

2. Анализ аварийности на предприятиях угольной промышленности России за 1999 год /А.С. Голик, И.Г. Федоров, В.А. Скрицкий и др.//РосНИИГД. – Кемерово, 2000. - 80 с.
3. Анализ аварийности на предприятиях угольной промышленности России за 2000 год /А.С. Голик, И.Г. Федоров, В.А. Скрицкий и др.//РосНИИГД. – Кемерово, 2001. - 107с.
4. Анализ аварийности на предприятиях угольной промышленности России за 2002 год /А.С. Голик, В.А. Зубарева, И.Г. Федоров и др. //РосНИИГД. – Кемерово, 2002. - 123 с.
5. Линденау Н.И. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах [Текст] / Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылов // - М.: Недра. – 1977. – 387 с.
6. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 декабря 2011 г. N 735 «Об утверждении Технологических схем многоштрековой подготовки выемочных столбов для отработки высокогазоносных и самовозгорающихся пологих угольных пластов, обеспечивающих высокопроизводительную и безопасную работу комплексно-механизированных забоев»
7. Скрицкий В.А. Взрывы метана в шахтах: трагедия на «Ульяновской»/ В.А. Скрицкий// «Горная промышленность», М., 2008. № 3. – С. 63-67.
8. Инструкция по предупреждению и тушению эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса. Кемерово, 2007. – 77с.
9. Попов В.Б. О природе начального теплового импульса при возникновении очагов самовозгорания угля в шахтах / В.Б. Попов, В.А. Скрицкий, В.И. Храмцов, С.В. Обидов // «Безопасность труда в промышленности», М., 2002, № 3. – С. 36-38.
10. Линденау Н.И. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах [Текст] / Н.И. Линденау, В.М. Маевская, В.Ф. Крылов // М.: Недра. – 1977. – 387 с.
11. Маевская В.М. Определение оптимальных утечек воздуха на процесс самовозгорания угля при щитовой системе разработки / В.М. Маевская // В сб. научн. тр. ВостНИИ: Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра, 1961. – С. 54-62.
12. Опарин В.Н. О некоторых закономерностях трещинообразования вокруг горных выработок / В.Н. Опарин, А.П. Тапсиев // в сб. «Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массива горных пород». – Фрунзе: Илим, 1979. – С. 342-349.
13. Опарин В.Н. Аналитический обзор взрывов метана в шахтах Кузбасса / В.Н. Опарин, В.А. Скрицкий // «Уголь», М., 2012. - № 2. – С. 29-32.

УДК 533.6.011

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ОТ ВЗРЫВА И ГОРЕНИЯ ГАЗОПЫЛЕВОЙ СМЕСИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

^{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. Представлена физико-математическая модель движения и горения газопылевой среды в условиях горной выработки за ударной волной от взрыва метановоздушной смеси. Проведенный расчетно-теоретический анализ влияния горения угольной пыли за ударной волной от взрыва метановоздушной смеси показал, что на интенсивность ударной волны существенно влияет скорость распространения волны горения газозвеси угольной пыли и массовая концентрация поднятой ударной волной угольной пыли.

Ключевые слова: ударная волна, угольная пыль, горение, интенсивность ударной волны.

Ведение. Интенсивное разрушение угольного пласта всегда сопровождается образованием большого количества угольной пыли, которая увлекается вентиляционным потоком и осаждается на стенках горных выработок. В аварийных ситуациях при взрывах метановоздушной смеси распространяющаяся ударная волна поднимает отложившуюся на стенках выработок угольную пыль

и увлекает её вместе с потоком газа. Если частицы угля попадают в высокотемпературный поток продуктов сгорания от взрыва метановоздушной смеси, то они быстро прогреваются и, при наличии кислорода, сгорают. Массо- и энергоприход от сгорания угольной пыли за ударной волной сказывается на ее интенсивности и величине взрывобезопасных расстояний [1, 2].

Рассматривается задача в следующей постановке. В прямолинейной тупиковой выработке произошел взрыв скопления метана. На стенках выработки имеются отложения угольной пыли с известной поверхностной плотностью. После взрыва впереди расширяющейся зоны, занятой горячими продуктами взрыва, распространяется воздушная ударная волна, которая поднимает пыль со стенок выработки и вовлекает ее в движение. За ударной волной возникает зона запыления газа. Частицы, находящиеся вблизи зоны продуктов взрыва, нагреваются за счет кондуктивного и турбулентного теплопереноса и излучения из высокотемпературной зоны продуктов взрыва. В прогретой области зоны запыления всегда имеется достаточное количество кислорода, способное воспламенить нагретые частицы. Горение пыли приводит к локальному повышению давления газа, что сказывается на интенсивности ударной волны и характере её затухания.

