

Расчеты согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [8], где зафиксировано распространение порошка ингибитора на расстояние 40 м от места его выброса при взрыве метановоздушной смеси в тупике экспериментальной штольни «Тремония».

Вывод. Таким образом, в процессе движения порошка ингибитора с потоком рудничной атмосферы происходит его быстрое осаждение на стенки выработки и «растягивание» области, занятой порошком. Концентрация порошка становится меньше необходимой огнетушащей концентрации. Поэтому при наличии в рудничной атмосфере горючей концентрации метана распространение пламени не будет предотвращено устройством АСВП-ЛВ. Этот факт необходимо учитывать при разработке тактики применения и определении мест установки АСВП-ЛВ, а также при проектировании других устройств, использующих в качестве огнепреградителей порошковые составы.

Библиографический список

1. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Умнов [и др.]. - М.: Недра, 1990. - 286 с.
 2. Предупреждение взрывов пыли в угольных шахтах / П.М. Петрухин [и др.]. - М.: Недра, 1974. - 304 с.
 3. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. - М.: Стройиздат, 1982. - 72 с.
 4. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. - М.: Химия, 1987. - 272 с.
 5. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. - М.: Пожнаука, 2007. - 266 с.
 6. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. - М.: Химия, 1974. - 264 с.
 7. Ингибирование пламени метана взвесями солей / А.Н. Баратов [и др.]. // Физика горения и взрыва. - 1976. - Т. 12, № 1. - С. 72–75.
 8. Штолль Э.-В., Виманн В. Подавление взрывов в подземных выработках автоматически заслонами системы BVS // Глюкауф-форшунгсхефте. - 1979. - № 1. - С. 38–46.
 9. Крайнов А.Ю., Шаурман В.А. О пределах распространения пламени по запыленному газу // Физика горения и взрыва. - 1997. - Т. 33, № 4. - С. 14–20.
 10. Губин Е.И., Дик И.Г., Крайнов А.Ю. Ингибирование газовых пламен порошковыми составами // Физика горения и взрыва. - 1989. - Т. 25, № 2. - С. 57–62.
 11. Дементьев А.А., Крайнов А.Ю. К вопросу о распространении ламинарного пламени в газе с инертной пылью // Физика горения и взрыва. - 2011. - Т. 47, № 4. - С. 70–75.
 12. Руководство по эксплуатации и применению автоматических систем взрывоподавления – локализации взрывов (АСВП-ЛВ) в подземных горных выработках угольных шахт, опасных по газу и пыли (Второе дополненное издание)/ Колл. авт. –Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности». - Москва, 2007. – 74 с.
- УДК 533.6.011

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВЗРЫВА МЕТАНА С ВОДЯНЫМ ЗАСЛОНОМ ^{1,2}д.т.н. Палеев Д.Ю., ¹к.ф-м.н. Лукашов О.Ю., ³д.ф-м.н. Васенин И.М., ³д.ф-м.н. Шрагер Э.Р., ³д.ф-м.н. Крайнов А.Ю., ⁴к.ф-м.н. Костеренко В.Н.

1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия

2 – ФГКУ «Национальный горноспасательный центр», г. Новокузнецк, Россия

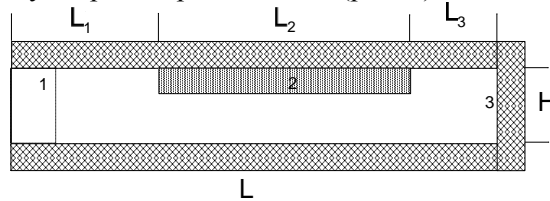
3 - Томский государственный университет, г. Томск, Россия

4 - ОАО «Сибирская угольная энергетическая компания», г. Москва, Россия

Аннотация. Проведено численное моделирование взаимодействия ударной волны от взрыва метана с водяным заслоном. Показано, что неоднородность расположения воды в заслоне не влияет на величину интенсивности прошедшей за заслон ударной волны.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, ударная волна, водяной заслон, математическое моделирование

На больших расстояниях от места взрыва кривизна воздушной ударной волны становится незначительной, и можно считать, что в выработке распространяется плоская волна. В условиях неоднородного распределения элементов водяного заслона распространение воздушной ударной волны и течение газа, вызванное ударной волной, имеет существенно пространственный характер. Если неоднородность распределения элементов водяного или сланцевого заслона в горизонтальном направлении, параллельном плоскости ударной волны, усреднить, то распространение воздушной ударной волны в выработке при наличии в ней водяного заслона можно описать уравнениями газовой динамики в двухмерном приближении (рис. 1).



