

2. Сергеев В.С., Кулиш В.И., Петрухин П.М., Нецепляев М.И. О некоторых газодинамических явлениях при распространении взрывов аэродисперсной среды в горных выработках // Физика горения и взрыва. - 1977. - Т.13, № 6. - С. 933-936.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. - М.: Наука, 1987. - 464 с.
4. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука, 1976. - 400 с.
5. Krishenik P.M., Rumanov E.N., Shkadinskii K.G. Modeling of combustion wave propagation in a carbon dust/gas mixture // Combustion and flame. 1994. - № 99. - P.713-722.
6. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов/Под ред. В.В.Померанцева. Л.:Энергоатомиздат, 1986. - 310 с.
7. Кришеник П.М., Шкадинский К.Г. Исследование особенностей структуры пламени в газовзвесах // Материалы XII симпозиума по горению и взрыву. Часть I. Черноголовка, 2000. - С. 92-94.
8. Иванищева Л.И., Степанов А.М. Нестационарное распространение пламени по газозвеси частиц твердого горючего // Физика горения и взрыва. - 1977. - Т.13, № 5. - С. 699-705.
9. Ионушас К.К., Проничева Н.М., Тодес О.М., Гольцикер А.Д., Водяник В.И., Кожушков Н.П. Развитие механизма распространения пламени в аэродисперсных системах // Физика горения и взрыва. - 1979. - Т.15, № 5. - С. 57-62.
10. Вайнштейн П.Б. Радиационный фронт пламени в смеси газа с твердыми частицами // ПМТФ. - 1971. - Т.12, №4.
11. Нигматулин Р.И., Вайнштейн П.Б. Распространение пламени в смеси газа с частицами. Горение и взрыв. - М.: Наука, 1972. - С. 182-185.
12. Вайнштейн П.Б., Нигматулин Р.И. Горение смесей газа с частицами // ПМТФ. - 1973. №3.
13. Вайнштейн П.Б., Нигматулин Р.И. К теории распространения пламени в смеси газа и капель // ПМТФ. - 1973. №4.
14. Вайнштейн П.Б., Нигматулин Р.И. Гетерогенное горение смеси газов с частицами или каплями. Избранные проблемы прикладной механики. - М.:ВИНИТИ, 1974. - С. 187-193.
15. Кассель Г.М., Дас-Гупта А.К., Гурусвами С. Факторы, влияющие на распространение пламени в облаке пыли. Вопросы горения. // Сборник переводов статей. Т.1. - М.: Иностранная литература, 1953. - С. 264-273.

УДК 533.6.011

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВЗРЫВА МЕТАНА С ОБЛАКОМ ПОРОШКОВОГО ИНГИБИТОРА

^{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. Разработана физико-математическая модель распространения облака порошка ингибитора в выработках угольной шахты при распространении ударной волны после взрыва метановоздушной смеси. Концентрация порошка по мере продвижения вдоль выработки снижается и становится меньше необходимой огнетушащей концентрации.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, ударная волна, порошок ингибитора, осаждение частиц, математическое моделирование

Введение

В угольных шахтах особую опасность представляет метан, выделяющийся из угольных пластов при их разгрузке. При нарушении проветривания выработок возможны взрывы метана. Для локализации взрыва в шахтах применяют инженерные взрывозащитные сооружения. Для огнестойкости используются специальные устройства, посредством которых создаются облака

порошка или тонкораспыленной воды с огнетушащей концентрацией [1–11]. Огнетушащая концентрация – концентрация огнетушащего вещества в объеме, создающая среду, не поддерживающую горение. Для порошковых средств пожаротушения их огнетушащая концентрация зависит от класса пожара, марки порошка и составляет 200–500 г/м³ [4, 7].

В документе [12] приведена конструкция автоматической системы взрывоподавления (АСВП-ЛВ). Проанализируем работу этой установки, исходя из технических данных конструкции, инструкции по ее применению, а также данных экспериментальных и теоретических исследований взрывоподавления и огнепреграждения при горении метановоздушных смесей [1, 2, 6, 7, 9–11]. Согласно описанию работы АСВП-ЛВ огнетушащий порошок (25 кг) при распылении в выработке сечением 10 м² создает концентрацию 2,5 кг на 1 м² сечения или 0,08 кг/м³ при распространении облака на расстояние 30 м. После выброса огнетушащего порошка из сопла АСВП-ЛВ он движется вместе с потоком газа и по мере его продвижения концентрация порошка снижается из-за оседания частиц порошка на стенки выработки и различия скоростей движения газодисперсной смеси в пограничном слое и в центре сечения выработки. Проведем расчетно-теоретический анализ изменения концентрации огнетушащего порошка, выбрасываемого из АСВП-ЛВ, в процессе его переноса вдоль выработки. Целью анализа является определение изменения массовой концентрации огнетушащего порошка по сравнению с ее первоначальным значением в зависимости от расстояния, пройденного порошковым облаком с потоком рудничной атмосферы за ударной волной.