Основные предположения математической модели. Система уравнений. Схема рассматриваемого процесса распространения ударной волны с учетом горения частиц угольной пыли представлена на рис. 1.

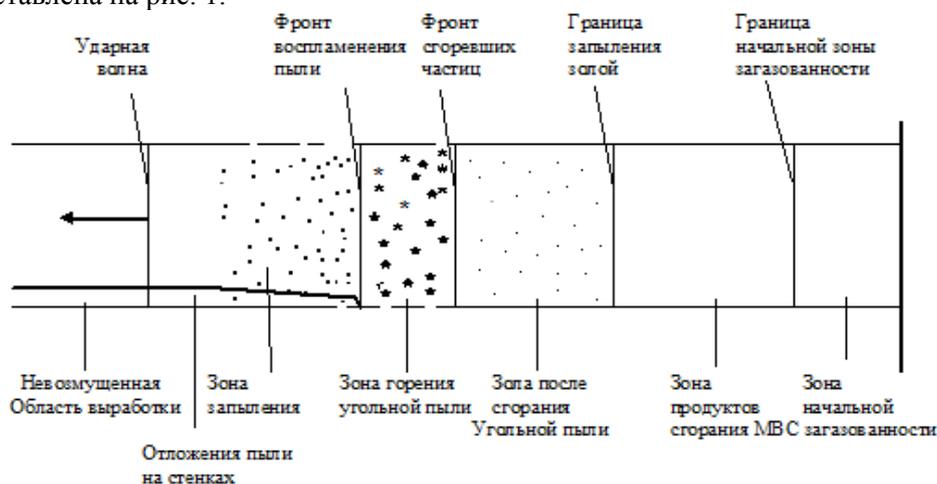


Рис. 1. Схема процесса распространения ударной волны с учетом горения частиц угольной пыли

Математическая модель движения и горения газопылевой среды в условиях горной выработки строится при следующих предположениях: движение газа описывается уравнениями газовой динамики; собственный объем частиц угольной пыли и золы учитывается в уравнении состояния газа; приход частиц угольной пыли со стенок выработки моделируется функцией источника дисперсной фазы, зависящей от времени и координаты и определяемой их решения уравнения для уноса угольной пыли со стенок выработки; угольная пыль предполагается сферической формы и монодисперсной; изменение массовой концентрации угольной пыли в газовом потоке моделируется уравнением сохранения дисперсной фазы с учетом процессов массообмена и горения; в продуктах сгорания частиц угольной пыли предполагается известной доля конденсированной фазы – золы; частицы угля, попадая в поток газа, за малое время релаксации приобретают скорость и температуру газа; скорость распространения волны горения по неподвижной газопылевой среде предполагается известной; линейная скорость горения частиц угольной пыли предполагается известной, горение частиц угля происходит по геометрическому закону; фронт горения, распространяющийся вдоль выработки, поджигает остатки пыли на стенках выработки и вовлекает их в газопылевой (горящий) поток.

Математическая модель строится на основе уравнений газовой динамики и подходов механики дисперсных сред [3]. Система уравнений при сделанных допущениях записывается в виде:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = \Pi G_3 \eta(x_y - x); \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho_f S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u S}{\partial x} = \gamma_f G_w S \eta(x_z - x); \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho_3 S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 u S}{\partial x} = \Pi G_3 \eta (x_y - x) - S G_\psi (1 - \zeta_1) \eta (x_z - x); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} = G_{\psi \psi} \eta (x_z - x); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = -\tau_{mp} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} = q \Pi + S Q_\psi G_\psi \eta (x_z - x) + \Pi G_3 c_3 T_0 \eta (x_y - x); \quad (6)$$

$$p(1/\rho - \alpha) = RT; \quad (7)$$

$$R = c_p(1 - \eta) - c_v(1 - \eta), \quad \alpha = \rho_3 / (\rho_g \rho_k), \quad \rho = \rho_g + \rho_3, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_3}{\rho}, \quad E = C_v T + \frac{u^2}{2}, \quad C_v = c_v(1 - \varepsilon) + c_3 \varepsilon, \quad K = \frac{c_v(1 - \varepsilon) + c_3 \varepsilon}{c_p(1 - \varepsilon) + c_3 \varepsilon};$$

$$\tau_{mp} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}, \quad Re = \frac{\rho u D_{ekv}}{\mu}, \quad D_{ekv} = \frac{4S}{\Pi}; \quad (9)$$

$$q = \alpha(T_l - T), \quad Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.47} E, \quad Pr = \frac{\mu c}{\lambda_g}, \quad Nu = \frac{\alpha D_{ekv}}{\lambda_g}, \quad (10)$$