1 – область высокого давления; 2 – сланцевый или водяной заслон; 3 – стенка тупика
 Рис. 1. Вертикальное сечение тупиковой выработки с расположенным в ней заслоном

Проведем моделирование взаимодействия ударной волны с водяным заслоном, расположенным под кровлей выработки. Наличие в потоке газа капель воды будем учитывать в равновесном приближении, которое предполагает тепловую и динамическую безинерционность частиц. Будем предполагать, что мелкие капли воды движутся в потоке без отставания, а их температура равна температуре газа. Такой подход позволяет учесть наличие дисперсной фазы в потоке через уравнение состояния и теплоемкость газодисперсной смеси. В уравнении состояния в связи с этим будет учитываться объем дисперсной фазы и эффективное значение газовой постоянной. Будем также предполагать, что вода водяного заслона переходит во взвешенное состояние сразу при приходе ударной волны в место расположения соответствующего элемента заслона. При этом энергией, затрачиваемой на диспергирование воды, пренебрегаем. На распыленную воду действует сила тяжести, под действием которой происходит ее свободное падение вниз. Сила тяжести начинает действовать на дисперсную фазу с момента перехода воды в заслоне во взвешенное состояние.

С учетом сделанных допущений система уравнений математической модели, состоящая из уравнений сохранения массы среды, массы дисперсной фазы, движения вдоль выбранных осей координат x и y , энергии и состояния газодисперсной смеси запишутся в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_3 v}{\partial y} = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = 0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho vu}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} = -g\rho, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho Eu + pu)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho Ev + pv)}{\partial y} = -g\rho v, \tag{5}$$

$$E = C_v T + \frac{u^2 + v^2}{2}, \quad C_v = c_v \frac{\rho_g}{\rho} + c_3 \frac{\rho_3}{\rho}, \quad \rho = \rho_g + \rho_3, \tag{6}$$

$$p \left(\frac{1}{\rho} - \frac{\rho_3}{\rho \rho_p} \right) = RT, \quad R = R_g \frac{\rho_g}{\rho}$$

где t - время; x, y - декартовы координаты; ρ - плотность газодисперсной смеси; ρ_g - плотность газа; ρ_3 - объемная плотность дисперсной фазы; ρ_p - плотность вещества частиц; p - давление; T - температура; E - полная энергия; u - проекция скорости потока на ось x ; v - проекция скорости потока на ось y ; R_g - газовая постоянная; C_v - удельная теплоемкость газа при постоянном

объеме; c_3 - удельная теплоемкость дисперсной фазы; C_v - удельная теплоемкость газодисперсной смеси при постоянном объеме; g - ускорение свободного падения.

Рассматривается тупиковая выработка заданной длины L , схема которой представлена на рис. 1. На некотором расстоянии от тупика расположен водяной заслон длиной 30 метров. От левой границы выработки распространяется ударная волна известной интенсивности. Необходимо определить интенсивность ударной волны, прошедшей за заслон и величину давления газа на стенку выработки при отражении ударной волны, а также оценить влияние неоднородности размещения водяного заслона на интенсивность прошедшей заслон ударной волны.

Ударная волна образуется от области повышенного давления на заданной длине вблизи левой границы выработки в виде:

$$p(x, y, 0) = \begin{cases} P_b & x, y \in \text{зоне высокого давления}; \\ P_0 & x, y \notin \text{зоне высокого давления}; \end{cases}$$

$$\rho(x, y, 0) = \begin{cases} \rho_b & x, y \in \text{зоне высокого давления}; \\ \rho_0 & x, y \notin \text{зоне высокого давления}; \end{cases} \quad (7)$$

$$u(x, y, 0) = 0;$$

$$v(x, y, 0) = 0;$$

На границах расчетной области ставятся условия не протекания (рис. 1).

В расчетах задавались значения: $L = 62,5 \text{ м}$, $L_1 = 20 \text{ м}$, $L_2 = 30 \text{ м}$, $L_3 = 12,5 \text{ м}$, $H = 4 \text{ м}$, область высокого давления задавалась длиной $2,5 \text{ м}$, $P_b = 2 \text{ атм}$. Масса воды, приходящаяся на один кубический метр пространства выработки в области расположения заслона, задавалась равной $13,5 \text{ кг/м}^3$. Удельная теплоемкость воды $c_{wat} = 4190 \text{ Дж/(кг K)}$, плотность воды $\rho_{wat} = 1000 \text{ кг/м}^3$. Рассматривались два варианта расположения заслона:

- заслон равномерно заполняет проходное сечение выработки, объемная плотность материала заслона $13,5 \text{ кг/м}^3$;
- водяной заслон равномерно распределен под потолком выработки на высоте $2,5 \text{ метра}$ от пола и имеет толщину $1,5 \text{ метра}$.

Объемная плотность материала заслона в этой области 36 кг/м^3 (при такой плотности масса загрузки заслонов в вариантах 1 и 2 будет одинаковой). Система уравнений (1)-(7) решалась численно методом С.К. Годунова [1-2].

Для подробного рассмотрения характера течения газодисперсной среды и распространения ударной волны на рис. 2 представлены поля давления и плотности газодисперсной среды в последовательные моменты времени в процессе взаимодействия ударной волны с водяным заслоном, расположенным под потолком выработки.

