

*Вамболь С.А., канд. техн. наук, зав. каф., НУГЗУ,
Скоб Ю.А., канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ»,
Угрюмов М.Л., д-р техн. наук, проф., НУГЗУ*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА
МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ
В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**
(представлено д-ром техн. наук Соловьем В.В.)

Рассмотрена математическая модель процесса взрыва облака метановоздушной 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.

Ключевые слова: математическая модель, метановоздушная смесь, угольная пыль, водяная завеса

Постановка проблемы. Взрывы газа и угольной пыли относятся к авариям с наиболее тяжкими последствиями в социальном и экономическом плане. Взрыв метановоздушной 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 пы-

ли 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 исследований 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 $30\text{-}40 \text{ г/м}^3$, а при наличии CH_4 2 % – опасная концентрация пыли понижается до 10 г/м^3 и при наличии метана 3 % – эта концентрация еще понижается до 5 г/м^3 . Для предупреждения взрыва достаточно снизить концентрацию пыли до 5 г/м^3 , а с учетом запаса – до 1 г/м^3 [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.

Постановка задачи и ее решение. Необходимо определить эффективность водяных завес как средства влияния на процесс распространения ударных волн и высокотемпературной смеси продуктов сгорания при взрыве облака метано-воздушной 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.

Учет распыления капель жидкости (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 [5]

$$P = 1 - \exp\left(-\left(d/d_+\right)^n\right).$$

Здесь P – объемная доля капель, диаметр которых меньше d ; d_+ – характерный размер или средний диаметр, соответствующий определенному значению $P = 0.3679$; n – константа распределения, характеризующая степень неоднородности распыла (обычно $2 \leq n \leq 4$). Тогда плотность распределения капель по диаметрам примет вид

$$\rho(d/d_+) = n \left(\frac{d}{d_+}\right)^{n-1} \exp\left(-\left(\frac{d}{d_+}\right)^n\right).$$

Учет влияния аэродинамического сопротивления капель жидкости (частиц пыли твердых фракций) на пара-

метры движения газовой смеси. Определим силу сопротивления, действующую на каплю (частицу пыли)

$$\vec{F}_{mp} = -C_d \frac{\rho q^2}{2} \sigma_k \frac{\vec{q}}{|\vec{q}|},$$

где $\sigma_k = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поверхности, C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, q – скорость потока. Если капля сохраняет сферическую форму, то для определения C_d можно рекомендовать соотношение [6]

$$C_d = 24 / \text{Re} + 4.4 / \sqrt{\text{Re}} + 0.35,$$

где $\text{Re} = \rho q d / \mu$ – число Рейнольдса. Тогда осредненная по диаметрам капель сила аэродинамического сопротивления для выбранного контрольного объема определяется по формуле

$$\vec{F}_{mp} = N_k \sum_{i=1}^I \rho(d_i) \vec{F}_{mp}(d_i),$$

где $N_k = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}} \tau}{m \rho_{\text{H}_2\text{O}} \sum_{i=1}^I \rho(d_i) V_{ki}}$ – количество капель в контрольном объ-

еме, $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – общий расход воды (предполагается, что вода непрерывно подается в расчетную область), τ – шаг по времени, m – количество контрольных объемов в области с источниками (капли, частиц пыли твердых фракций), $V_{ki} = (\pi/6)d_i^3$ – объем капли.

Количество частиц твердых фракций в контрольном объеме определяется по формуле

$$N_k = \frac{\rho_{C+} \Delta V}{\rho_C \sum_{i=1}^I \rho(d_i) V_{ki}},$$

где ρ_{C+} – концентрация пыли во взвешенном состоянии, ΔV – контрольный объем, ρ_C – 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: $\vec{f}_{mp} = \frac{1}{\rho} \vec{F}_{mp} / \Delta V$.

При этом предполагалось, что сумма удельной мощности сил сопротивления и удельной диссипируемой мощности равна нулю: $(\rho \vec{f}_{mp}, \vec{q}) + N_d = 0$.

Учет влияния тепловыделения вследствие фазового перехода при кипении капель жидкости (химической реакции горения частиц пыли твердых фракций) на параметры движения газовой смеси. Определим интенсивность изменения плотности примеси вследствие фазового перехода при кипении капель воды

$$\rho_{H_2O_s} = \frac{G_{H_2O}}{m\Delta V},$$

а интенсивность изменения плотности примеси вследствие химической реакции горения

$$\rho_{C_s} = \frac{G_C}{m\Delta V},$$

где G_C – 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

$$t_i = kd_i^2 = k \left(\frac{6M_{0i}}{\pi\rho_C} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где $k=6.14 \cdot 10^6$, $M_{0i} = \rho_C V_{ki}$. Тогда согласно известным из математического анализа и теории обыкновенных дифференциальных уравнений преобразованиям может быть получен закон определе-

ния массы частицы в произвольный момент времени химической реакции горения

$$M_i = [M_{0i}^{\frac{2}{3}} - 1.06 \cdot 10^{-7} \rho_C^{\frac{2}{3}} \cdot t]^{\frac{3}{2}},$$

а также зависимость изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения

$$G_{Ci} = 1.6 \cdot 10^{-7} \rho_C^{\frac{2}{3}} (M_{0i}^{\frac{2}{3}} - 1.06 \cdot 10^{-7} \rho_C^{\frac{2}{3}} \cdot t)^{\frac{1}{2}},$$

где t – текущее время.

