

Введение Взрывы газа и угольной пыли относятся к авариям с наиболее тяжкими последствиями в социальном и экономическом плане. Взрыв метано-воздушной смеси и угольной пыли в шахте, сопровождающийся формированием и распространением по сети горных выработок ударных волн – очень опасный вид подземной аварии. Угрожая жизни и здоровью горнорабочих, взрыв всегда приводит к разрушению выработок и повреждению расположенного в них горного оборудования. При этом социальные, материальные и финансовые потери могут достигать катастрофических размеров. Для обеспечения безопасности условий труда рабочих на угольных шахтах необходимо эффективно производить гашение угольной пыли, так как пыль, находясь во взвешенном состоянии, в смеси с метаном, образует взрывчатую систему. Гашение угольной пыли в воздухе забоя может осуществляться: предварительным нагнетанием воды в пласт для его увлажнения, орошением забоя водой с подачей их, по возможности, непосредственно в места отбойки угля, а также дополнительно, путем создания заградительных завес. Таким образом, актуальной является техническая проблема повышение эффективности способов гашения угольной пыли путем снижения энергетических затрат на создание заградительных завес в сети горных выработок. В настоящей работе рассмотрена математическая модель процесса взрыва облака метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт. Проведен анализ способа защиты горных выработок от разрушительного воздействия взрывов путем создания водяных завес для снижения концентрации угольной пыли в воздухе. Анализ последних достижений и публикаций Взрыв взвешенной в воздухе угольной пыли может произойти от электрической искры, от раскаленных частиц взрывчатых веществ, вылетающих из шпура, и от других источников воспламенения [1]. Существенное влияние на взрыв угольной пыли оказывает присутствие метана CH_4 . Так, при отсутствии метана угольная пыль взрывается при содержании ее в воздухе не менее 30 – 40 г/м³, а при наличии CH_4 2 % – опасная концентрация пыли понижается до 10 г/м³ и при наличии метана 3 % – эта концентрация еще понижается до 5 г/м³. Для предупреждения взрыва достаточно снизить концентрацию пыли до 5 г/м³, а с учетом запаса – до 1 г/м³ [2]. Одним из наиболее эффективных методов предотвращения чрезвычайной ситуации является создание водяных завес для снижения концентрации угольной пыли. При расходе воды до 35 л на каждую тонну добываемого угля, давлении воды у оросителей до 10 – 15 атмосфер и рациональном расположении оросителей эффективность способов гашения пыли предварительным нагнетанием и орошением достигает 95 %. В качестве пылеподавляющих устройств используются обычные распылители. При этом необходимо учитывать, что в процессе создания водяной завесы размер капли предназначенной для захвата угольно-пылевой частицы варьируется от 50 – 250 мкм, что существенно влияет на захват и осаждение угольной пыли. В отличие

от обычных распылителей, атомайзеры способны создавать мелкодисперсную водовоздушную смесь с витающими каплями, характерный размер которых составляет порядка 20 – 40 мкм [3 – 4]. Натурные испытания с отдельными экспериментальными образцами атомайзеров показали не только способность создавать частицы заданного размера, но и существенно снижать расход жидкости при создании водовоздушной завесы. Создание и удержание водовоздушного облака гораздо эффективней, чем при обычных распылителях. Адекватное описание вышеназванных процессов – горение, выброс, смешение и распространение газовой примеси в атмосфере; истечение газовой примеси в атмосферу; взрыв газообразной примеси в атмосфере с учетом химического взаимодействия (в том числе в многосвязных областях со сложным рельефом местности или в закрытых объемах), использующих для снижения экологического и пожарного рисков мелкокапельные технологии возможно только с использованием системы нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа. В настоящее время численное моделирование турбулентных течений осуществляют путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности [5, 6]. Однако большинство моделей турбулентности не описывают с одинаковой степенью адекватности различные типы течений, особенно это касается течений с интенсивными отрывами потока и/или большими градиентами давления температуры. Поэтому существует необходимость построения новых моделей и расчетных схем для численного моделирования таких течений. Постановка задачи Необходимо определить эффективность водяных завес как средства влияния на процесс распространения ударных волн и высокотемпературной смеси продуктов сгорания при взрыве облака метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт на основе математической модели рассматриваемого процесса. Рудничная пыль представляет собой твердое вещество полезного ископаемого или породы в состоянии тонкого раздробления (измельчения). Находясь во взвешенном состоянии в воздухе, пыль образует дисперсную систему (аэрозоль). Частички пыли составляют дисперсную фазу, воздух является дисперсионной средой. Математическая модель экологических процессов в атмосфере В результате структурного анализа перечисленных экологических процессов в атмосфере (выброса, смешения и распространения газовой примеси в атмосфере; истечения газовой примеси в атмосферу; взрыва газообразной примеси в атмосфере с учетом химического взаимодействия (в том числе в многосвязных областях со сложным рельефом местности), с учетом термодинамических свойств газов, а также алгоритма численного моделирования этих процессов), декомпозиции полной математической модели процесса выявлено, что основное влияние на процесс оказывает интенсивность конвективного и турбулентного переноса компонент примеси. Таким образом, для описания процессов смешения многокомпонентного газа в рассматриваемом

