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-

тушащие порошки содержат фракцию 40-80 мкм, обеспечивающую доставку мелких фракций в зону горения.

В настоящее время применяются пять типов огнетушащих порошков общего назначения. *Бикарбонат натрия.* Это один из основных огнетушащих порошков, является самым экономичным из всех существующих. *Бикарбонат калия.* Эффективен при тушении пожаров жидкого топлива. *Хлорид калия.* Этот огнетушащий порошок совместим с пеной. Его огнетушащие качества примерно равноценны качествам бикарбоната калия. *Смесь мочевины и бикарбоната калия.* Является наиболее эффективным из всех испытанных огнетушащих порошков, но имеет высокую стоимость. *Фосфат аммония.* Это универсальный порошок, успешно применяется при тушении пожаров классов А, В и С. Соли аммония разрывают цепную реакцию пламенного горения.

По данным [1, 2] в АСВП-ЛВ используется порошковый состав П-АГС. В его составе имеется фосфат аммония в количестве 40 %. Поэтому его ингибирующие свойства высокие.

Экспериментальные данные об удельных расходах порошка для гашения горения метановоздушной смеси. На электронном ресурсе [3] со ссылкой на источник [4] представлены определение и данные: «огнетушащая концентрация – количество *ОТВ,* которое необходимо подать на единицу замкнутого объёма (объёмов тушения) для тушения пожара. Для огнетушащих газов эта величина выражается в % (объема) и составляет, в среднем, для инертных разбавителей (азот, аргон) примерно 30% (об.), для *диоксида углерода* примерно 20% (об.), для галогеноуглеводородов *(хладонов)* от 2 до 14% (об.) в зависимости от марки хладонов. Для *огнетушащих порошков* эта величина выражается в кг/м^3 или г/м^3. Объёмная огнетушащая концентрация огнетушащих порошков в зависимости от их марки и *класса пожара* находится в пределах от 200 до 500 г/м^3».

В [1] отмечается, что основным компонентом составов П-2АП, П-4П и П-АГС является аммоний фосфорнокислый. Исследованиями способности различных химических веществ флегматизировать вспышки метана и угольной пыли, проведёнными научными сотрудниками МакНИИ П.М. Петрухиным, М.И. Нецепляевым, Е.П. Плоскоголовым и др. в середине 70-х годов XX века, было установлено, что наиболее эффективным из всех исследованных флегматизаторов вспышек и взрывов метана и угольной пыли является фосфорнокислый аммоний. Достаточно 0,234 кг/м^3 данной соли для гашения вспышек метано-пылевоздушной смеси [6]. Фосфорнокислые соли наиболее эндотермичны, имеют большую энтропию и теплоёмкость, чем другие флегматизаторы.

По данным Корольченко А.Я. [5] для ингибирования метановоздушной смеси необходимо 30 % водяного пара или 25 % CO_2, для других флегматезаторов содержание его доводится до величины ~ 400 граммов на 1 метр кубический стехиометрической смеси метана с воздухом. Это приводит к уменьшению процентного содержания кислорода в воздухе до 14,5 и 16 % соответственно. Также в [5] отмечается, что огнетушащая концентрация порошков как минимум равна концентрации газового ингибитора, а зачастую больше ввиду неоднородности размеров частиц в порошках. Порошковый ингибитор по принципу своего действия аналогичен газовому ингибитору – поглощение активных центров, разбавление горючей газовой смеси, уменьшение температуры пламени. И чем быстрее ингибитор переходит в газовую фазу – плавится, испаряется или сублимирует – тем он эффективнее.

У порошков процессы до их испарения происходят на поверхности частиц. Поэтому чем выше суммарная поверхность частиц, тем эффективнее порошковый ингибитор. А это определяется среднемассовым диаметром частиц порошка, чем он меньше, тем больше его суммарная поверхность при одинаковой массовой концентрации частиц. Однако чем мельче частицы, тем труднее их создавать, и труднее доставлять в загазованную область газа. Имеются опыты с порошками со средним размером 10 мкм, показавшие его большую эффективность по сравнению с теми же порошками по типу, но имеющие больший средний размер частиц. По данным [6] удавалось уменьшить скорость распространения пламени порошками карбонатов и бикарбонатов калия и натрия до минимальных значений при использовании порошка с диаметром 10 мкм при добавлении такого порошка в количестве 0.1 кг/м^3.

Для флегматизации горючей пыли медицинских органических веществ необходимо присутствие в смеси талька в количестве более 50 % по массе.