Общее изменение в единицу времени массы частиц пыли твердых фракций вследствие химической реакции горения может быть определено по формуле

$$G_C = m N_k \sum_{i=1}^I \rho(d_i) G_{Ci}.$$

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

$$e_{H_2O_s} = -r(P) \rho_{H_2O_s}, \quad e_{C_s} = \xi H_{uC} \rho_{C_s},$$

где $r(P)$ – удельная теплота парообразования, ξ – коэффициент полноты сгорания, H_{uC} – низшая теплота сгорания.

Дополнительные данные к учету влияния фазового перехода при кипении капель воды (химической реакции горения частиц угольной пыли) на параметры движения газовой смеси. Распределение капель воды по размерам – $d \in [10, 150] \cdot 10^{-6}$ м, $d_+ = 75 \cdot 10^{-6}$ м. Распределение частиц угольной пыли по размерам – $d \in [10, 750] \cdot 10^{-6}$ м, $d_+ = 75 \cdot 10^{-6}$ м. Плотность угля $\rho_C = 1.5 \cdot 10^3$ кг/м³. Низшая теплота сгорания:

– каменный уголь: $H_{uC} = 27 \cdot 10^6$ Дж/кг;

– антрацит: $H_{uc} = 28 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Температура возгорания угольной пыли (антрацита): $T = 500^\circ\text{C}$. Концентрация угольной пыли во взвешенном состоянии – $\rho_{c+} \leq 0.4$ кг/м³.

Результаты исследования водяных завес как средства снижения последствий взрывов метано-воздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт. Компьютерное моделирование рассматриваемых процессов осуществлялось с использованием программного комплекса FIRE[®] [7], разработанного авторами, реализующего предложенную математическую модель. Программный комплекс FIRE[®] 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.

Математическая модель газодинамического процесса взрыва газовых облаков была верифицирована сопоставлением результатов численного моделирования с экспериментальными данными взрывов облака стехиометрической пропано-воздушной смеси, а также водородо-воздушной смеси в атмосфере [8-10].

Проведено компьютерное моделирование процесса взрыва облака метано-воздушной смеси и угольной пыли в штреке угольной шахты. Расчетная область представлена на рис. 1. Вычислительный эксперимент проводился при следующих условиях: длина штрека $L_z = 31.2$ м, высота штрека была равна $L_y = 2.2$ м, скорость ветра на входе составляла $q = 6$ м/с, облако метано-воздушной смеси располагалось на расстоянии $Z_1 = 10.1$ м от входа, радиус облака составлял $R_1 = 1.6$ м (см. рис. 1.а). На расстоянии $Z_2 = 13$ м 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 $Z_3 = 14.9$ м располагалась контрольная точка P , в которой осуществлялись изменения избыточного давления, температуры газовой смеси. Форма поперечного сечения штрека представлена на рис. 1.б, здесь $L_x = 3.2$ м, $Y_1 = 0.6$ м, $R_2 = 1.6$ м.

