

УДК 622.82

В.А. Горбатов, И.М. Васенин, В.Г. Игишев, А.Ф. Син

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕВЫХ
И ВОДЯНЫХ ЗАСЛОНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА
ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫЕ ПЕРЕМЫЧКИ**

В шахтах России ежегодно возводятся около десяти тысяч перемычек. Согласно требованию п.203 Устава ВГСЧ [1], «... перемычки для изоляции пожарного участка в шахтах, опасных по газу метану и пыли, установленные во всех выработках на пути возможного распространения взрывной волны, конструктивно должны быть взрывоустойчивыми и выдерживать силу взрыва в изолированном пространстве, не разрушаясь и не теряя герметичности...». В приложении 13 к [1] даны параметры (толщина и расход гипсового вяжущего) взрывоустойчивых гипсовых перемычек с учетом прочности материала моноблока в возрасте 2 ч не менее 3 МПа и не менее 9 МПа.

На практике при возведении взрывоустойчивых перемычек используется только гипс с пределом прочности 3 МПа. При этом для выработки с сечением 10 м^2 (вчерне) толщина перемычки составляет 2,6 м, а расход гипса - 33 т. В Кузбассе ежегодно возводятся до 50-ти таких перемычек.

Перемычкам подобного типа присущи следующие недостатки:

- большой расход гипсового вяжущего и обусловленные этим высокие трудозатраты;
- длительный срок изоляции пожарного участка в условиях угрозы взрыва (достигает 24 ч и более);
- большие сроки и трудозатраты при разрушении взрывоустойчивых перемычек после ликвидации аварии и вскрытии участка для доработки.

Обоснованное уменьшение толщины взрывоустойчивых перемычек снижает отрицательные последствия этих негативных факторов. Уменьшить расход гипса можно за счет воздействия на интенсивность ударной волны (УВ) путем возведения водяных и пылевых

(песчаных) заслонов. Согласно экспериментальным замерам [2] при взаимодействии УВ с заслоном (перемычкой) в виде полиэтиленовых мешков с водой емкостью до 50 л, уложенных на специальном каркасе равномерно в поперечном сечении выработки, давление на фронте волны снижается от 4-х до 25-ти раз. Однако научной методической базы оценки этого эффекта до сих пор нет.

РосНИИГД совместно с Томским государственным университетом в 2001г. поставлена и решена задача взаимодействия УВ с взрывогасящими пылевыми и водяными заслонами. Задача решалась в два этапа. На первом этапе были проведены исследования релаксационных процессов, сопровождающих прохождение УВ через двухфазную среду защитных устройств. На втором этапе выполнены исследования влияния массовой концентрации частиц и длины заслона на величину запреградного давления.

Механизм взаимодействия УВ с пылевыми и водяными заслонами представляется следующим. Ударная волна распыляет конденсированную фазу и в пределах длины заслона возникает двухфазное течение с жидкими и твердыми частицами, имеющих размеры несколько микрон. По результатам оценок на первом этапе установлено, что для твердых и для жидких частиц размерами соответственно менее 0,025 мм и 0,005 мм время релаксации их тепловой и скоростной неравновесности с газовой фазой меньше характерного времени процесса взаимодействия УВ с заслоном.

Более крупные частицы не ускоряются газом и, по третьему закону Ньютона, в свою очередь, оказывают на газовую среду в УВ весьма слабое воздействие. В результате для

крупных частиц можно ожидать падения эффективности защитного заслона, через который газ будет протекать, «не замечая» их. Поэтому для расчетов на втором этапе использовалась равновесная модель двухфазного течения, в которой скорости и температуры частиц полагались равными соответствующим параметрам газовой фазы.

Законы сохранения для сжимаемых идеальных сред, к которым относится газ и равновесная двухфазная смесь, хорошо известны. Отметим только, что в случае существования разрывов, к которым принадлежат ударные волны и стационарные сильные разрывы на границах раздела газа и двухфазной смеси, правильная запись этих законов может быть осуществлена в виде интегральных законов сохранения, содержащих соответствующие обобщенные решения.

Пусть ρ - плотность смеси, u - ее скорость, $\varepsilon = c_v T$ - внутренняя энергия среды, P - давление, а все функции зависят только от координаты x и времени t . Тогда законы сохранения массы, импульса и энергии могут быть записаны в виде

$$\oint_{\Gamma} \rho dx - \rho u dt = 0 \quad (1)$$

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

$$\oint_{\Gamma} \rho \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) dx - \left[P u + \rho u \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right] dt = - \iint_S Q dx dt \quad (3)$$

Интегрирование в (1) - (3) ведется по замкнутым контурам целиком расположенным в области решения.

