УДК 533.6.011

ГАШЕНИЕ ЭНЕРГИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВОДЯНЫМ ЗАСЛОНОМ ПРИ ВЗРЫВЕ СЛОЕВОГО СКОПЛЕНИЯ МЕТАНА

[1,2]д.т.н. Палеев Д.Ю., [1]к.ф-м.н. Лукашов О.Ю., [3]д.ф-м.н. Васенин И.М., [3]д.ф-м.н. Шрагер Э.Р., [3]д.ф-м.н. Крайнов А.Ю., [4]к.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. На основе газодинамической модели расчета взрывобезопасных расстояний при взрывах газа и пыли в горных выработках и модели движения газопылевой смеси проведено моделирование взаимодействия ударной волны с водяными и сланцевыми заслонами. Расчёты показывают, что заслон из водяных карманов стандартных размеров (30 м) способен при взрыве локального скопления метана снизить давление в волне сжатия до безопасного для жизни человека предела.

Ключевые слова: взрыв скопления метана, ударная волна, водяной заслон, численное моделирование

В настоящее время одним из основных средств защиты горных выработок от распространения взрывов угольной пыли являются водяные и сланцевые заслоны [1]. Надёжность действия заслона сильно зависит ещё от качества изготовления и установки полок, соблюдения норм загрузки заслона инертной пылью или водой и сохранения этих норм в процессе эксплуатации. При несоблюдении этих требований применение водяных и сланцевых заслонов во многих случаях оказывается неэффективным [2]. Следует отметить, что принцип действия заслонов обусловливает их основной недостаток – они устанавливаются на значительном удалении от места взрыва (60-300 м), чтобы взрывной процесс мог существенно развиться. Кроме того, заслоны предназначены для гашения пламени взрыва, поэтому при их срабатывании ударная волна, хотя и ослабленная, продолжает распространяться по выработке за заслон.

Альтернативой обычным водяным и сланцевым заслонам являются заслоны с водяными карманами из полиэтилена, которые распространены на шахтах Восточной Европы [3, 4]. Выгодно отличаясь по своим технико-экономическим показателям от традиционных водяных заслонов из корытных сосудов, водяные карманы лишены присущих им недостатков. Они не допускают испарения воды, обладают достаточной механической прочностью, чтобы не повреждаться при транспортировке и монтаже, и в случае взрыва разрушаются под воздействием набегающей волны сжатия с давлением всего 0,003 МПа, обеспечивая эффективное гашение пламени взрыва облаком распыленной воды. Заслоны с водяными карманами в меньшей степени зависят от давления во фронте ударной волны и с меньшей вероятностью могут пропустить вспышки метана, при которых почти не создаются ударные волны. Это означает, что область применения таких заслонов может быть значительно расширена, т.к. их можно устанавливать в непосредственной близости от предполагаемого места взрыва, не допуская дальнейшего развития процесса. При невысокой интенсивности набегающей ударной волны, такие заслоны могут кроме своего основного назначения – гасить пламя взрыва, выполнять и вторую функцию – снижать интенсивность ударной волны до безопасного предела.

Для моделирования взаимодействия ударных волн с водяными и сланцевыми заслонами воспользуемся газодинамической моделью распространения ударных волн по сети горных выработок и моделью движения аэровзвеси водяных капель [5, 6]. При взаимодействии ударной волны с водяным карманом вода диспергируется на капли размером в несколько микрон. При таких диаметрах капель времена релаксации их тепловой и скоростной неравновесности с газовой фазой намного меньше времени взаимодействия ударной волны с водяным карманом. Поэтому при построении математической модели было принято, что капли воды находятся в тепловом равновесии с газом (однотемпературная модель) и движутся они в нём без отставания (односкоростная модель). Также предполагалось, что: при подходе ударной волны к водоналивной перемычке вода, находящаяся в полиэтиленовых мешках, мгновенно переводится в газокапельное состояние и равномерно располагается по всему сечению выработки на заданной длине; собственный объем ка-

пель воды учитываем в уравнении состояния газа; затратами энергии ударной волны на перевод воды в капельное состояние пренебрегаем; испарение воды осаждение капель воды на стенки выработки не учитываем.