случае достаточно использовать усеченные уравнения, полученные из уравнений Навье-Стокса путем отбрасывания вязких и диффузных членов – приближение Эйлера с источниковыми членами. Расчетной областью Ω является параллелепипед с прямолинейными образующими (рис. 1), расположенный в правой декартовой системе координат (X, Y, Z) с основанием в плоскости XOZ (ось Y ориентирована в направлении, противоположном действию сил тяжести Земли). Рис. 1 – Расчетная схема смешения реагирующих газов с воздухом, их горения (с учетом химического взаимодействия компонент смесей) и дальнейшего рассеяния смеси. Расчетная область разбивается на пространственные ячейки, причем размеры граней подбираются в соответствии с характерным размером особенностей расчетной области (шероховатости обтекаемой поверхности, размерностью обтекаемых объектов). Полная система уравнений, описывающая нестационарное трехмерное течение трехкомпонентной смеси газов в данной постановке имеет вид [7 – 9]: (1) где – вектор-столбцы вида: (2), (3), (4), (5), (6) где – время; – составляющие вектора скорости; – давление и плотность; – полная энергия единицы объема смеси газов; (7) e – внутренняя энергия единицы массы газа; компоненты вектора – суть проекции распределенных объемных источников, – ускорение свободного падения, – интенсивность тепловыделения в единице объема газа вследствие химической реакции. Закон переноса компоненты смеси (горючий газ, воздух, продукты сгорания) с учетом скорости турбулентной диффузии, имеет вид [7 – 9]: (8) где – относительная массовая плотность той компоненты смеси, $i = 1...3$, (отношение плотности газообразного вещества компонента к плотности смеси): 1 – горючее, 2 – воздух, 3 – продукты сгорания; – интенсивность изменения плотности компоненты смеси вследствие турбулентной диффузии в соответствии с законом Фика (коэффициент турбулентной диффузии определялся по методике, предложенной М.Е.Берляндом [10]); – интенсивность изменения плотности компоненты смеси, вследствие химической реакции. Система уравнений (1 – 8) является незамкнутой. Дополним ее уравнениями, определяющими теплофизические свойства смеси: Для идеального политропного газа величина e связана с P и ρ смеси зависимостью: . Интенсивность изменения плотности горючего, вследствие химической реакции, определялась как произведение молекулярной массы горючего на скорость его мольного изменения. Рассматривалась химическая реакция-«брутто»: , где – стехиометрические коэффициенты, – химические вещества. Скорость мольного изменения определялась по формуле: , где – параметры, полученные на основе обобщения экспериментальных данных [11], – мольная концентрация i -той компоненты смеси: . Интенсивность изменения плотности продуктов сгорания определялась на основе закона движущихся масс: . Интенсивность тепловыделения в единице объема газа вследствие химической реакции определялась по формуле: , где – коэффициент полноты сгорания, – низшая