В [6] отмечается сильная зависимость удельного расхода порошка от размера его частиц для не воспламенения стехиометрической метановоздушной смеси. Там же представлены данные о необходимых массовых концентрациях порошков, обеспечивающих не воспламенение метановоздушной смеси стехиометричесого состава. При дисперсности порошка 50-60 мкм данные минимальной массовой концентрации порошка (в порядке убывания эффективности): $K_2C_2O_4*H_2O$ – 0,1 кг/м^3, NaCl – 0,15 кг/м^3, Na_2CO_3 – 0,2 кг/м^3, $NH_4H_2PO_4$ – 0,26 кг/м^3, K_2CO_3 – 0,65 кг/м^3, KCl –

0,84 кг/м^3. Из приведенных данных видно, что концентрации весьма большие. И эти данные только по не воспламенению. Следует ожидать, что при ингибировании горения необходимо большее массовое содержание порошков.

В [6] приводятся данные экспериментов в трубе диаметром 2 м и длиной 15 м, где порошком ПСБ в количестве 5 кг было прекращено горение метановоздушной смеси стехиометрического состава. При использовании порошка бикарбоната натрия потребовалось 10 кг порошка. Использовалась локализованная подача порошка и нет данных о локальных значениях его массовой концентрации, обеспечившей погасание пламени в этой трубе (удельный расход порошка на весь объем трубы небольшой и составляет 0,11 и 0,22 кг/м^3, данных о создаваемой концентрации порошка в огнепреграждающем облаке не приводятся). В [6] также приведены данные опытов объемного тушения метановоздушной смеси стехиометрического состава в камерах объемом 4,5 и 25 м^3. Успешное объемное тушение происходило при удельном расходе порошка 0,5 кг/м^3.

В [7] есть данные о тушащих концентрациях порошков при горении угольной пыли. Установлено, что для нейтрализации взрываемости угольной пыли необходимо вводить нейтрализующие добавки в размере от 50 до 70 % массы инертной пыли в составе смеси. Для нейтрализации взрываемости отложений пыли, которая в случае распространения ударной волны и горения МВС поднимается со стенок, и участвует в горении, необходимо до 80 % инертной пыли в составе смеси [7]. Это экспериментальные данные.

В [8] представлены исследования огнетушащей концентрации порошкового состава «трополяр» изготавливаемого на основе фосфата аммония. Опыты проводились в экспериментальной штольне длиной до 300 м. Полностью моделировались условия взрыва в выработке шахты. Порошковое облако перед фронтом пламени создавалось на длине 4-5 метров в сечении 8 м^2 путем автоматического выброса от 120 до 180 кг. То есть начальная концентрация порошка составляла 3-4 кг на м^3. После прохождения ударной волны порошковый состав вместе с газом относился от места образования на 40-60 метров в зависимости от интенсивности взрыва метана. Пламя взрыва также дальше этого места не уходило. Такое количество порошка функцию огнепреграждения выполняет. Меньшее количество, по данным [8], фронт пламени пропускает. Опыты, представленные в [8], кардинально отличаются от опытов, выполняемых в других условиях. Только в условиях экспериментальной шахты можно создать те динамические условия, которые действуют в шахтах в аварийной ситуации. В частности облако порошка на длине 4-5 метров с плотностью 3-4 кг порошка на кубический метр проходит перед взаимодействием с фронтом горения порядка 60 метров, испытывает воздействие турбулентной диффузии и влияние пограничных слоев стенок. При этом неизбежно концентрация порошка меняется. Кроме того, при движении ударной волны в обязательном порядке в поток газа за ударной волной вовлечется угольная и другая пыль, из отложений на стенках выработок.