При сделанных допущениях система уравнений, описывающая движение газокапельной смеси запишется в виде:

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

$$\frac{\partial \rho_f S}{\partial t}+\frac{\partial \rho_f u S}{\partial x}=0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho_3 S}{\partial t}+\frac{\partial \rho_3 u S}{\partial x}=0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t}+\frac{\partial (\rho u^2+p) S}{\partial x}=-\tau_{тр}\Pi+p\frac{\partial S}{\partial x}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t}+\frac{\partial (\rho E u+p u) S}{\partial x}=q\Pi, \tag{5}$$

$$E=\varepsilon+\frac{u^2}{2}, \qquad \varepsilon=\frac{p\left(\frac{1}{\rho}-\alpha\right)}{(K-1)}, \qquad p\left(\frac{1}{\rho}-\alpha\right)=RT, \qquad \rho=\rho_g+\rho_3, \tag{6}$$

$$R=c_p(1-\eta)-c_v(1-\eta), \quad K=\frac{c_p(1-\eta)+c_3\eta}{c_v(1-\eta)+c_3\eta}, \quad \eta=\frac{\rho_3}{\rho}, \quad \alpha=\rho_3/(\rho_g\rho_k), \tag{7}$$

$$\tau_{тр}=\frac{1}{8}c_f\rho u^2, \qquad c_f=0.0032+\frac{0.221}{\mathrm{Re}^{0.237}}, \qquad \mathrm{Re}=\frac{\rho u D}{\mu}, \qquad D=\frac{4S}{\Pi}, \tag{8}$$

$$q=\alpha_T(T_l-T), \quad Nu=0.022\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.47}\,\mathrm{E}, \quad \mathrm{Pr}=\frac{\mu c}{\lambda_g}, \quad Nu=\frac{\alpha_T D}{\lambda_g}, \tag{9}$$

где t - время; x - координата; ρ - плотность газокапельной смеси; ρ_f - плотность продуктов сгорания; ρ_3 - объемная плотность воды; ρ_k - плотность воды; p - давление; T - температура; R - газовая постоянная газокапельной смеси; c_3 - удельная теплоемкость воды; c_v - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; c_p - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; u - скорость; E - полная энергия газокапельной смеси; ε - внутренняя энергия газокапельной смеси; S - площадь поперечного сечения канала; Π - периметр канала; $\tau_{тр}$ - сила трения о стенки канала; q - тепловой поток в стенки; α - собственный объем воды, взвешенной в одном кубическом метре смеси (коволюм); η - массовая доля воды в единице объема газокапельной смеси; K- эффективный показатель адиабаты; c_f - коэффициент сопротивления; Re - число Рейнольдса; D - эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка горной выработки; μ - коэффициент динамической вязкости. Nu - число Нуссельта; Pr - число Прандтля; λ_g - коэффициент теплопроводности; α_T - коэффициент теплообмена; c - теплоемкость; Е- поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена.

Начальные условия: $u(x, 0) = 0$; в зоне взрыва $p(x, 0) = P_b$; $T(x, 0) = T_b$, $\rho_f(x, 0) = \rho_f$ вне зоны взрыва $p(x, 0) = P_0$; $T(x, 0) = T_0$; $\rho_f(x, 0) = 0$; в зоне перемычки $\rho_3(x, 0) = \rho_{3N}$; вне зоны перемычки $\rho_3(x, 0) = 0$. Здесь P_b - начальное давление в зоне взрыва; T_b - начальная температура в зоне взрыва; ρ_{3N} - начальная объёмная плотность воды в зоне водоналивной перемычки.

Граничные условия: Если граница выработки тупик, то граничное условие - условие непротекания, имеющее вид $u\big|_{гр}=0$. Если выработка соединяется с атмосферой, то на этой границе $p\big|_{гр}=P_{атм}$, $\rho\big|_{гр}=\rho_{атм}$.

Для оценки эффективности водяных заслонов были проведены расчеты распространения ударных волн и их взаимодействия с заслонами после быстрого сгорания в сквозной выработке

слоевого скопления метановоздушной смеси (МВС). Расчеты проводились по методами, изложенными в [5-8]. Предполагается, что прошло быстрое сгорание, «хлопок», МВС, скопившейся в верхней части выработки. Давление и температура усредняются по поперечному сечению выработки, длина взорвавшегося слоевого скопления – 30 м (от 430 до 460 м по оси *x*). Давление после взрыва 0,17 МПа, температура 510 К. Заслон длиной 30 м расположен на расстоянии 120 м от границы взрыва (в координате 580 м по оси *x*). Результаты расчетов представлены на рисунках 1-4 в виде распределений давления по дине выработки в фиксированные моменты времени: *1* – 0,15 с; *2* – 0,3 с; *3* – 0,45 с; *4* – 0,6 с; *5* – 0,75 с; *6* – 0,9 с; *7* – 1,05 с; *8* – 1,2 с; *9* – 1,35 с и зависимостей давления от времени в фиксированных координатах выработки: 550, 615, 725 м по оси *x*.