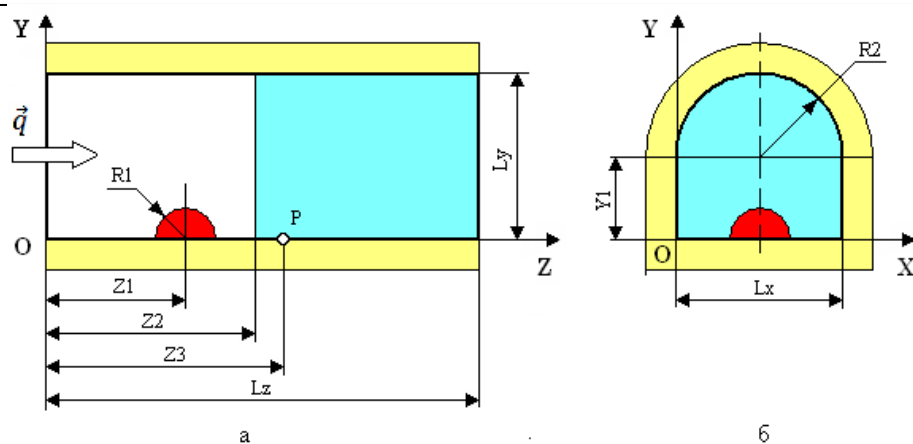


Рис. 1 – Схема расчетной области

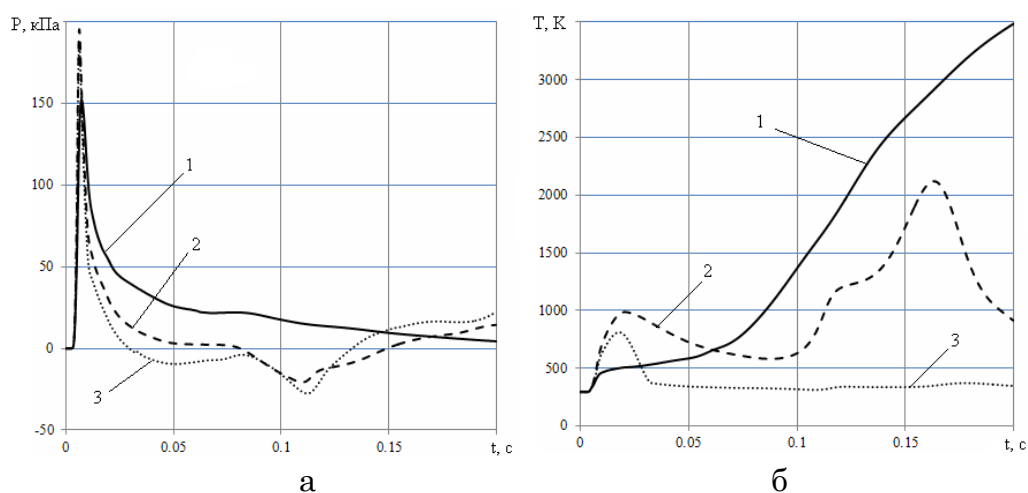


Рис. 2 – Изменение избыточного давления (а) и температуры в контрольной точке: 1 – при наличии угольной пыли в воздухе; 2 – воздух без дисперсных фаз; 3 – при наличии водяной завесы в воздухе

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.

Как следует из анализа результатов расчетов, присутствие в воздухе угольной пыли приводит к росту избыточного давления и температуры в штреке, вызванного возгоранием этой фазы. 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.

Выводы. Разработана 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. 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).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шохин В. Н. Гравитационные методы обогащения / В. Н. Шохин, А. Г. Лопатин. – М.: Недра, 1993. – 313 с.
2. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т. I. Обогащительные процессы и аппараты: учебник для вузов. – М.: Изд-во Московск. гос. горн, ун-та, 2001.– 472 с.
3. Ляшенко А.М. Физические аспекты пылеподавления и распылительные устройства для их реализации / А.М. Ляшенко, Н.В.Нечипорук, Н.В. Кобрина, С.А. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х: НАКУ «ХАИ», 2010. – Вып. № 48. – С. 234-239.
4. Кобрина Н.В. Моделирование процесса пылеподавления при погрузке, разгрузке и транспортировке сыпучих материалов / Н.В.Кобрина , В.Е. Костюк , В.Н. Кобрин, С.А. Вамболь / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х: НАКУ «ХАИ», 2010. – Вып. № 48. – С. 248-252.

5. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т.1. – М.: Наука, 1987. – 384 с.
7. Комп'ютерна програма „Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери «FIRE»”: Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 30079 / Скоб Ю.А., Угрюмов М.Л., Коробчинський К.П. (Україна). – Дата реєстрації 28.08.2009.
8. Скоб Ю.А. Численное моделирование взрывов газо-воздушных смесей в атмосфере // Авиационно-космическая техника и технология.– 2007.– №3(39).– С. 72-78.
9. Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugrjumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety. – San Sebastian (Spain). – 2007. – 15 p. (ICHS Paper No. 1.3.52)
10. Численная оценка последствий взрыва водорода в атмосфере / К.П. Коробчинский, Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов, В.В. Шенцов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 1 (48). – С. 79 – 88.

Вамболь С.О., Скоб Ю.А., Угрюмов М.Л.

Математичне моделювання вибуху метаноповітряної суміші та вугільного пилу в підземних гірничих виробках вугільних шахт

Розглянута математична модель процесу вибуху метано-повітряної суміші та вугільного пилу у підземних гірських виробок вугільних шахт. Проведено аналіз засобу захисту гірських виробок від руйнівної дії вибухів шляхом створення водяних завіс для зниження концентрації вугільного пилу у повітрі.

Ключові слова: математична модель, метано-повітряна суміш, вугільний пил, водяна завіса

Vambol S.A., Skob Ju.A., Ugrjumov M.L.

Mathematical simulation of explosion of methane-air mixture and coal dust in underground coal mines

A mathematical model of the explosion cloud of methane-air mixture and coal dust in underground coal mines. The analysis of the ways to protect the mines from the destructive effects of blasts through the creation of water curtains to reduce the concentration of coal dust in the air.

Key words: mathematical model, the methane-air mixture, coal dust, water curtain