С физической точки зрения, равенство скоростей газа и частиц означает, что частицы движутся вместе с газом и поэтому их массовая доля в смеси (так же, как и массовая доля газа) остается неизменной.

Обозначим через p_s и p_g массы частиц и газа соответственно в единице объема, через ρ - массовую плотность смеси. Тогда отношение

$$z = \frac{\rho_s}{\rho} \quad \text{и} \quad (1-z) = \frac{\rho_g}{\rho}$$

будут постоянными в течение всего времени движения. Так как объемная концентрация частиц в рассматриваемых процессах может достигать десятков процентов, то при расчетах использовалось уравнение состояния равновесной смеси с учетом объема, занимаемого частицами.

$$P \left(\frac{1}{\rho} - \frac{z}{\rho_g} \right) = \bar{R} T, \quad (4)$$

Здесь $\bar{R} = (1-z) \frac{R}{\mu}$, ρ_g - плотность материала вещества частиц, T - температура смеси.

Система уравнений (1) - (4) замыкается выражением для внутренней энергии $\varepsilon = \frac{\bar{R} T}{k-1}$,

где $\bar{k} = \frac{z c_g + (1-z) c_p}{z c_g + (1-z) c_v}$ - показатель адиабаты равновесной смеси c_p и c_v - теплоемкости газовой фазы при постоянном давлении и объеме соответственно.

Начальную стадию взаимодействия протяженной ударной волны с газопылевой преградой без учета трения и теплообмена можно исследовать путем расчетов распадов разрывов на границах газа и равновесной двухфазной среды. Результаты одного такого расчета в плоскости (x, t) приведены на рис. 1, на котором изображена система волн и контактных разрывов. На этом же рисунке в скобках приведены значения давления в МПа, которые получаются при взаимодействии с преградой исходной ударной волны с давлением 1,6 МПа.

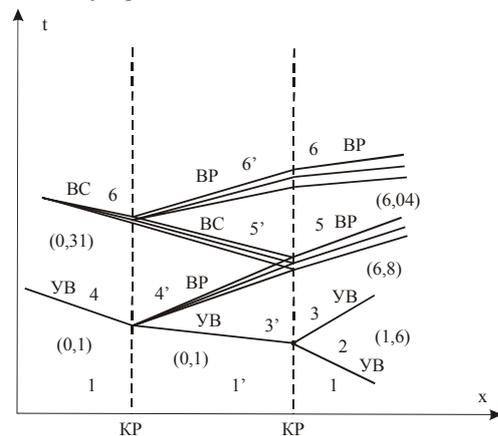


Рис. 1. Система волн и контактных разрывов в плоскости (x, t) : УВ - ударные волны, ВР - волны разрежения и ВС - волны сжатия

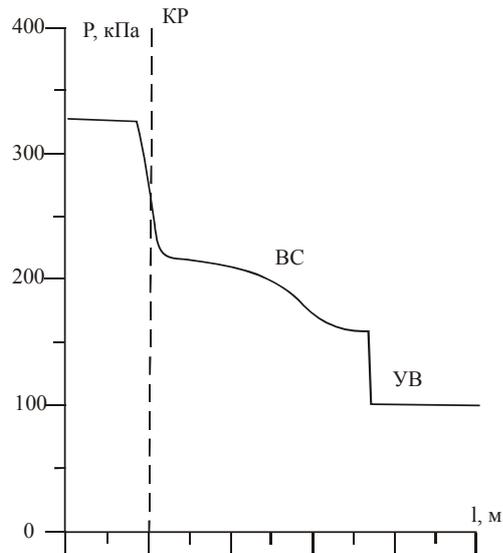
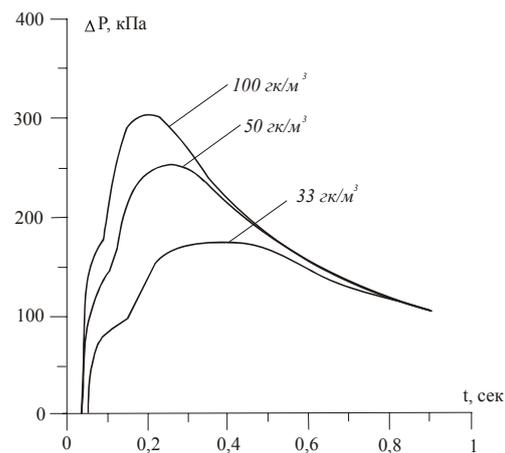
Рис. 2. Зависимость $P(x)$ в некоторый момент времени при $z=0,99$ и $\frac{P_2}{P_1} = 8$.