На рис. 1.*а* распределения давления соответствуют случаю, когда заслона в выработке нет. После взрыва волна сжатия распространяется по выработке в обе стороны, и после прохождения расстояния 450 м, давление в волне составляет 0,12 МПа. На рис. 1.*б* представлены зависимости давления от времени на расстояниях 90, 155 и 260 м от правой границы взрыва.

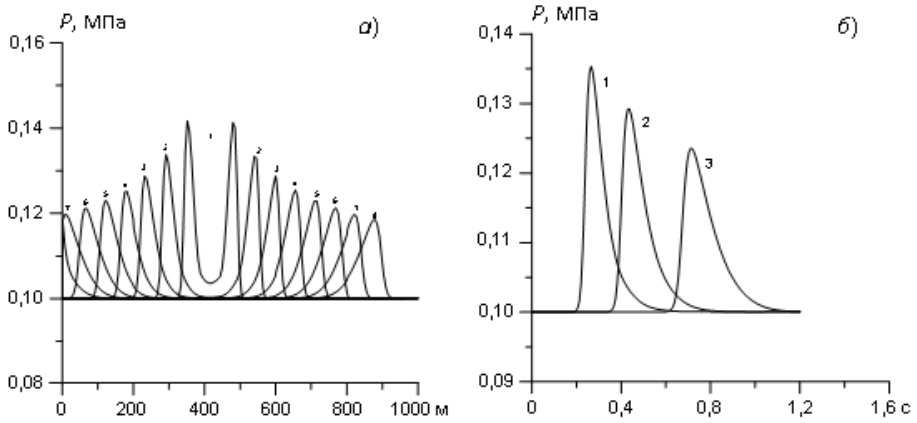

Рис. 1. Заслона в выработке нет

На рис. 2 представлены зависимости давления в различные моменты времени, когда на пути волны сжатия от взрыва МВС расположен водяной заслон с объемной плотностью воды 10 кг/м^3, протяженностью 30 м. Заслон начинается на расстоянии 120 м от границы взрыва. При взаимодействии волны сжатия с заслоном происходит частичное её отражение от более плотной газокапельной среды. По выработке влево вслед за первой интенсивной волной начинает распространяться отраженная волна невысокой (0,008 МПа) интенсивности. Давление в волне сжатия после прохождения заслона становится равной 0,111 МПа, которое несколько понижается по мере прохождения выработки. В области первоначального расположения границы заслона наблюдается небольшое понижение давления, обусловленное тем, что после взаимодействия ударной волны с заслоном газокапельная пробка получает некоторую скорость и движется вправо по инерции, создавая некоторое разрежение.

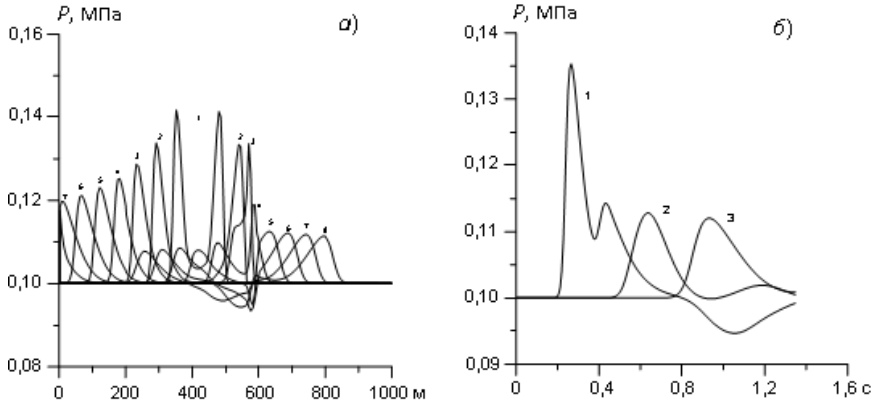

Рис. 2. В выработке установлен заслон с объемной плотностью воды 10 кг/м^3, протяженностью 30 м на расстоянии 120 м от границы взрыва

