

Применение импульсной аэрозольной системы пожаротушения для борьбы с пожарами в угольных шахтах*

А. Д. Рычков, Ю. И. Шокин

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет, Россия

e-mail: rych@ict.nsc.ru

Х. Милошевич

Косовский университет, Косовска Митровица, Сербия

e-mail: mhrane@yahoo.com

Моделируется работа импульсной аэрозольной системы пожаротушения (ИАСП) при тушении пожаров, возникающих при возгорании воздушно-метановой смеси в штреках и забоях угольных шахт. Вычислительный эксперимент показал, что система ИАСП способна обеспечить отсечку ударной волны, распространяющейся по штреку угольной шахты, заполненному горючей воздушно-метановой смесью, подавить процессы горения в ней и защитить людей и оборудование, находящееся в штреке, от воздействия ударной волны.

Ключевые слова: математическое моделирование, двухфазные течения, тепло-массообмен.

Введение

Проблема эффективной борьбы с пожарами, возникающими в угольных шахтах из-за воспламенения воздушно-метановой смеси, — чрезвычайно актуальна. Анализ динамики возникновения таких пожаров и их развития показывает, что наиболее успешна борьба с ними на начальной стадии воспламенения смеси. Поэтому вопросам разработки и создания эффективных средств пожаротушения постоянной готовности, позволяющим за короткое время сгенерировать и доставить к фронту горения, движущемуся со значительной скоростью, достаточно большую массу пламегасящего вещества (ПГВ), уделяется большое внимание. Чаще всего для этих целей применяются системы порошкового пожаротушения на основе различного рода пламегасителей, в качестве которых используются фосфорорганические, металлоорганические, а также некоторые галогенсодержащие соединения. В зоне пламени данные пламегасящие вещества разлагаются с образованием газообразных активных соединений, которые вступают в химические реакции с радикалами, ответственными за горение и распространение пламени, переводя

*Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта фундаментальных исследований СО РАН № 26 и программы фундаментальных исследований Президиума СО РАН № 1.4.

© ИВТ СО РАН, 2010.

их в неактивные частицы. При этом цепные разветвленные реакции горения обрываются, в результате чего происходит гашение пламени. Эффективность тушения очагов горения при таком способе определяется главным образом концентрацией порошка пламегасителя в зоне горения [1]. Заметим, что в соответствии с описанным выше механизмом гашения пламени большую роль в повышении эффективности пожаротушения играет величина суммарной площади поверхности всех частиц пламегасителя, в связи с чем доставка их в зону горения в виде аэрозольного облака мелкодисперсных частиц является наиболее предпочтительной. Однако получение аэрозолей с размерами частиц порядка десяти микрон в существующих импульсных системах порошкового пожаротушения не представляется возможным. Такие системы обычно представляют собой газогенераторы, использующие унитарные аэрозоль-генерирующие твердотопливные составы, в продуктах сгорания которых содержатся мелкодисперсные частицы пламегасителя достаточно высокой концентрации, способные эффективно подавлять очаги возгорания за относительно короткое время [2]. Однако основными недостатками этих систем являются существенные технологические трудности, связанные с приготовлением твердотопливных составов, обладающих необходимыми свойствами, и относительно малая газопроизводительность, что делает невозможным их применение для тушения пожаров в штреках угольных шахт.

В данной работе для этих целей предлагается использовать импульсную аэрозольную систему пожаротушения (ИАСП), концепция которой изложена в работах [1, 3–5]. Система состоит из нескольких устройств раздельного снаряжения направленного действия, каждый из которых представляет собой полузамкнутый сосуд с прочным корпусом (рис. 1, а). Рядом с глухой стенкой устройства расположены заряд унитарного твердого топлива (газогенератор) и контейнер с мелкодисперсным порошком ПГВ.