Вода используется для создания водораспылительных завес перед зоной взрыва породы с использованием ВВ, чтобы пламя и продукты взрыва не воспламенили метан в выработках [7]. Согласно требованиям ПБ массовая концентрация тонкодиспергированной воды должна быть не менее 300 г/м^3. Такие завесы создаются либо специальными устройствами формирования водораспылительных завес путем взрыва маленькой массы ВВ в центре сосуда с водой (20 и 30 литров), либо высоконапорными форсуночными устройствами, образующими капли воды размером 100 мкм серией форсунок диаметром 1,5-2 мм при давлении воды в подающем трубопроводе 30-40 атм. Как отмечается в [7] при использовании водяных заслонов в классическом исполнении (ёмкости с водой на полках), или в современном исполнении (водяные карманы) ударная волна интенсивности 0,2 атм (перепад давления перед и за ударной волной 0,2 атм, скорость за ударной волной 50 м/с) вызывает дробление струй воды из водяного заслона до размера капель 100 мкм. Гашение пламени таким заслоном после образования мелкодисперсного аэрозоля идет с сильным поглощением тепла на разогрев и испарение капель, которое приводит к понижению температуры горения и разбавлению исходной смеси инертным газом – парами воды. Как уже отмечалось, для прекращения горения метановоздушной смеси стехиометрического состава необходимо ее разбавить парами воды на 30 %. Рекомендуемая плотность водяных заслонов 300-400 л на квадратный метр поперечного сечения выработки на длине 30 метров это составит 10 л/м^3. Величина, возможно, избыточная, но с учетом потерь воды при движении её распыла за ударной волной какое-то время до прихода фронта горения, к моменту взаимодействия с фронтом горения в облаке остается достаточное количество аэрозоля воды. Это подтверждается многочисленными опытами в экспериментальных штольнях, результаты которых представлены в [7]. Отдельные данные о тушащей эффективности порошковых ОТВ приведены в [10-15].

Расчетно-теоретические данные об удельных расходах порошка для гашения горения метановоздушной смеси. Имеются теоретические исследования эффективности огнепреграждения порошковыми составами при горении смесей горючих газов с воздухом. Моделирование в основном проводится в рамках тепло-диффузионной модели горения Я.Б. Зельдовича - Д.А. Франк-Каменецкого, примененной для реагирующих газодисперсных систем [16-20]. Приведем некоторые результаты моделирования и расчетов огнепреграждения порошковыми составами при горении газовых смесей.

На основе сформулированной физико-математической модели распространения пламени в газе, содержащем аэрозоль воды [22-24], основанной на тепло-диффузионной модели распространения ламинарного пламени в газе и учитывающая процессы тепло- и массообмена между газовой фазой и каплями жидкости, проведены расчеты взаимодействия пламени с облаком аэрозоля. Проведена оценка времени тепловой релаксации дисперсной фазы в волне горения, которая позволила приближенно оценить дисперсность аэрозоли, способной повлиять на скорость пламени в горючем газе. Оценка показала, что капли аэрозоля диаметром 20 мкм способны за счет теплообмена понизить температуру пламени. Необходимая массовая концентрация оценивалась на основе приближенной формулы скорости горения и на основе численного решения задачи в полной постановке. Расчеты показали, что массовая концентрация капель аэрозоля 0,2 кг/м^3 уменьшает скорость распространения пламени в 2 раза. При дальнейшем увеличении массовой концентрации происходит срыв горения. На основе численного решения системы уравнений математической модели определена структура волны горения в газе, содержащем аэрозоль воды. Определена область параметров аэрозоли, при которых присутствие аэрозоли приводит к уменьшению скорости пламени. Выявлено, что на горение метановоздушной смеси влияют капли размером не более 100 мкм. Такие капли эффективно уменьшают скорость пламени, концентрацию горючего и кислорода в воздухе за счет испарения. Из расчетов установлено, что достаточная массовая концентрация аэрозоли воды для уменьшения скорости фронта пламени в 2-3 раза составляет 0,2-0,3 кг/м^3. С учетом того, что горение в широких выработках происходит в турбулентном режиме, концентрация метана для самого неблагоприятного случая равна стехиометрической, массовая концентрация аэрозоля воды увеличивается до 0,4-0,5 кг/м^3. Было также проведено сравнение полученных расчетным путем характеристик аэрозоли (размера капель и массовой концентрации аэрозоли), эффективно влияющих на торможение пламени, с техническими требованиями, предъявляемыми при практическом использовании водяных завес к дисперсности и массовой концентрации аэрозоли воды. Получено хорошее количественное соответствие этих характеристик.

Сравнение эффективности использования аэрозоли воды и инертной пыли для огнепреграждения показало, что существует критический размер дисперсной фазы, выше которой эффективность использования аэрозоли воды и инертных порошков для огнепреграждения становится одинаковой [25-31]. На основе теплодиффузионной модели горения газа с взвешенными в нем инертными частицами решена задача определения зависимости скорости горения газа от дисперсности и массовой концентрации частиц. В модели учитывается движение газа и частиц, обусловленное тепловым расширением газа при его горении в изобарических условиях [30, 31]. Получены оценки массовой концентрации и размера частиц, эффективно влияющие на скорость пламени.