При столкновении с преградой волна в первый момент времени значительно усиливается. В рассмотренном расчете первоначальное отношение давлений $\frac{P_2}{P_1} = 16$ возрастает до значения

$\frac{P_3}{P_1} = 68$. Проникая в преграду волна падает в своеобразную ловушку, в которой, многократно отражаясь от контактных разрывов, медленно затухает. При отражениях она каждый раз меняет свой знак, а именно: волна сжатия становится волной разрежения и наоборот. При этом в каждом отражении за преградой проникает только незначительная часть энергии. При воздействии на преграду короткой ударной волны, за которой следует волна разрежения, за преградой может проникнуть только первая УВ. При длительном воздействии первая ударная волна может усиливаться системой волн сжатия.

Аналитические методы позволяют рассчитывать ударные волны только прямоугольной формы. В действительности реальные УВ взрыва сопровождаются волнами разрежения. Численная методика позволяет рассчитывать взаимодействие с защитными перегородками

Рис. 3. Зависимость запреградного перепада давления $P - P_a$ от времени и концентрации частиц: P_a - давление атмосферы



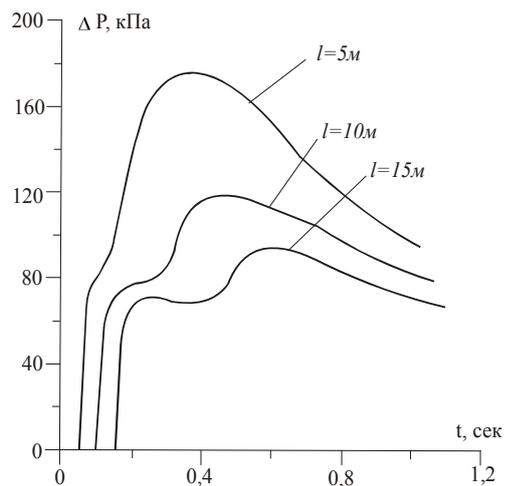
импульсов давления любой формы и длительности, а также учесть трение и теплообмен газа со стенками выработки.

Для численных расчетов постановка задачи выглядит следующим образом:

В области $a < x < b$, $t > 0$ требуется найти обобщенное решение уравнений (1) - (4) с начальными условиями

$$\begin{aligned} \rho(x, 0) &= \rho_0(x) \\ \rho_s(x, 0) &= \rho_{s0}(x) \end{aligned} \quad (5)$$

Рис. 4. Зависимость запреградного перепада давления $P - P_a$ от времени и ширины преграды



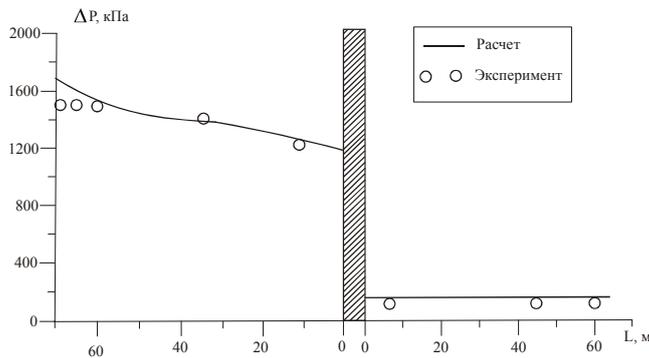


Рис. 5. Сходимость результатов расчетов и экспериментальных данных

чае за ударной волной следует сильная волна разряжения.

На давление за преградой сильно влияет концентрация в ней мелкодисперсных частиц. Зависимость запреградного перепада давления $P - P_a$, где P_a - давление атмосферы, от времени для концентрации частиц $100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

$50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $33 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ показана на рис. 3.

