамических процессов в области сопряжения и поворота горной выработки показали, что место измерения давления может влиять на коэффициент затухания и приводить к существенно различным результатам.
3. Длина загромождения горных выработок оказывает слабое влияние на величину давления после преграды, особенно при малой высоте препятствия. Основным фактором, влияющим на запреградное давление является высота загромождения.
4. Волны взрыва в выработанном пространстве могут проникать в обрушенные породы угольной шахты в виде волны фильтрации и вытеснять из последнего значительное количество метана. В результате параметрических исследований найдено, что при прочих равных условиях, наибольшее влияние на количество вытесненного метана оказывают фильтрационные характеристики обрушенной породы: ее пористость и размеры частиц.
5. Волновая теория взаимодействия ударных волн с пылевыми и водными защитными перемычками позволила раскрыть физические процессы, происходящие при таком взаимодействии. В области перемычки ударная волна попадает в своеобразную ловушку,

ограниченную контактными разрывами. Волны давления, в которые превращается ударная волна внутри перемычки, многократно отражаются от её стенок, постепенно затухая за счет ухода слабых преломленных волн через границы.

6. Разработана "Аналитическая инженерная методика оценки затухания ударных волн при их прохождении через защитные сооружения" утвержденная 2 апреля 2003 года Госгортехнадзором России.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Аналитическая инженерная методика оценки затухания ударных волн при их прохождении через защитные сооружения/Астанин А.В., Васенин И.М., Горбатов В.А. и др. — Кемерово:Кузбассвузиздат, 2003. — 40с.
2. Астанин А.В., Палеев Д.Ю. Численное исследование влияния ударной волны взрыва на выброс метана из обрушенных горных пород//Математические модели и методы их исследования. Труды международной конференции. Под ред. В.К. Андреева и Ю.В. Шанько. Т.1/ Институт вычислительного моделирования СО РАН. Красноярск, 2001. — С.47-50
3. Астанин А.В., Васенин И.М., Игишев В.Г. Математическая модель взаимодействия ударной волны взрыва в горной выработке с водоналивными перемычками//Природно-техногенная безопасность Сибири: В 2 т. Т.1. Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: Тр. научн. мероприятий/ Научн. ред. Ю.И. Шокин, Н.А. Махутов , В.В. Москвичев. — Красноярск, ИПЦ КГТУ, 2001. — С.138-144
4. Астанин А.В., Васенин И.М., Палеев Д.Ю. Исследование влияния ударной волны взрыва на выброс метана в угольных шахтах//Природно-техногенная безопасность Сибири: В 2 т. Т.1. Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: Тр. научн. мероприятий/ Научн. ред. Ю.И. Шокин, Н.А. Махутов , В.В. Москвичев. — Красноярск, ИПЦ КГТУ, 2001. — С.138-144

5. Астанин А.В., Васенина Т.В. Взаимодействие ударных волн с взрывобезопасными преградами в горных выработках//Исследования по баллистике и смежным вопросам механики: Сб.статей/Под ред. И.Б.Богоряда. — Томск:Изд-во Том. ун-та, 2001. — С.4-5
6. Астанин А.В., Палеев Д.Ю. Численное исследование влияния ударной волны взрыва на выброс метана из обрушенных пород горных выработок//Материалы IV международной научно-практической конференции "СИБРЕСУРС — 2001"(27-29 ноября 2001г., Кемерово). — Кемерово: КузГТУ, 2001. — С.89-90
7. Астанин А.В., Васенин И.М. Численное исследование взаимодействия ударной волны с дисперсными взрывобезопасными перемычками //Исследования по баллистике и смежным вопросам механики: Сб.статей/Под ред. И.Б.Богоряда. — Томск:Изд-во Том. ун-та, 2002. — С.4-5
8. Астанин А.В. Исследование влияния взрывов на выброс метана из обрушенных пород горных выработок//Изв. вузов. Физика. Тематический выпуск. — 2004. — Т.47, № 10. — С.5-9
9. Астанин А.В. Численное моделирование распространения ударных волн в местах сопряжения горных выработок//Физика и химия высокоэнергетических систем: Сб. материалов I Всероссийской конференции молодых ученых (26-29 апреля 2005г., Томск). — Томск: Томский госуниверситет, 2005. — С.183-184
10. Астанин А.В. Численное исследование взаимодействия ударной волны взрыва с дисперсными защитными преградами//Тезисы Девятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-9). — Екатеринбург-Красноярск, 2003. — С.352-353
11. Анализ интенсивности ударных волн в горных выработках при различных типах взрывов/Астанин А.В., Васенин И.М., Крайнов А.Ю. и др.// Тезисы международной конференции "Забабахинские научные чтения". — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. — С.47