При горении заряда газогенератора низкотемпературные газообразные продукты горения, не содержащие окислитель, под большим давлением в течение нескольких миллисекунд выбрасывают всю массу ПГВ в виде аэрозольного облака высокой концентрации. При истечении продуктов сгорания формируется также баллистическая волна, которая взаимодействует с фронтом движущейся ударной волны, препятствуя его дальнейшему распространению, а инертные продукты сгорания газогенератора уменьшают концентрацию воздуха и метана до уровня, препятствующего воспламенению смеси. Частицы ПГВ, доставляемые в зону горения, при своем испарении поглощают тепло, тем самым снижая температуру среды в зоне облака частиц, а их пары активно подавляют разветвленные цепные реакции, что приводит к подавлению процесса горения. Сочетание всех перечисленных факторов (действие баллистической волны, охлаждение газа в зоне облака частиц, вытеснение из этой зоны кислорода воздуха и метана, наличие паров пламегасителя), а также подбор необходимого соотношения масс заряда газогенератора и пламегасителя позволяют тушить различные типы пожаров, в том числе и в угольных шахтах. В этом случае ИАСП может быть охранной системой постоянной готовности и размещаться в стенках штрека, не препятствуя проведению горно-добывающих работ (рис. 1, б, в). Срабатывание системы происходит по сигналу от датчиков, располагаемых в возможных местах возгорания воздушно-метановой смеси, которые реагируют на резкое повышение давления и (или) температуры, а также способны определять направление и скорость движения фронта горения. Места установки датчиков, количество устройств направленного действия в ИАСП, времена их срабатывания, массы ПГВ и зарядов твердого топлива газогенераторов, а также направление выброса частиц ПГВ можно подобрать таким образом, чтобы создаваемые

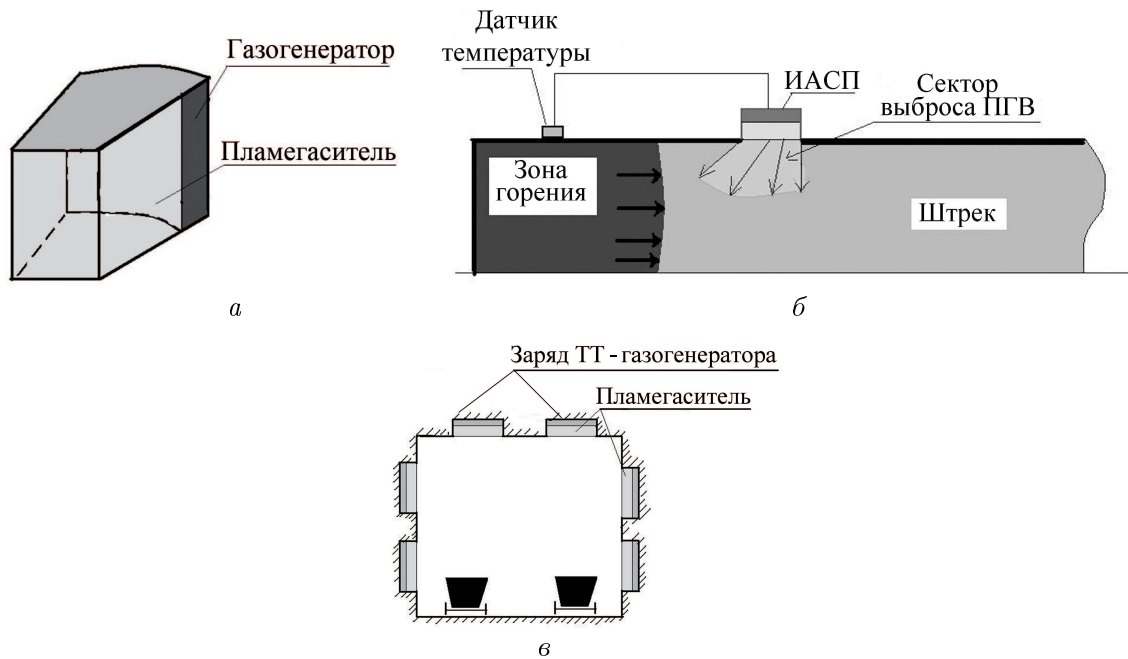


Рис. 1. Импульсная аэрозольная система пожаротушения: *а* — схема устройства ИАСП направленного действия, *б* — схема расположения ИАСП в штреке, *в* — схема размещения ИАСП в поперечном сечении штрека

ИАСП баллистическая волна и аэрозольное облако частиц ПГВ противодействовали распространению фронта ударной волны и активно подавляли процесс горения.