Расчеты были проведены для смеси горючего газа (окиси углерода с примесями) с воздухом, с недостатком горючего (25 % горючего, что составляет 0,5 от стехиометрического состава). Теплофизические характеристики газовой смеси: $c_g = 1000\ Дж/(кг \cdot K)$, $\overline{\rho}_{g,0} = 1.29\ кг/м^3$, $\lambda_g = 0.0387\ Дж/(м \cdot c \cdot K)$, $\lambda_g / \left(c_g \overline{\rho}_{g,0}\right) = 3 \cdot 10^{-5}\ м^2/c$. Рассчитанное значение скорости распространения пламени относительно исходной смеси газов составляет 0,2 м/с, что соответствует данным [32]. Значение скорости фронта горения относительно стенок при зажигании у закрытого торца составит 0,4 м/с. В качестве дисперсной фазы были выбраны частицы сланца. Его теплофизические характеристики: $c_k = 1200\ Дж/(кг \cdot K)$, $\overline{\rho}_k^0 = 2700\ кг/м^3$. При наличии инертных частиц радиуса $r_k = 20\ мкм$ в реагирующем газе с массовой концентрацией $0.215\ кг/м^3$, скорость распространения пламени относительно стенок при зажигании у закрытого торца составляет 0,218 м/с, а при $r_k = 10\ мкм$ и при той же массовой концентрации частиц скорость фронта составляет 0,13 м/с. При расчетах для метановоздушной смеси (при недостатке горючего), имеющей большую скорость пламени массовая концентрация дисперсной фазы, обеспечивающая уменьшение скорости горения во столько же раз, составляет 0,39 кг/м^3.

Вывод. Таким образом, на основе анализа научно-технической информации о необходимых массовых концентрациях порошкового ингибитора для предотвращения распространения фронта горения метановоздушных смесей, в зависимости от свойств порошкового состава и режима распространения горения, необходимая массовая концентрация порошка ингибитора составляет величину от 0,2 до 0,8 кг/м^3.

Библиографический список

1. Деньга В.В.. Анализ порошкообразных ингибиторных составов, применяемых в автоматических системах взрывозащиты. Электронный ресурс http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/szsb/2009_1/Denga.pdf

2. Электронный ресурс http://mvkmine.ru/lrus/document/bukl_ru.doc

3. Электронный ресурс http://pozhproekt.ru/enciklopediya/ognetushashhaya-koncentraciya

4. Баратов А.Я., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я. и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: Справ. изд. - М.,1987.

5. Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. – М.: Пожнаука, 2007.- 266 с.

6. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. – М.: Стройиздат, 1982. – 72 с.

7. Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Качан В.Н., Сергеев В.С. Предупреждение взрывов пыли в угольных шахтах. – М.: Недра. 1974. – 304 с.

8. Штолль Э.В., Виманн В. Подавление взрывов в подземных выработках автоматическими заслонами системы BVS //Глюкауф-форшунгсхефте. - 1979. - № 1. - С. 38-46.

9. Померанцев В.В., Шагалова С.Л., Резник В.А., Кушнаренко В.В. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1978. – 144 с.

10. Умнов А.Е., Голик А.С., Палеев Д.Ю., Шевцов Н.Р. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях. – М.: Недра, 1990. – 286 с.

11. 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.

12. Грибкова С.И., Предводителев А.С. О влиянии твердых примесей на скорость распространения пламени в горючих газовых смесях // ЖТФ. - 1937. - Т.7, вып. 18-19. - С. 1801-1811.

13. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Кобзарь В.Н., Азатян В.В. Мусеридзе М.Д. Дзоцекидзе З.Г., Петвиашвили Д.И., Наморадзе М.А. Ингибирование пламени метана взвесями солей // Физика горения и взрыва. - 1976. - Т.12, № 1. - С. 72-75.

14. Краснянский М.Е., Рыжков В.С. Применение порошкового аэрозоля для предотвращения взрывов метана и угольной пыли. // Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем. Тез. Докл. XIV Всесоюзной конф. – Одесса, 1986. - С. 16.

15. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. – М.: Химия, 1974.

16. Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. Критические условия самовоспламенения совокупности частиц // Физика горения и взрыва. - 1969. - Т.5, №1. - С. 129-136.

17. Лисицын В.И., Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. О периоде индукции при воспламенении совокупности частиц // Физика горения и взрыва. - 1971. - Т.7, №1. - С. 3-9.

18. Гуревич М.А., Озерова Г.Е., Степанов А.М. Расчет гетерогенного воспламенения совокупности частиц // Физика горения и взрыва. - 1971. - Т.7, № 1. - С. 518-527.

19. Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. О распространении пламени по взвеси частиц в газе // Доклады АН СССР. - 1971. - Т.201, №1.