При увеличении длины заслона с массовой концентрацией воды 10 кг/м^3 вдвое (до 60 м) (рис. 3) или при увеличении массовой концентрации воды в заслоне вдвое (20 кг/м^3) при прежней

длине заслона 30 м (рис. 4) интенсивность отраженной волны увеличивается, прошедшей уменьшается, и становится меньше 0,009 МПа, т.е. безопасной для жизни людей. При увеличении длины заслона или массовой концентрации воды в заслоне вдвое динамика взаимодействия волны сжатия с заслоном аналогична (рис. 3, 4).

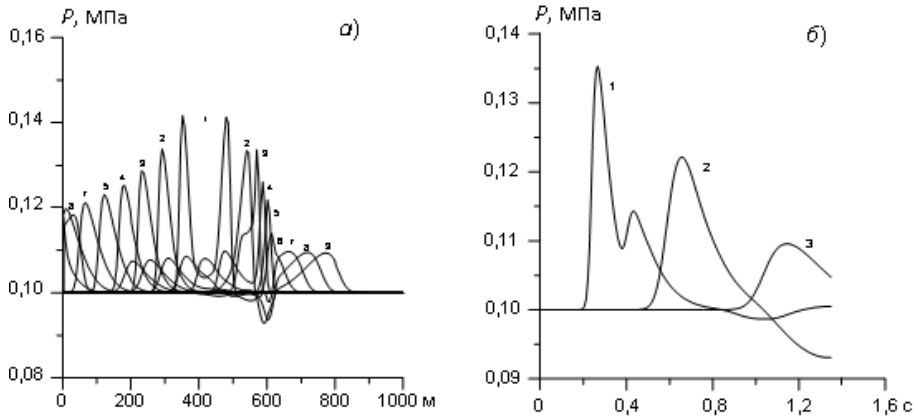

Рис. 3. В выработке установлен заслон с объемной плотностью воды 10 кг/м^3, протяженностью 60 м на расстоянии 120 м от границы взрыва

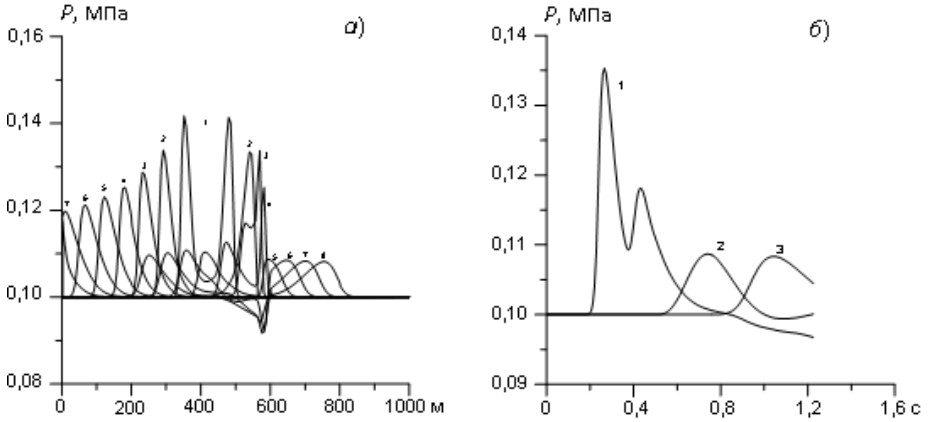

Рис. 4.– В выработке установлен заслон с объемной плотностью воды 20 кг/м^3, протяженностью 30 м на расстоянии 120 м от границы взрыва

Выводы. Проведённые расчёты показывают, что заслон из водяных карманов стандартных размеров (30 м) способен при взрыве локального скопления метана снизить давление в волне сжатия до безопасного предела. Увеличивая массу заслона, применяя уже не водяные карманы, а водоналивные перемычки из подвешенных к кровле выработки полиэтиленовых мешков, можно эффективно гасить и более сильные взрывы.

Библиографический список

1. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей / В.И. Мамаев, Ж.А. Ибраев, В.А. Лигай и др.- М.: Недра, 1990.- 159 с.

2. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах/ М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др.- М.: Недра, 1922.- 298 с.