Построение математической модели. Рассмотрим движение порошка ингибитора из устройства АСВП-ЛВ под воздействием потока, вызванного взрывом метана в тупиковой выработке шахты. Предполагается, что в тупике выработки произошел взрыв метановоздушной смеси. На заданном расстоянии от тупика установлена АСВП-ЛВ. После воздействия ударной волны взрыва на исполнительное устройство АСВП-ЛВ [12] начинается выброс порошка в поток воздуха. Выброс порошка длится 0,025 с.

Математическая модель основана на газодинамическом подходе, учитывающем впрыск порошка в поток за ударной волной. Записываются одномерные нестационарные уравнения сохранения массы, импульса и энергии для двухфазной смеси газа и частиц с притоком массы, количества движения и энергии из АСВП-ЛВ. Этот приток осуществляется в течение времени τ в сечение выработки x_0 , в котором расположено выходное сечение сопла АСВП-ЛВ. Начало работы АСВП-ЛВ задается в момент подхода к нему ударной волны взрыва t_1 . В уравнениях учитываются теплообмен со стенками и турбулентная диффузия частиц на стенки выработки. Система уравнений состоит из уравнений:

- сохранения массы смеси:

$$\frac{\partial sp}{\partial t} + \frac{\partial sp u}{\partial x} = \delta(x_0) [\eta(t-t_1) - \eta(t-t_1-\tau)] G_{sm} - \Pi \beta (\rho_s - \rho_{s0}); \quad (1)$$

- движения смеси:

$$\frac{\partial sp u}{\partial t} + \frac{\partial s(\rho u^2 + p)}{\partial x} = \delta(x_0) [\eta(t-t_1) - \eta(t-t_1-\tau)] G_{sm} u_{sm}; \quad (2)$$

- энергии смеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial sp(e + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial sp u(e + u^2/2 + p/\rho)}{\partial x} = \\ = \delta(x_0) [\eta(t-t_1) - \eta(t-t_1-\tau)] G_{sm} u_{sm}^2/2 - \Pi \alpha (T - T_0); \end{aligned} \quad (3)$$

- уравнение сохранения массы частиц:

$$\frac{\partial sp_s}{\partial t} + \frac{\partial sp_s u_s}{\partial x} = \delta(x_0) [\eta(t-t_1) - \eta(t-t_1-\tau)] (G_{sm} - G_b) - \Pi \beta (\rho_s - \rho_{s0}); \quad (5)$$

- уравнение движения частиц:

$$\frac{\partial sp_s u_s}{\partial t} + \frac{\partial sp_s u_s^2}{\partial x} = sp_s C_R \frac{(u - u_s)^2}{2} + \delta(x_0) [\eta(t-t_1) - \eta(t-t_1-\tau)] (G_{sm} - G_b) u_{sm}; \quad (6)$$

- состояния газа

$$p = \rho RT, \quad (7)$$

где s – сечение выработки; ρ – плотность смеси; t – время; u – скорость двухфазной смеси; u_s – скорость частиц; x – координата по длине выработки; x_0 – координата расположения устройства

выброса порошка; $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака; $\eta(t-t_1) - \eta(t-t_1-\tau)$ – разность единичных функций, «включающая и выключающая» работу АСВП-ЛВ (Π-образный источник по времени); t_1 – момент времени начала выброса порошка из устройства; τ – период времени выброса порошка из устройства; G_b – расход газа из АСВП-ЛВ, G_{sm} – расход порошка и газа из АСВП-ЛВ; G_R – коэффициент сопротивления частиц; Π – периметр выработки; β – коэффициент осаждения частиц на стенки (определяется из подобия процессов турбулентного теплообмена и турбулентного массообмена); ρ_s – масса частиц в единице объема смеси; ρ_{so} – масса частиц в единице объема смеси в пограничном слое вблизи стенок выработки; p – давление; u_{sm} – скорость смеси, впрыскиваемой из АСВП-ЛВ; e – внутренняя энергия смеси, $e = c_v T$; c_v – удельная теплоемкость смеси при постоянном объеме; T – температура; T_0 – температура стенки выработки; α – коэффициент теплоотдачи; R – газовая постоянная.

Начальные и граничные условия. В области взрыва при $x < x_v$ задаются давление, плотность и температура после мгновенного взрыва метана. В остальной части области параметры газа соответствуют параметрам атмосферы. На левой границе области в тупике выработки в качестве граничного условия использовалось условие непротекания газа. На правой границе предполагалось, что выработка соединяется с атмосферой.