1. Описание модели и основные уравнения

При работе твердотопливного газогенератора его газообразные продукты сгорания создают давление в несколько десятков атмосфер и их истечение в окружающую среду происходит в турбулентном режиме. Поэтому в качестве модели движения несущего газа использовалась осредненная по Фавру система уравнений Навье—Стокса, замыкаемая $q-\omega$ -моделью турбулентности [6]. Описание движения полидисперсной твердой фазы проводилось в рамках стохастического подхода [7], учитывающего влияние турбулентной природы поля течения несущего газа на движение частиц. При построении математической модели принимались следующие допущения:

— система совокупности устройств ИАСП (см. рис. 1, *б*, *в*), воздействующих на фронт горения воздушно-метановой смеси, заменялась тором прямоугольного сечения, что позволило вместо пространственного течения в штреке рассматривать осесимметричное течение без существенного искажения сути протекающих процессов;

— горение смеси метана с воздухом описывалось одной брутто-реакцией



— несущий газ представлял собой химически реагирующую многокомпонентную смесь, состоящую из метана, углекислого газа, паров воды, воздуха, химически инертных продуктов сгорания газогенератора, не содержащих окислителя, и продуктов разложения твердых частиц ПГВ;

— течение является турбулентным, двухфазным, осесимметричным и нестационарным;

— частицы ПГВ полагаются полидисперсными, имеют сферическую форму и состоят из N фракций, внутри каждой из которых частицы имеют одинаковый размер. Столкновениями между частицами на данном этапе моделирования пренебрегалось;

— распределение температуры по объему частицы считается однородным. При достижении ею заданной величины $T_{исп}$ происходит разложение ПГВ с образованием паров, причем линейная скорость такого разложения r_p предполагается постоянной;

— газоприход от гранул твердого топлива и от частиц ПГВ при их разложении моделировался источниковыми членами в уравнениях сохранения массы и энергии.

Скорость брутто-реакции горения метана определялась выражением, типичным для бимолекулярных реакций [8]:

$$W = \rho^2 Y_{O_2} Y_{CH_4} K_0 \exp(-E/(R \cdot T)), \quad (2)$$

где ρ , T — плотность и температура газовой смеси; Y_{O_2} , Y_{CH_4} — массовые концентрации кислорода и метана; K_0 , E , R — предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса, энергия активации и газовая постоянная. Влияние паров ПГВ на процесс горения учитывалось путем уменьшения значения предэкспоненциального множителя K_0 в (2) заменой его на множитель K_0^* , вычисляемый по формуле, предложенной профессором О.П. Коробейничевым с сотрудниками (частное сообщение):

$$K_0^* = \begin{cases} K_0(1 - 7.071Y_{ПГВ}^{1/2})^2, & \text{если } Y_{ПГВ} \leq 0.02, \\ 0, & \text{если } Y_{ПГВ} > 0.02, \end{cases} \quad (3)$$

где $Y_{ПГВ}$ — массовая концентрация паров ПГВ.

Система уравнений, описывающая такое течение в цилиндрической системе координат (x, r) , имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = M_{gen} - \sum_{i=1}^N \left\langle \frac{dm_i}{dt} \right\rangle n_i, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{Y}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \mathbf{Y} + \mathbf{q}_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v \mathbf{Y} + \mathbf{q}_r) = \mathbf{S}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p + \tau_{xx}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho u v + \tau_{xr}) = - \sum_{i=1}^N n_i \left\langle m_i \frac{du_i}{dt} \right\rangle, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v u + \tau_{rx}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v^2 + p + \tau_{rr}) = \frac{p}{r} - \sum_{i=1}^N n_i \left\langle m_i \frac{dv_i}{dt} \right\rangle, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u H + u \tau_{xx} + v \tau_{xr} + \varphi_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v H + u \tau_{xr} + v \tau_{rr} + \varphi_r) = \\ & = - \sum_{i=1}^N n_i \left[u \left\langle m_i \frac{du_i}{dt} \right\rangle + v \left\langle m_i \frac{dv_i}{dt} \right\rangle + \left\langle \pi d_i \lambda \cdot Nu (T - T_i) \right\rangle - \right. \\ & \quad \left. - \left\langle \frac{dm_i}{dt} C_i (T - T_i) \right\rangle \right] + Q_{gen} M_{gen} + W Q_p, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u q + \tau_{x,q}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho u q + \tau_{r,q}) = S_q, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \omega + \tau_{x,\omega}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho u \omega + \tau_{r,\omega}) = S_\omega, \quad (10)$$