где: C_v - удельная теплоемкость газопылевой смеси при постоянном объеме, G_3 - массовая скорость прихода угольной пыли в поток, G_ψ - массовая скорость газоприхода от горения частиц угольной пыли, Q_ψ - теплота сгорания угольной пыли, γ_f - стехиометрический коэффициент, ψ - объемная сгоревшая доля частицы пыли, ζ_1 - доля золы в продуктах горения, n - число частиц пыли в единице объема, x_y - координата положения воздушной ударной волны, x_z - координата волны воспламенения, c_f - коэффициент сопротивления, Re - число Рейнольдса, D_{ekv} - эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка горной выработки, E - поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена, остальные обозначения общеприняты.

Определим массовую скорость прихода угольной пыли в поток, G_3 . Пусть на стенках выработки задано распределение массы угольной пыли в виде функции $M_0(x, 0)$. Предположим, что массовая скорость ее вовлечения в поток будет прямо пропорционально зависеть от плотности слоя пыли и скорости обдувающего потока, u , а после того, как фронт зажигания газозвеси достигнет координаты x_z выработки, все частицы, оставшиеся на стенках воспламеняются и увлекаются потоком газозвеси. Тогда выражения для G_3 запишутся в виде:

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial t} = -G_3; \quad (11)$$

$$G_3 = \begin{cases} -\beta |u| M(x, t), & x_z < x < x_y \\ \Pi M(x, t) |u(x, t) + U_f | \delta(x - x_z), & x = x_z; \delta(x - x_z) = \begin{cases} 0, & x < x_z \\ 1 & x = x_z \\ 0 & x > x_z \end{cases} \\ 0 & x < x_z \end{cases} \quad (12)$$

где β - коэффициент согласования, U_f - скорость распространения волны воспламенения по газозвеси относительно неподвижного газа.

Началом запыления газового потока является приход ударной волны в место расположения пыли, которая приходит в поток газа и движется с ним.

Определим функцию массоприхода от горения частиц угля. Введем долю сгоревшего объема частицы угля $\psi = \Delta V / V_0$, ($V_0 = 4/3 \pi r_0^3$), тогда $\psi(t) = 1 - (r(t)/r_0)^3$, площадь горящей поверхности $S(t) = S_0 (r(t)/r_0)^2$, ($S_0 = 4\pi r_0^2$), и относительная поверхность горения определится в виде $\sigma(\psi) = (1 - \psi)^{2/3}$. Число частиц в единице объема n связано с ρ_3 формулой

$n = \frac{\rho_3}{\rho_k} \frac{1}{4\pi r^3/3} = \frac{\rho_3}{\rho_k} \frac{1}{V_0(1-\psi)}$. Тогда газоприход от горения частиц в единице объема при заданной

массовой концентрации частиц некоторого среднего размера запишется в виде:

$$G_\psi = nS_0\sigma(\psi)\rho_k a_1(t); \quad (13)$$

$$G_{\psi\psi} = S_0\sigma(\psi)a_1(t)/V_0, \quad (14)$$

где $a_1(t)$ - мгновенная линейная скорость горения частицы угля.

Согласно сделанным предположениям, волна воспламенения частиц движется относительно частиц с известной скоростью U_f . Перемещения границ между запыленной и не запыленной областями, зонами, занятыми горящими и не горящими частицами (фронт зажигания частиц), определяются кинематическими уравнениями:

$$\frac{dx_y}{dt} = u + C, \quad C = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}, \quad x_y(0) = X_{y,0}; \quad (15)$$

$$\frac{dx_z}{dt} = u + U_f, \quad x_z(0) = X_{z,0}. \quad (16)$$

Система уравнений и соотношения для правых частей (1)-(16) описывают движение пылегазовой смеси вдоль прямолинейного участка горной выработки с учетом того, что в запыленной среде распространяется волна горения частиц угля.