теплота сгорания горючего. При постановке граничных условий полагается, что расходная составляющая скорости не превосходит скорость звука. Граничные условия на входе будем задавать на поверхностях тех граней, примыкающих к границам расчетной области, через которые в расчетную область поступает атмосферный воздух. Набегающий поток на входе определяется величинами: – полной энтальпии ; (9) – функции энтропии ; (10) – направлением вектора скорости потока (углами); – относительной массовой плотностью горючего (, если поступает газообразное вещество компоненты смеси, например, метан). Параметры потока на входе определяются из равенств (9, 10) с учетом заданных с привлечением соотношения для “левого” инварианта Римана [12]. На непроницаемых участках, ограничивающих расчетную область поверхностей, выполняются условия «непротекания»: , где – вектор нормали к рассматриваемой границе. Граничные условия на выходе будем задавать на поверхностях тех граней конечно-разностных ячеек, которые примыкают к границам расчетной области и через которые предполагается вытекание или втекание смеси. В выходных областях, кроме атмосферного давления , задаваемого либо взятого из эксперимента, использовались соотношения для “правого” инварианта Римана [12]. Задавались «мягкие» граничные условия для искомых относительных массовых плотностей компонент на всех ограничивающих расчетную область поверхностях. В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области принимаются параметры окружающей среды. В ячейках, занимаемых облаком газообразной компоненты смеси, которое образовалось в результате мгновенного выброса, относительная массовая концентрация компоненты смеси принимается равной . В ячейках с испарением или истечением газа задается закон изменения расхода компонента смеси. Предполагалось, что горение происходит в объеме расчетной области, занимаемом горючей смесью с концентрацией горючего в диапазоне между минимальным и максимальным концентрационными пределами воспламеняемости . Величины , задавались на основе обобщения экспериментальных данных [13]. Учет распыления капель (частиц пыли твердых фракций) Качество распыла, как известно, характеризуется интегральными и дифференциальными кривыми распределения объемов (числа, поверхности) капель по их диаметрам и различными понятиями среднего диаметра капель. В большинстве случаев используемая в технике распыленная жидкость состоит из капель различных размеров, т.е. имеет полидисперсный характер. Для описания кривых распределения капель по размерам предложены различные зависимости. Наибольшее распространение нашло уравнение Розина-Раммлера [14]: . Здесь P – объемная доля капель, диаметр которых меньше ; – характерный размер или средний диаметр, соответствующий определенному значению $P = 0,3679$; – константа распределения, характеризующая степень неоднородности распыла (обычно $2 \leq \leq 4$). Тогда плотность распределения капель по диаметрам

примет вид: . Учет влияния аэродинамического сопротивления капель (частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси Определим силу сопротивления, действующую на каплю (частицу пыли): , где – площадь поверхности, – коэффициент аэродинамического сопротивления, – скорость потока. Если капля сохраняет сферическую форму, то для определения можно рекомендовать соотношение [15]: , где – число Рейнольдса. Тогда осредненная по диаметрам капель сила аэродинамического сопротивления для выбранного контрольного объема определяется по формуле: , где – количество капель в контрольном объеме, – общий расход воды (предполагается, что вода непрерывно подается в расчетную область), – шаг по времени, – количество контрольных объемов в области с источниками (капели, частиц пыли твердых фракций), – объем капли. Количество частиц твердых фракций в контрольном объеме определяется по формуле: , где – концентрация пыли во взвешенном состоянии, – контрольный объем, – плотность вещества твердой фракции. Учет влияния аэродинамического сопротивления капель (частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси осуществлялся посредством введения в уравнения движения осредненной объемной силы сопротивления: . При этом предполагалось, что сумма удельной мощности сил сопротивления и удельной диссипируемой мощности равна нулю: . Учет влияния тепловыделения вследствие фазового перехода при кипении капель (химической реакции горения частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси Определим интенсивность изменения плотности примеси вследствие фазового перехода при кипении капель воды: , а интенсивность изменения плотности примеси вследствие химической реакции горения: , где – общее изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения. Будем исходить из того, что известен закон, согласно которому время горения одной частицы зависит от начальной массы этой частицы: , где $\tau = 6,14 \times 10^6$. Тогда согласно известным из математического анализа и теории обыкновенных дифференциальных уравнений преобразованиям может быть получен закон определения массы частицы в произвольный момент времени химической реакции горения: , а также зависимость изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения: , где – текущее время. Общее изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения может быть определено по формуле: . Учет влияния фазового перехода при кипении капель воды (химической реакции горения частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси осуществлялся посредством введения в уравнение энергии интенсивностей тепловыделения в контрольном объеме: , где – удельная теплота парообразования, – коэффициент полноты сгорания, – низшая теплота сгорания. Таким образом, предложена математическая модель смешения газов, которая

описывает экологические процессы в атмосфере, что позволит прогнозировать поля температуры, давления и концентрации вещества примеси в рассматриваемом объеме. Метод представления и численное решение задач смешения газов в атмосфере Векторное уравнение (1) является следствием законов сохранения массы, импульса и энергии, которые могут быть представлены в интегральной форме для каждой расчетной ячейки: (11) где V – объем элементарной расчетной ячейки; σ – ограничивающая поверхность данной ячейки, которая имеет внешнюю нормаль; \hat{A} – тензор плотности потока консервативных переменных, столбцами которого являются векторы, соответственно. Закон переноса компоненты смеси (8) может быть также представлен в интегральной форме для каждой расчетной ячейки: (12)

Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени представляет собой известное решение на временном слое с индексом n . Параметры в момент времени (на слое) рассчитывались посредством применения явных разностных аппроксимаций для соотношений (11, 12) в рамках интегро-интерполяционного метода С.К. Годунова [12] первого порядка точности. Устойчивость конечно-разностной схемы обеспечивается за счет выбора величины шага по времени τ в соответствии с условием Куранта.