3. Шульте К.-П. «Водяные карманы» - эффективное нововведение для конструктивной защиты от взрывов в подземных горных выработках // Глюкауф.- 2000. - № (1) - С. 51-55.

4. Шульте К.-П., Лукес М., Селесовски П. Водяные карманы из полиэтилена – альтернатива обычным водяным заслонам // Глюкауф.- 2002. - № 1(2) - С. 11-22.

5. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / Под ред. И.М. Васенина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 322 с.

6. Палеев Д.Ю., Васенин И.М., Костеренко В.Н., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Руденко Ю.Ф. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Кимерийский центр», 2011. – 312 с. (Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3).

7. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н., Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Кимерийский центр», 2011. – 160 с. (Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 2).

8. Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Криволапов В.Г. Лукашов О.Ю. Палеев Д.Ю., Шрагер Э.Р. Взаимодействие ударной волны с водяным заслоном//Тр. VIII всерос. конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». – Кемерово, 2006. - с. 127-140.

УДК 533.6.011

ОБЗОР ДАННЫХ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРОШКОВЫХ ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ

[1,2]д.т.н. Палеев Д.Ю., [1]к.ф-м.н. Лукашов О.Ю., [3]д.ф-м.н. Васенин И.М.,[3]д.ф-м.н. Шрагер Э.Р., [3]д.ф-м.н. Крайнов А.Ю., [4]к.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. Представлен обзор свойств огнетушащих порошковых составов и их массовой концентрации для предотвращения распространения фронта горения метановоздушных смесей.

Ключевые слова: порошковые огнетушащие составы, минимальная массовая концентрация

Свойства огнетушащих порошков. Порошки можно разделить на порошки общего назначения (ПФ, ПСБ, ПИРАНТ) – для тушения пожаров классов А, В, С, и специального назначения, например: МГС – для тушения натрия и лития, РС – для тушения щелочных металлов и др. В России организовано производство порошков ПСБ-3 (пожары классов В, С; тушение электроустановок), ПИРАНТ-А (пожары классов А, В, С; тушение электроустановок) и ПХК (пожары классов В, С, D; тушение электроустановок). Таким образом, перекрываются все существующие классы пожаров, а выбор порошка определяется условиями защищаемого объекта. Порошки хранят в специальных упаковках, предохраняющих их от увлажнения, и подают в очаг горения сжатыми газами. Порошки нетоксичны, малоагрессивны, сравнительно дёшевы, удобны в обращении.

Огнетушащая способность порошков обусловлена действием следующих факторов: охлаждением зоны горения за счет нагрева частиц порошка, частичное испарение и разложение в пламени; разбавлением горючей среды газообразными продуктами; эффектом огнепреграждения, достигаемым при прохождении через узкие каналы, создаваемые порошковым облаком; ингибирование химических реакций газообразными продуктами разложения и испарения порошков или гетерогенным обрывом цепей на поверхности порошков. Все порошки по типу действия делятся на две группы: Первая группа (например Al_2O_3, CuO) была названа термическими порошками. Термические порошки приводят к гашению охлаждением пламени. Вторая группа химические порошки. Их тушащая способность определяется и разогревом и эндотермическими реакциями разложения, плавлением, испарением, обрывом цепей активных центров химических реакций горения веществ.

Ряд ингибирующей эффективности веществ (в порядке убывания) выглядит следующим образом: LiF > LiCl > NaF > KF > NaCl > KI > NaI > NaBr> KCl > K_2CO_3 >Na_2CO_3 > $NaSO_4$ > Al_2O_3 зом: LiF > LiCl > NaF > KF > NaCl > KI > NaI > NaBr> KCl > K_2CO_3 >Na_2CO_3 > $NaSO_4$ > Al_2O_3 > C aCO_3. Однако некоторые вещества из этого ряда либо дорогие, либо продукты его разложения обладают вредными экологическими свойствами, поэтому используются в особых условиях. Для ингибирования воспламенения метана в воздухе используются порошки солей: $K_2C_2O_4$•H_2O> NaCl >$K_2Cr_2O_7$ > KCl > K_2CO_3 > Na_2CO_3 > $NaSO_4$ > NaF > $NaHCO_3$. Порошки солей расположены в порядке уменьшению огнетушащей эффективности.

Огнетушащая способность порошков также зависит от степени их измельчения. Возможность подачи очень мелких порошков в зону горения затруднена, поэтому промышленные огне-