При этом рассчитывалась преграда шириной $l = 5 \text{ м}$. Давление в падающей ударной волне $P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

На рис. 4 показано влияние на запреградный перепад давления $P - P_a$ ширины преграды l . Массовая концентрация частиц в этих исследованиях полагалась равной $100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Давление в па-

ударной волне $P_2 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Из рис. 4 видно, что в более широкой преграде из-за большего времени прохождения волн все процессы больше растянуты по времени. Меньшее давление в случае более широкой преграды объясняется приходом волны разряжения к моменту времени, когда запреградное давление еще не успело заметно возрасти.

На рис. 5 приведено сравнение падения давления в преграде с экспериментальными результатами, полученными при взрыве большой массы аммонита [2].

Волновая теория взаимодействия ударных волн с пылевыми и водными защитными перемычками позволила раскрыть физические процессы, происходящие при таком взаимодействии. Оказалось, что в области перемычки ударная волна попадает в своеобразную ловушку, ограниченную контактными разрывами. Волны давления, в которые превращается ударная волна внутри перемычки, многократно отражаются от ее стенок, постепенно затухая за счет ухода слабых преломленных волн через границы.

Если волна разряжения, идущая вслед за ударной волной, проникает в перемычку достаточно быстро, то ударная волна затухает внутри этой ловушки, пропуская за перемычку лишь слабую преломленную УВ. В то же время бесконечная по своей протяженно-

$$u(x, 0) = u_0(x)$$

$$P(x, 0) = P_0(x)$$

Начальные условия для давления и температуры могут иметь разрывы 1-го рода, например, в случае взрыва или ударной волны. Первоначальная ударная волна может задаваться любой формы. Взрыв газа имитируется повышением давлением и температуры на некотором участке $(x_2, x_3) \in (a, b)$.

Граничные условия на левой границе области совпадают с данными неподвижной атмосферы. При этом левая граница устанавливается столь далеко от преграды, чтобы в течение заданного промежутка времени граничные условия при $x = a$ не сказывались на событиях в окрестности преграды. За преградой на правой границе наряду с условиями, аналогичными условиям в точке a , может предусматриваться твердая стенка, имитирующая прочную преграду. В последнем случае при $x = b$ задается условие $u|_{x=b} = 0$.

Задача решается методом С.К. Годунова [3] который позволяет получать обобщенное решение. Особенности алгоритма заключаются в использовании при расчетах распадов разрывов формул, отличающихся от классических учетом объема, занимаемого частицами.

На рис. 2 приведена зависимость $P(x)$ в некоторый момент времени для случая $z = 0,99$ и отношения давления в падающей ударной волне $\frac{P_2}{P_1} = 8$. На этом рисунке хорошо видна за-

преградная УВ и система волн сжатия, которая ее нагоняет. В том случае, когда с преградой взаимодействует короткая УВ, до момента падения давления система запреградных волн сжатия не успевает образоваться. В этом слу-

сти падающая волна после многократных отражений в конце концов просачивается через перемычку в виде системы волн сжатия.

Поэтому для правильных оценок защитных свойств перемычек необходимо учитывать реальную форму падающих волн взрыва и, прежде всего, - волны разряжения, всегда возни-

кающей при взрывах метано-воздушных смесей в шахтах.

Для решения последней задачи создана численная методика и программа расчета, позволяющие моделировать реальные взрывы и их взаимодействие с защитными преградами в горных выработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. М., 1977. - 200 с.

2. Умнов Л.Е. Голик А.С., Палеев Д.Ю. Шевцов Н.Р. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях. - М.: Недра, 1990. - 386 с.

3. Годунов С.К. Забродин А.В., Иванов М.Я. Крайко А.Н. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука, 1976. - 400с.

Коротко об авторах

Горбатов В.А. – кандидат технических наук, доцент Московского государственного горного университета, начальник центрального штаба ВГСЧ угольной промышленности,
Васенин И.М. – кандидат технических наук, доцент Тульского государственного университета,
Игшнев В.Г. – доктор технических наук, заместитель директора РосНИИГД,
Син А.Ф. – командир областного отряда ВГСЧ, Кемеровский ОВГСО.

ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
РОГОВ Александр Борисович	Обоснование технологических решений и параметров машин и комплексов оборудования для разрушения крепких пород, повышающих долговечность горной техники	05.05.06 25.00.22	д.т.н.
ВОРОНИНА Ирина Юрьевна	Разработка метода расчета обделок взаимовлияющих параллельных круговых подводных тоннелей	25.00.20	к.т.н.