$$p = \rho T R_0 \sum_{i=1}^7 \frac{Y_i}{M_i}, \quad \sum_{i=1}^7 Y_i = 1, \quad (11)$$

$$\mathbf{Y} = \{Y_{\text{CH}_4}, Y_{\text{O}_2}, Y_{\text{H}_2\text{O}}, Y_{\text{CO}_2}, Y_{\text{ПГВ}}, Y_{\text{M}}, Y_{\text{N}_2}\}^T,$$

$$\mathbf{S} = \left\{ -W, -2 \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{CH}_4}} W, 2 \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{CH}_4}} W, \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CH}_4}} W, -\sum_{i=1}^N \left\langle \frac{dm_i}{dt} \right\rangle n_i, M_{\text{gen}}, 0 \right\}^T,$$

$$H = \int_{T_0}^T C_p dT, \quad C_p = \sum_{k=1}^7 Y_k C_{p,k}, \quad S_q = C_{q1} (C_\mu S / \omega^2 - 2D / (3\omega) - 1) \rho \omega q,$$

$$S_\omega = [C_{\omega 1} (C_\mu S / \omega^2 - C_{\omega 3} D / \omega) - C_{\omega 2}] \rho \omega^2, \quad \mu_t = C_\mu \rho q^2 / \omega,$$

$$\tau_{rx} = \tau_{xr} = \mu_e \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \phi_x = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \phi_r = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r},$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \quad \lambda_e = \lambda + \lambda_t, \quad \lambda_t = \mu_t C_p / \text{Pr}_t, \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r},$$

$$\mathbf{q}_x = - \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\text{Sc}_t} \right) \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial x}, \quad \mathbf{q}_r = - \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\text{Sc}_t} \right) \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial r},$$

где \mathbf{Y} — вектор массовых концентраций компонентов смеси; Y_{M} — массовая концентрация инертных продуктов сгорания газогенератора; $q = \sqrt{k}$, $\omega = \varepsilon/k$ — “турбулентные” переменные, связанные с кинетической энергией турбулентности k и со скоростью ее диссипации ε ; $E = C_v T + (u^2 + v^2)/2$ — полная удельная энергия; $H = E + p/\rho$ — удельная энтальпия смеси; μ и μ_t — молекулярная и турбулентная вязкости; p, T — статические давление и температура; R_0 — газовая постоянная; M_{gen} и Q_{gen} — источники массы и энергии, моделирующие приход высокотемпературных продуктов сгорания от газогенератора; Q_p, W — удельная теплота горения метана и скорость протекания обобщенной брутто-реакции его горения (2); m_i, d_i — масса и диаметр частиц i -й фракции. Члены в угловых скобках означают осреднение по объему ячейки разностной сетки. Константы, входящие в описание модели турбулентности, имеют следующие значения:

$$C_{\omega 1} = 0.55, \quad C_{\omega 2} = 0.833, \quad C_{\omega 3} = 0.666, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_{q1} = 0.5.$$

Уравнения движения i -й частицы ПГВ вдоль ее траектории записывались в виде

$$\frac{dm_i}{dt} = -\rho_p d_i^2 \pi r_p, \quad (12)$$

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\mu C_{Di} \text{Re}_{pi}}{\rho_p d_i^2} (u + u' - u_i), \quad (13)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\mu C_{Di} \text{Re}_{pi}}{\rho_p d_i^2} (v + v' - v_i), \quad (14)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{6 \lambda \cdot \text{Nu}}{C_i \rho_p d_i^2} (T - T_i), \quad (15)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i, \quad (16)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = v_i, \quad (17)$$

где C_i — удельная теплоемкость частицы; x_i, y_i — ее координаты; n_i — концентрация частиц i -й фракции в ячейке в данный момент времени. Для коэффициентов сопротивления в уравнениях движения частиц выбиралась зависимость

$$C_{Di} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_{pi}} \left(1 + \frac{\text{Re}_{pi}^{2/3}}{6} \right), & \text{если } \text{Re}_{pi} \leq 10^3, \\ 0.44, & \text{если } \text{Re}_{pi} > 10^3, \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Re}_{pi} = \frac{d_i \rho |\mathbf{V} - \mathbf{V}_i|}{\mu}, \quad \mathbf{V}' = \sqrt{2k/3} \text{erfc}^{-1}(N_r) \mathbf{V} / |\mathbf{V}|,$$