В соответствии с этими условиями моделируется срабатывание АСВП-ЛВ в штольне длиной 200 м с тупиком и выходом на поверхность земли. Вблизи тупика штольни мгновенно взрывается метановоздушная смесь, занимающая пространство выработки на длине 30 м от тупика. В 30 м от границы взрыва установлена АСВП-ЛВ.

Расход впрыскиваемой смеси рассчитывается по формуле

$$G_{sm} = \frac{m_s + m_b}{\tau}, \quad G_b = \frac{m_b}{\tau},$$

где m_s – масса частиц в АСВП-ЛВ; m_b – масса сжатого воздуха.

Для оценки скорости впрыскиваемой двухфазной смеси предполагалось, что вся работа сжатого воздуха при его расширении от начального объема V_0 до объема $V_0 + V_p$, где V_p – объем, занимаемый порошком после его выброса в выработку, переходит в кинетическую энергию смеси. При этом расширение воздуха предполагалось адиабатическим. На этих основаниях для скорости впрыскиваемой смеси была получена формула

$$u_{sm} = \sqrt{\frac{2p_0V_0}{(k-1)(m_s - m_b)} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_0 + V_p} \right)^{k-1} \right]}, \quad (8)$$

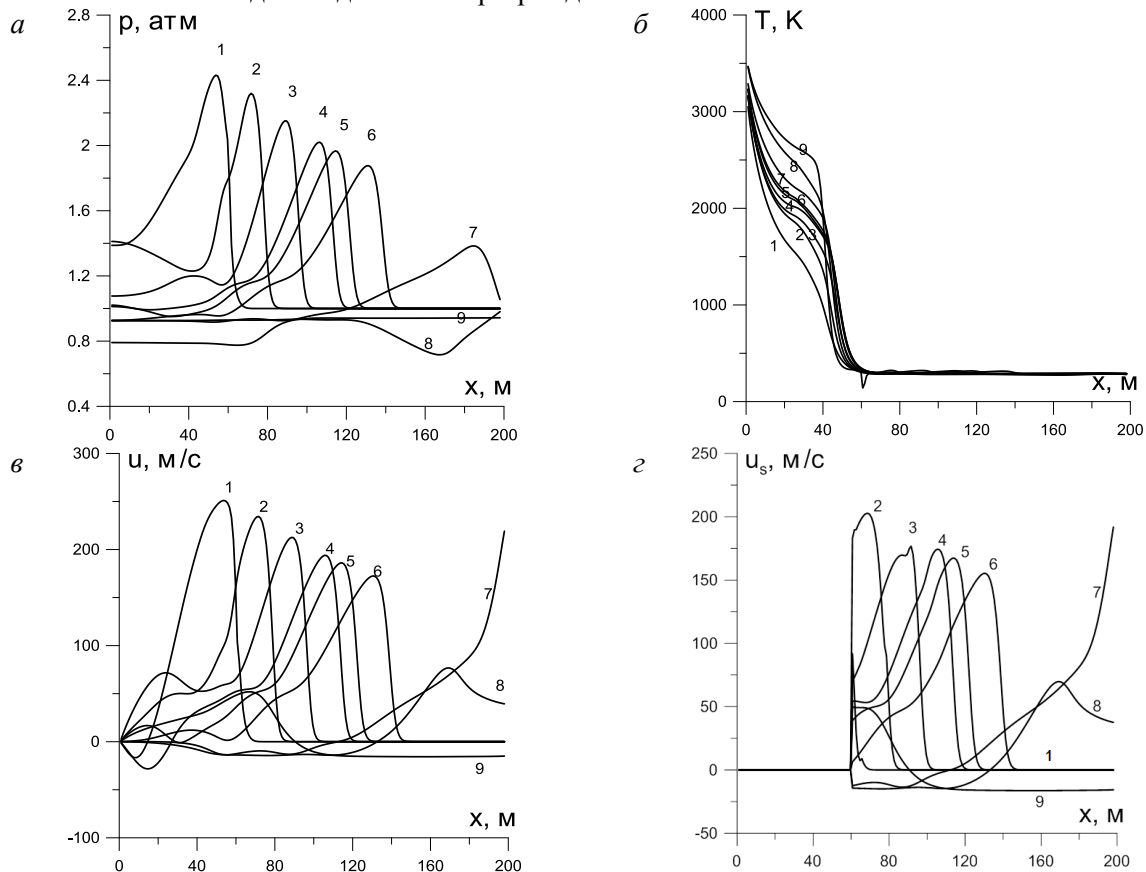
где p_0 – начальное давление сжатого воздуха в устройстве выброса порошка, k – показатель адиабаты.