Компьютерное моделирование рассматриваемых процессов осуществлялось с использованием программного комплекса FIREÒ [16], реализующего предложенную математическую модель. Программный комплекс FIREÒ позволяет вычислять плотность, скорость, давление, температуру смеси, концентрации компонентов смеси (топлива, воздуха, продуктов сгорания), скорость тепловыделения в пределах каждого контрольного объема смеси на каждом дискретном временном шаге. Приложение написано в интегрированной среде разработки Visual C++ 4.0 Enterprise Edition с применением библиотеки Microsoft Foundation Classes (MFC). Результаты исследования водяных завес как средства снижения последствий взрывов метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт

Проведено компьютерное моделирование процесса взрыва облака метано-воздушной смеси и угольной пыли в штреке угольной шахты. Расчетная область представлена на рис. 2. Вычислительный эксперимент проводился при следующих условиях: длина штрека m , высота штрека была равна m , скорость ветра на входе составляла m/s , облако метано-воздушной смеси располагалось на расстоянии m от входа, радиус облака составлял m (см. рис. 2а). На расстоянии m располагалась зона, заполненная мелкодисперсной фазой – частицами угольной пыли либо каплями воды (в зависимости от рассматриваемого сценария расчета). Предполагалось, что в случае наличия в этой зоне капель воды, обеспечивается полное осаждение угольной пыли. На расстоянии m располагалась контрольная точка P , в которой осуществлялись изменения избыточного давления, температуры газовой смеси. Форма поперечного сечения штрека представлена на рис. 2б,

здесь м, м, м. Рассматривались три возможных сценария развития событий, связанных с процессом взрыва облака метано-воздушной смеси в штреке. В начальный момент времени в результате взрыва метано-воздушной смеси формировалось облако продуктов сгорания с высоким давлением и температурой. Далее реализовался процесс рассеяния продуктов сгорания, сопровождающийся конвективным переносом и турбулентным рассеянием продуктов сгорания вдоль штрека. Согласно принятым расчетным схемам в первом случае (сценарий 1) рассматривалось рассеяние продуктов сгорания вдоль штрека при наличии угольной пыли в воздухе, во втором случае (сценарий 2) – без наличия дисперсных фаз, в третьем случае (сценарий 3) – при наличии капель воды (водяной завесы) в воздухе. а б Рис. 2 – Схема расчетной области

Как следует из анализа результатов расчетов, присутствие в воздухе угольной пыли приводит к росту избыточного давления и температуры в штреке (по сравнению со случаями, когда воздух не содержит дисперсных фаз – кривые 2, при наличии водяной завесы в воздухе – кривые 3 на рис. 3), вызванных возгоранием этой фазы (см. кривые 1 на рис. 3 а и рис. 3 б). а б Рис. 3 –

Изменение избыточного давления (а) и температуры в контрольной точке: 1 – при наличии угольной пыли в воздухе; 2 – воздух без дисперсных фаз; 3 – при наличии водяной завесы в воздухе. Наличие капель воды обеспечивает не только полное осаждение угольной пыли, но и дополнительное снижение избыточного давления и температуры за счет перехода жидкой фазы в парообразное состояние при прохождении вдоль штрека высокотемпературного облака продуктов сгорания метано-воздушной смеси (см. кривые 3 на рис. 3а и рис. 3б). Для сравнения приводятся результаты расчетов изменения избыточного давления и температуры в контрольной точке для случая, когда воздух в штреке не содержал дисперсных фаз (см. кривые 2 а рис. 3а и рис. 3б). Как видно из анализа данных эффективность водяных завес снижается при гашении взрывов только метано-воздушной смеси (т.е. без участия во взрыве угольной пыли).

Выводы В данной работе рассмотрен способ защиты горных выработок угольных шахт от разрушительного воздействия взрывов путем создания водяных завес для снижения концентрации угольной пыли в воздухе. На основе численного моделирования решена задача определения необходимого расхода жидкости в водяной завесе и ее местоположения с целью осаждения угольной пыли, но и дополнительного снижения избыточного давления и температуры за счет перехода жидкой фазы в парообразное состояние при прохождении вдоль штрека высокотемпературного облака продуктов сгорания метано-воздушной смеси в подземных горных выработках угольных шахт. Взрыво-локализирующее действие водяных завес состоит в создании гасящей среды на пути распространяющегося по горной выработке фронта пламени от взрыва метано-воздушной смеси. Эффективность водяных завес снижается при гашении взрывов только метано-воздушной смеси (т.е. без участия во взрыве угольной

пыли).