где \mathbf{V} — вектор осредненной скорости; $\mathbf{V}' = \{u', v'\}$ — случайный вектор возмущения скорости газа; N_r — случайное число из диапазона $[-1, +1]$; $\text{erfc}^{-1}(\cdot)$ — обратная функция ошибок. При интегрировании системы уравнений движения частиц вдоль каждой траектории шаг интегрирования τ определяется из условия [9]

$$\tau = \min(\tau_c, \tau_e, \tau_t), \quad \tau_c = 0.35 \frac{h}{|\mathbf{V}_i|}, \quad \tau_e = \frac{l}{|\mathbf{V}'|}, \quad \tau_t = \frac{l}{|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}|},$$

где $l = \frac{\mu t}{C_\mu^{1/4} \cdot \rho \cdot k^{1/2}}$ — масштаб турбулентности, h — характерный размер ячейки, $C_\mu = 0.09$ — эмпирическая константа

Для расчета течения несущего газа применялась противопотоковая LU разностная схема второго порядка точности, обладающая TVD-свойствами, близкая к схеме из работы [10]. Расчет движения частиц проводился с помощью А-устойчивой разностной схемы также второго порядка точности [11]. Рассматривался участок штрека, ограниченный слева глухой стенкой и заполненный в начальный момент времени воздушно-метановой смесью заданной концентрации. Правая граница штрека полагалась открытой. Таким образом, область решения системы уравнений (1)–(10) снизу ограничивалась осью симметрии течения, сверху и слева — стенками штрека. Граничные условия для несущего газа задавались следующим образом. На оси OX задавались условия симметрии течения, на поверхностях ИАСП и на стенках штрека — условия прилипания, на открытой (правой) границе штрека — неотражающие граничные условия. Для системы (12)–(17) принималось, что на стенках штрека имеет место поглощение частиц ПГВ.

С целью получения большой поверхности горения в газогенераторе использовался гранулированный заряд твердого топлива. В этом случае величина массоприхода M_{gen} продуктов сгорания газогенератора в (4) определялась из решения уравнения

$$\frac{dM_{\text{gen}}}{dt} = -\rho_{gr} S \cdot r_{bg} N_{gg}^0,$$

где ρ_{gr}, S, r_{bg} — плотность материала топливной гранулы, ее текущая поверхность и скорость испарения; N_{gg}^0 — число гранул в единице объема заряда твердого топлива, которое остается постоянным в процессе их горения и определяется из начальных условий.

2. Некоторые результаты численного моделирования

Во всех приведенных ниже расчетах скорость испарения частиц полагалась $r_p = 10$ мм/с, число фракций полидисперсной среды равнялось десяти, температура испарения частиц ПГВ $T_{\text{исп}} = 400$ К, теплотворность твердого топлива газогенератора $Q_{\text{ген}} = 800$ кДж/кг, диаметр его гранул 3 мм, линейная скорость горения гранулы $r_{bg} = 20$ мм/с. В выражении (2) значения параметров взяты из [8]: $K_0 = 10^{10}$, $E/R = 18400$ К, теплота сгорания метана $Q_p = 50$ МДж/кг. Высота штрека равнялась 4 м, длина штрека — 20 м. Общая масса ПГВ в ИАСП составляла 400 кг, общая масса зарядов твердого топлива в газогенераторах — 40 кг. Выброс частиц ПГВ проводился в направлении, перпендикулярном оси OX .

При моделировании процесса воздействия ИАСП на движущийся фронт горения полагалось, что в начальный момент времени весь штрек заполнен воздушно-метановой смесью, в которой массовая концентрация метана составляла 10 %. Смесь поджигалась у глухой (левой) стенки штрека (см. рис. 1, б), и фронт горения со скоростью ударной волны распространялся по штреку слева направо.