Результаты расчетов и их анализ. В конкретных расчетах использовались параметры АСВП-ЛВ, взятые из Руководства [12]. Диаметр частиц ингибитора полагался равным 20 мкм. Впрыск ингибитора осуществлялся в момент достижения давления в координате $x = x_0$, равного 120 кПа. Время работы устройства впрыска полагалось равным 0,025 с. Давление после мгновенного взрыва метановоздушной смеси задавалось равным 400 кПа, а температура 3800 К. Расчет проводится до времени 1,0114 с, когда ударная волна вышла в атмосферу и началось втекание воздуха в объем штольни. Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2.

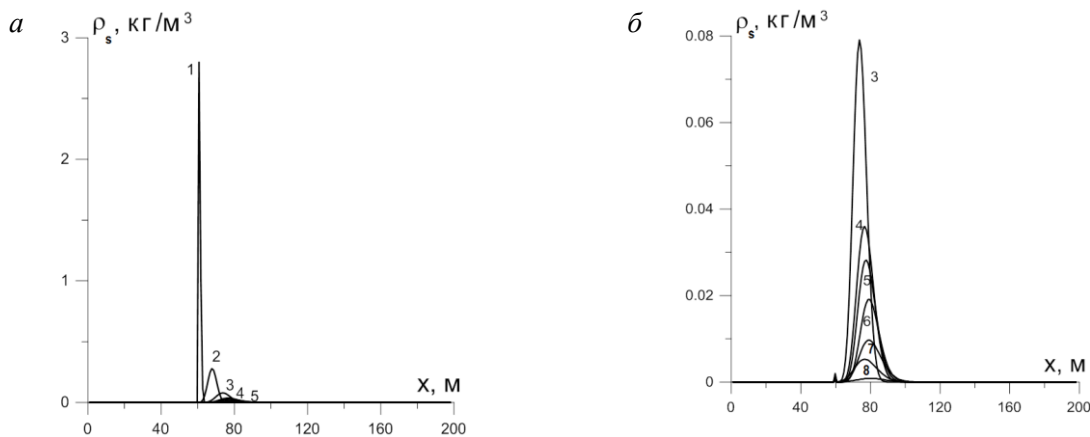
На рис. 1 и 2 видно, как по штольне распространяется ударная волна. Скорость движения рудничной атмосферы за ударной волной достигает значений 250 м/с и постепенно убывает (рис. 1, в). Когда ударная волна достигает координаты $x_0 = 60$ м срабатывает АСВП-ЛВ, и происходит выброс порошка. Облако порошка достаточно быстро достигает скорости газа и движется вместе с ним с небольшим отставанием (рис. 1, в, г).

Так как выброс порошка происходит за 25 миллисекунд, то его плотность в месте выброса и сразу после выброса большая и достигает значений 3 кг/м³ (рис. 2, а). Подхватываемый потоком газа с переменной скоростью по пространству (на рис. 1 г, куполообразное распределение скоро-

сти по координате) порошок быстро приобретает скорость газа, также не одинаковую по величине в разных точках пространства. Из-за этого эффекта, а также за счет турбулентного осаждения частиц на стенки штольни плотность порошка в потоке рудничной атмосферы быстро уменьшается. К моменту времени 0,1339 с после взрыва она становится менее $0,08 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2, а, б), а к моменту времени 0,6205 с после взрыва метана ее концентрация становится менее 5 граммов на кубический метр рудничной атмосферы (рис. 2 б, кривая 8). В процессе взаимодействия с ударной волной порошок перемещается на расстояние 30 м от места его выброса из сопла АСВП-ЛВ. Это перемещение происходит за 0,375 с. При наличии метана за зоной первоначального взрыва пламя метановоздушной смеси, распространяющееся со средней скоростью 200 м/с на этом участке догонит облако порошка в координате 90 м от тупика штольни. К этому моменту плотность порошка в облаке меньше необходимой для пламепреграждения.



1 – 0,0591; 2 – 0,0963; 3 – 0,1339; 4 – 0,1724; 5 – 0,1917; 6 – 0,2305; 7 – 0,4254; 8 – 0,6205; 9 – 1,0114
 Рис.1. Распределение давления (а), температуры (б) рудничной атмосферы скорости смеси (в) скорости частиц (г) и по длине штольни в фиксированные моменты времени после взрыва метана, с



1 – 0,0591; 2 – 0,0963; 3 – 0,1339; 4 – 0,1724; 5 – 0,1917; 6 – 0,2305; 7 – 0,4254; 8 – 0,6205; 9 – 1,0114
 Рис. 2. Распределение массы порошка в единице объема (а, б) по длине штольни в фиксированные моменты времени после взрыва метана, с

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