Начальные условия:

$$p(x,0) = \begin{cases} P_b & x \in \text{зоне загазованности} \\ P_0 & x \notin \text{зоне загазованности} \end{cases}, \quad (17)$$

$$T(x,0) = \begin{cases} T_b & x \in \text{зоне загазованности} \\ T_0 & x \notin \text{зоне загазованности} \end{cases},$$

$$\rho_f(x,0) = \begin{cases} \rho_f & x \in \text{зоне загазованности} \\ 0 & x \notin \text{зоне загазованности} \end{cases},$$

$$u(x,0) = 0, \quad \rho_3(x,0) = 0, \quad \psi(x,0) = 0,$$

$$p(x, y, z, 0) = \begin{cases} P_b & \text{в зоне загазованности} \\ P_0 & \text{вне зоны загазованности} \end{cases}, \quad (18)$$

$$T(x, y, z, 0) = \begin{cases} T_b & \text{в зоне загазованности} \\ T_0 & \text{вне зоны загазованности} \end{cases},$$

$$\rho_f(x, y, z, 0) = \begin{cases} \rho_f & \text{в зоне загазованности} \\ 0 & \text{вне зоны загазованности} \end{cases},$$

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0,$$

$$\rho_3(x, y, z, 0) = 0, \quad \psi(x, y, z, 0) = 0.$$

где P_b, T_b, ρ_f - давление, температура и плотность продуктов сгорания в области взрыва, P_0, T_0 - начальное давление и температура в выработке,

Граничные условия: В тупике выработки ставится условие непротекания для газа:

$$u|_{z_p} = 0. \quad (19)$$

Граница канала, которая граничит с атмосферой, ставятся условия:

$$p|_{z_p} = P_{атм}, \quad \rho|_{z_p} = \rho_{атм}. \quad (20)$$

Метод и методика численного решения. Результаты тестирования. Для численного решения систем уравнений (1)-(7) используется метод С.К. Годунова [4], в котором при определении потоков массы, импульса и энергии на границах расчетных ячеек учитывается наличие частиц дисперсной фазы. При решении задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах состояния пылегазовой смеси учитывается различие показателя адиабаты K и объема дисперсной фазы α справа и слева от разрыва. Для решения уравнения выгорания частиц дисперсной фазы используется схема разностей против потока. Для решения уравнений, определяющих координаты положения ударной волны и волны зажигания частиц, используется метод Эйлера.

Тестирование методики и программы проведено на модельных задачах. Сравнение результатов численного решения модельных задач с известными результатами показал хорошее совпа-

дение. В процессе выполнения расчетов контролируется выполнимость законов сохранения массы и полной энергии. Они выполняются с точностью не хуже 0,2%.

Выбор значений параметров, характеризующих горение газозвеси угольной пыли. В [5] определена линейная скорость горения частиц угольной пыли $a_1(t)$ и показано, что в кинетическом режиме линейная скорость горения – постоянная величина. Как показывают исследования горения газозвесей [6-15], скорость распространения ламинарного пламени в покоящейся газозвеси угольных частиц имеет величину в интервале 0,5-2,0 м/с. Наличие турбулентности в газовом потоке увеличивает скорость распространения пламени в газозвеси до десятков метров в секунду. В некоторых условиях (для газозвесей с высокой температурой горения, при значениях дисперсности и массовой концентрации частиц в некоторых интервалах значений) возможен режим горения газозвеси, скорость которого определяется прогревом и воспламенением частиц за счет лучистого потока тепла из зоны горения. Скорость распространения волны воспламенения по газозвеси в таком режиме может достигать 100 м/с. Поэтому исследуемый диапазон скоростей распространения волны воспламенения относительно неподвижной газопылевой среды по газозвеси частиц угольной пыли (U_f) был выбран 2-100 м/с.

Расчеты проводились при следующих исходных данных: $P_0 = 1 \text{ атм}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $P_b = 1,6 \text{ МПа}$, $T_b = 4650 \text{ К}$, $R_g = 290 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $k_g = 1,36$, $\lambda_g = 0,024 \text{ Дж}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{К})$, $\mu = 1,92 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Длина участка загазованности, взорвавшаяся в начальный момент времени в тупике выработки - 30 м. В расчетах варьировались значения поверхностной плотности осевшей пыли на стенках, скорости распространения волны зажигания по взвеси частиц пыли, скорость горения частицы пыли в интервалах соответственно: $0,1 \leq M_0 (\text{кг}/\text{м}^2) \leq 0,2$, $2 \leq U_f (\text{м}/\text{с}) \leq 100$, $0,0005 \leq a_1 (\text{м}/\text{с}) \leq 0,005$.