20. Гуревич М.А., Озерова Г.Е., Степанов А.М. Критические условия самовоспламенения полидисперсной газовзвеси частиц твердого топлива // Физика горения и взрыва. - 1971. - Т.7, № 1. - С. 88-93.

21. Горшкова С.Н., Кришеник П.М., Руманов Э.Н., Шкадинский К.Г. Режимы ускорения пламени в газовых взвесях // Химическая физика. - 1986. - Т.6, №6. - С. 843-847.

22. Krainov A.Yu., Shaurman V.A. Inhibition of Gas Flame by Spray. // Chemical Gasdynamics and Combustion of Energetic Materials. Book of Abstracts. Tomsk, 1995. - p. 76.

23. Крайнов А.Ю., Шаурман В.А. Ингибирование газовых пламен аэрозолью капельной жидкости//Физика горения и взрыва. - 1996. - Т.32, № 4. - С. 55-61.

24. Бузуков А.А. Снижение параметров воздушной ударной волны с помощью воздушно-водяной завесы // Физика горения и взрыва. - 2000. - Т.36, №3. - С. 120-130.

25. Губин Е.И., Дик И.Г. Распространение пламени в запыленном газе // Физика горения и взрыва. - 1987. - Т.23, № 6. - С. 25-29.

26. Дик И.Г., Губин Е.И., Крайнов А.Ю., Макаров А.И. Влияние дисперсного материала на скорость распространения пламени в газе // В кн. Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем. Тез. докл. XIV Всесоюзн. конф. - Одесса, 1986, т. 2.

27. Дик И.Г., Губин Е.И., Крайнов А.Ю. Нестационарное взаимодействие волны горения с пылевым облаком // ИФЖ. - 1988. - Т.55, № 2. - С. 236-243.

28. Крайнов А.Ю., Шаурман В.А. О пределах распространения пламени по запыленному газу // Физика горения и взрыва. - 1997. - Т.33, № 4. - С. 14-20.

29. 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.

30. 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.

31. Дементьев А.А., Крайнов А.Ю. Исследование влияния относительного движения взвеси инертных частиц на скорость горения газовой смеси // Вестник ТГУ. Математика и механика. - 2013. - № 2(22). - С. 60-66.

32. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968. – 592 с.

УДК 622.868.42

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ВОЛНЫ СЖАТИЯ ВО ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ БЕЗВРУБОВОЙ ПЕРЕМЫЧКЕ С УЧЕТОМ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА НА КОНТАКТЕ С ПОРОДАМИ

[1]к.ф.-м.н. Баганина А.Е., [1,2]д.т.н. Палеев Д.Ю.

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

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

Аннотация. Приведены результаты численного расчета затухания волны сжатия (ВС) во взрывоустойчивой безврубовой перемычке. В модели учитывалась адгезионная прочность материала перемычки на контакте с породами. В качестве материала перемычки использовались параметры современных материалов для возведения взрывоустойчивых преград («Текбленд», «Барьер», «Барьер Кр»).

Ключевые слова: *м*атематическое моделирование, волна сжатия, взрывоустойчивая перемычка, адгезионная прочность.

Введение. Согласно действующей инструкции [1] в шахтах следует выполнять меры по изоляции погашаемых горных выработок и выработанных пространств от действующих выработок и от земной поверхности. Шахты, разрабатывающие пласты угля, склонные к самовозгоранию, действующие пожары и др. ([1]) следует изолировать взрывоустойчивыми изолирующими перемычками. В тех случаях, когда изоляцию необходимо провести быстро – возводят безврубовые изолирующие перемычки.

Безврубовые перемычки по внешнему контуру соприкасаются с поверхностью горной выработки, поэтому они оказывают сопротивление действию давления взрыва за счет сил сцепления боковой поверхности с поверхностью горных пород (адгезионной прочности). В данной работе приведены результаты математического моделирования затухания волны сжатия во взрывоустойчивой безврубовой перемычке с учетом адгезионной прочности материала на контакте с породами. В работе представлены результаты численных расчетов с использованием физико-механическими характеристик цементных смесей типа Текбленд», «Барьер» и «Барьер Кр».

Математическая постановка. На рис. 1 представлена область решения задачи в виде двумерного канала. На участке $L1 < y < L2$, $0 < x < R$ задавались параметры взрыва, на участке $L3 < y < L4$, $0 < x < R$ - параметры взрывоустойчивой перемычки, на остальных участках области решения задались параметры воздуха при нормальных атмосферных условиях. Перемычка рассматривалась в рамках модели сжимаемой идеальной упругопластической среды.