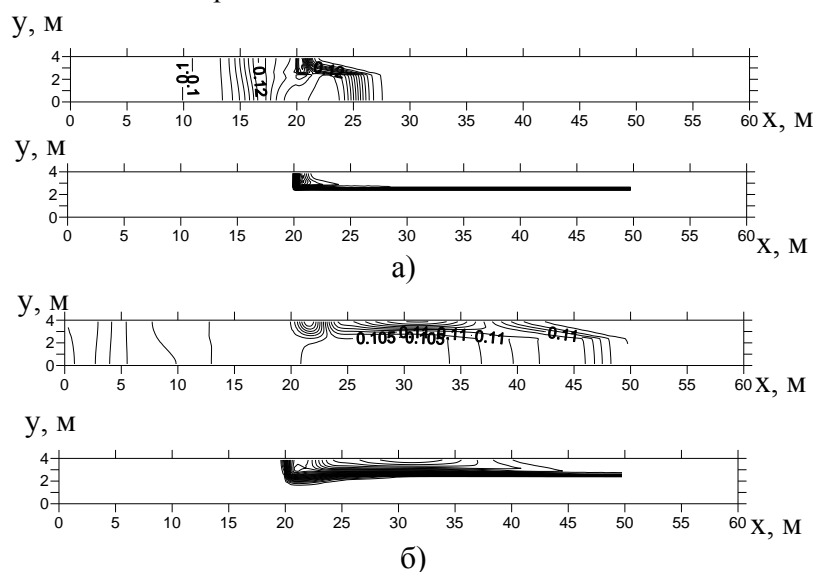
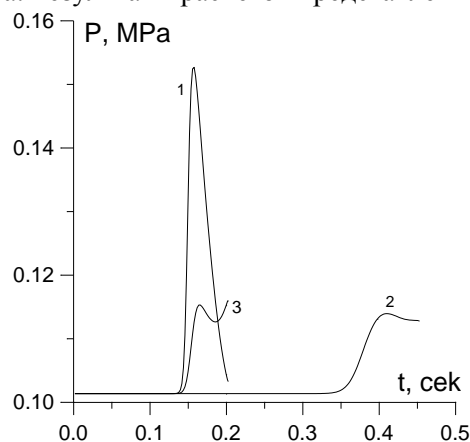


Рис. 2. Изолинии давления и плотности газодисперсной среды в вертикальном сечении выработки в момент времени $0,05 \text{ с}$ (а) и $0,1 \text{ с}$ (б) после начала распространения ударной волны

Из рисунков видно, что ударная волна в свободной от заслона области распространяется со скоростью большей, чем в области расположения водяного заслона, под потолком выработки. Опережающая волна, распространяющаяся в свободном от водяного заслона пространстве, заходит в область расположения заслона снизу вверх. При этом за счет расширения области высокого давления в ударной волне вверх и вправо интенсивность волны уменьшается. В области расположения водяного заслона существует локальная область повышенного давления, распространяющаяся с ударной волной, возникающая за счет схождения ударных волн. Позади ударной волны, распространяющейся в области водяного заслона, происходит расширение газодисперсной среды сверху вниз, так как в этой области существует зона высокого давления, которая отстает от ударной волны, распространяющейся по свободному пространству выработки. Происходит «выброс» газодисперсной среды сверху вниз. В связи с этим происходит частичное торможение потока газа за ударной волной, распространяющейся по свободному пространству выработки. Это также приводит к уменьшению интенсивности ударной волны, распространяющейся по свободному пространству выработки. Были проведены сравнительные расчеты взаимодействия ударной волны с водяным заслоном для случаев его однородного, неоднородного распределения по высоте выработки и при отсутствии заслона. Результаты расчетов представлены на рис. 3.



1 – водяной заслон отсутствует; 2 – вода водяного заслона распределена по сечению выработки равномерно; 3 – вода водяного заслона распределена по сечению выработки неравномерно

Рис. 3. Зависимость давления от времени на стенке тупика

В случае, если заслон не установлен, волна распространяется без помех. При отражении волны от стенки тупика максимальное повышение давления на стенке составляет 53000 Па (рис. 3, кривая 1). При установке водяного заслона равномерно по высоте выработки ударная волна частично отражается от более плотной среды. Проникшая в газокапельную среду волна, также частично диссипирует за счет работы на разгон тяжелой газокапельной области. Газокапельная область за время прохождения ударной волны незначительно смещается в сторону распространения ударной волны. При отражении этой волны от стенки тупика максимальное повышение давления на стенке составляет 13900 Па (рис. 3, кривая 2). При установке водяного заслона под потолком при отражении ударной волны от стенки максимальное повышение давления на стенке составляет 14100 Па (рис. 3, кривая 2).

Вывод. Из проведенных расчетов следует, что неоднородность расположения воды в заслоне не влияет на величину интенсивности прошедшей за заслон ударной волны.

Библиографический список

1. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
2. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. - М.: Физматлит, 2002. – 608 с.
3. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / Под ред. И.М. Васенина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 322 с.