Результаты моделирования распространения ударной волны и горения угольной пыли в запыленной выработке. Был проведен расчет распространения ударной волны и горения угольной пыли по прямолинейной выработке длиной 2030 метров. На стенках выработки по всей длине расположена угольная пыль с постоянной поверхностной плотностью $M_0 (\text{кг}/\text{м}^2)$. В тупике выработки произошел взрыв метановоздушной смеси стехиометрического состава на длине 30 метров. Расчеты проводились с данными теплофизических характеристик, приведенными выше. На рис. 2 представлены распределения давления по длине выработки в моменты времени, когда ударная волна проходит 280 метров (I), 680 м (II), 1080 м (III), 1480 м (IV), 1880 м (V).

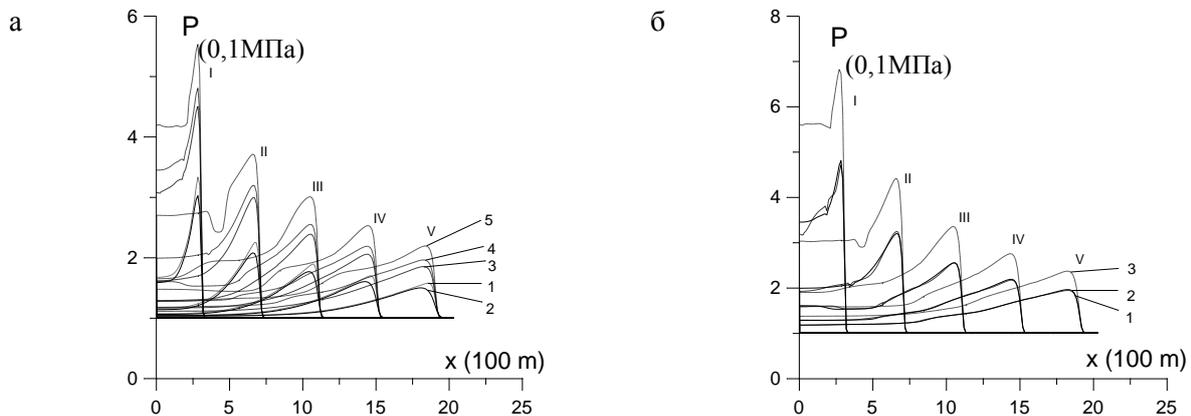


Рис. 2. Распределения давления по длине выработки в различные моменты времени:

- а - 1 - $M_0 = 0 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 0 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0 \text{ м}/\text{с}$ (газ без пыли); 2 - $M_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 0 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0 \text{ м}/\text{с}$ (частицы пыли не горят); 3 - $M_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 2 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0,0005 \text{ м}/\text{с}$; 4 - $M_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 20 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0,0005 \text{ м}/\text{с}$; 5 - $M_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 50 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0,0005 \text{ м}/\text{с}$;
 б - 1 - $M_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 20 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0,0005 \text{ м}/\text{с}$; 2 - $M_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 20 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0,005 \text{ м}/\text{с}$; 3 - $M_0 = 0,2 \text{ кг}/\text{м}^2$, $U_f = 20 \text{ м}/\text{с}$, $a_1 = 0,0005 \text{ м}/\text{с}$.

Когда на стенках выработки нет пыли ударная волна, пройдя расстояние 1880 метров, уменьшает свою интенсивность до перепада 0,5 атм. (рис. 2а, кривые 1). При наличии инертной пыли на стенках выработки интенсивность ударной волны уменьшается совсем незначительно

(рис. 2а, кривая 2). При горении угольной пыли интенсивность ударной волны после прохождения такого же расстояния увеличивается (рис. 2а, кривые 3, 4, 5). Увеличение интенсивности ударной волны при горении угольной пыли зависит от того, как далеко оторвалась ударная волна от зоны горения пыли. При небольших значениях U_f это увеличение не велико (рис. 2а, кривые 3, 4, рис. 2б, кривые 1, 2), с увеличением U_f интенсивность ударной волны увеличивается (рис. 2а, кривая 5). При больших значениях U_f давление во фронте ударной волны возрастает значительно, так как зона горения на начальном этапе распространения ударной волны находится близко к ударной волне, постепенно отставая от нее. За счет высокой температуры газа в зоне сгорания частиц давление за ударной волной падает с расстоянием медленнее, чем в случае небольших значений U_f . В случае малых значений U_f зона горения быстро отстает от фронта ударной волны и мало сказывается на ее интенсивности.

Величина линейной скорости горения частиц a_1 на величину интенсивности ударной волны влияет в меньшей степени: так при увеличении a_1 в 10 раз интенсивность ударной волны увеличивается не более чем на 1-2 % (рис. 2б, кривые 1, 2), величина массовой концентрации пыли влияет значительно (рис. 2б, кривая 3).

На рис. 3 представлены распределения температуры, концентрации пыли в потоке и поверхностной плотности пыли на стенках в моменты прохождения ударной волной расстояний: 1 - 280 м; 2 - 680 м; 3 - 1080 м; 4 - 1480 м; 5 - 1880 м. Из сопоставления графиков на рис. 3 видно, что пыль достаточно быстро переходит во взвешенное состояние, движется с потоком, зона запыления увеличивается, фронт горения по газозвеси движется медленнее и постепенно отстает. Так, к моменту прохождения ударной волной 1880 метров фронт горения угольной пыли продвинулся на расстояние 700 метров.

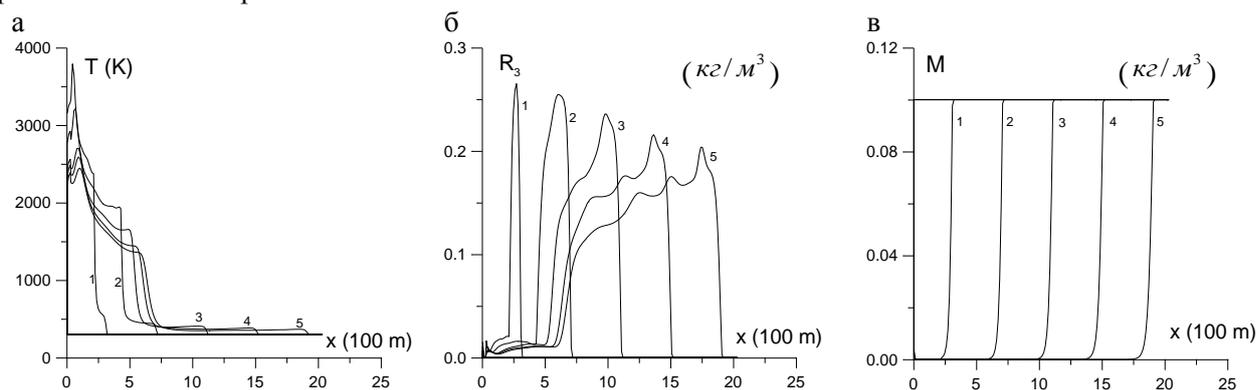


Рис. 3. Распределения температуры (а), плотности пыли (б), поверхностной плотности пыли (в) по длине выработки в последовательные моменты времени:

$$M_0 = 0,1 \text{ кг/м}^2, U_f = 50 \text{ м/с}, a_1 = 0,0005 \text{ м/с}$$

При увеличении скорости распространения волны воспламенения по угольной пыли до 100 м/с давление во фронте ударной волны поддерживается высоким за счет горения угольной пыли на больших расстояниях от зоны первоначального взрыва. Величина скорости горения угольной частицы a_1 , сказывается на давлении в ударной волне в меньшей степени, увеличение ее в 10 раз приводит к увеличению давления во фронте ударной волны не более чем на 10 %. Увеличение поверхностной плотности отложений угольной пыли в 2 раза приводит к увеличению давления во фронте ударной волны до 20 %.

Вывод. Таким образом, проведенный анализ влияния горения угольной пыли за ударной волной от взрыва метановоздушной смеси показал, что основные параметры, влияющие на интенсивность ударной волны являются скорость ее распространения по газозвеси угольной пыли и массовая концентрация поднятой ударной волной угольной пыли (или поверхностная плотность угольной пыли).

Библиографический список

1. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. – Москва, 1997. – 201 с.

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