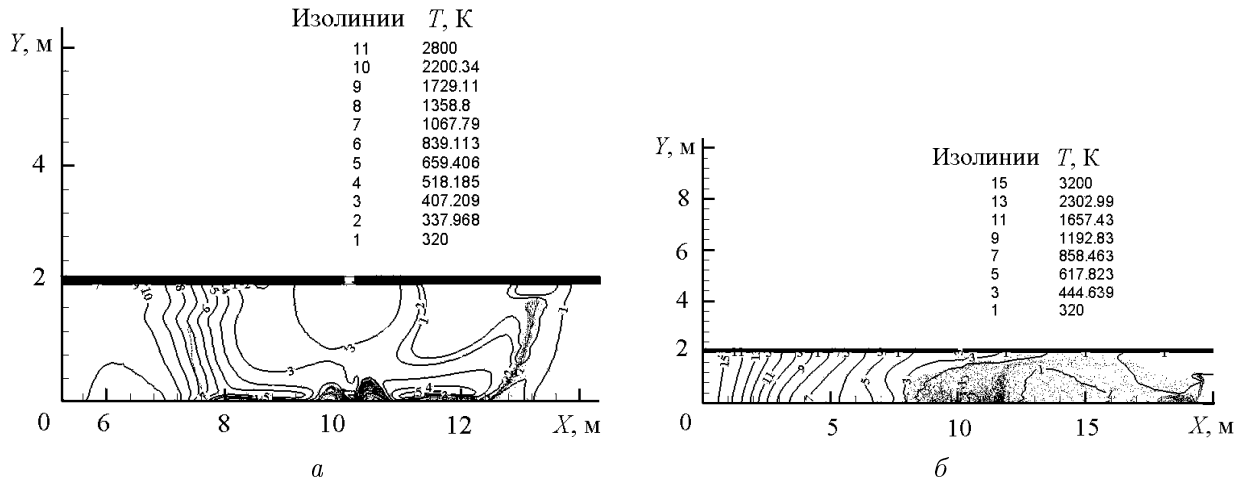


Рис. 2. Изотермы в поле течения при $t = 14$ мс (а) и $t = 40$ мс (б)

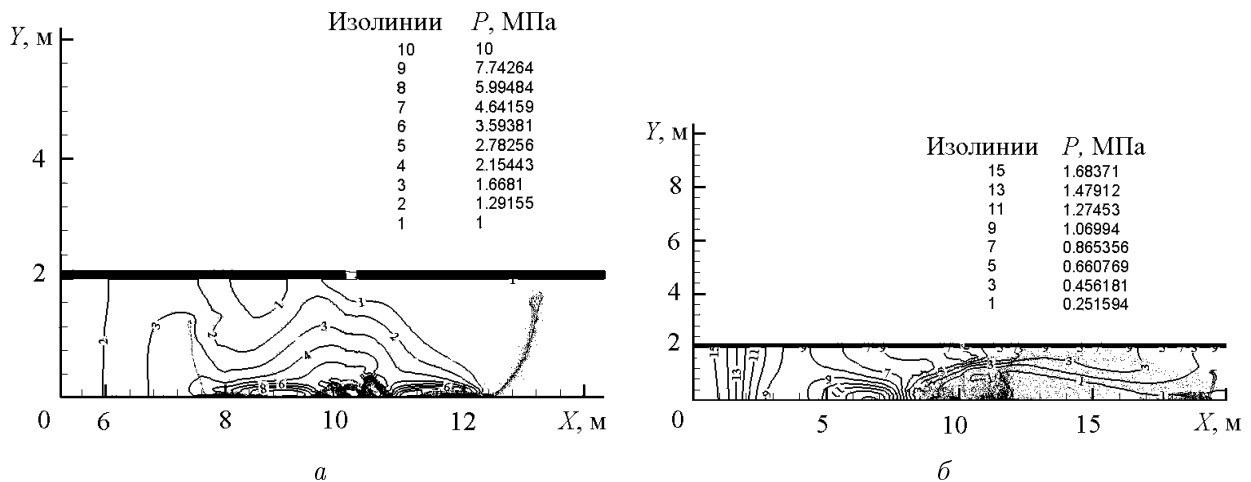


Рис. 3. Изобары в поле течения при $t = 14$ мс (а) и $t = 40$ мс (б)

На рис. 2 для двух моментов времени показаны положения изотерм, свидетельствующие о том, что взаимодействие баллистической волны, генерируемой ИАСП, с фронтом горения приводит к образованию своеобразного газодинамического затвора, препятствующего распространению фронта горения правее места расположения ИАСП. Черными точками показаны положения частиц ПГВ. По положению изобар (рис. 3) можно судить о том, что область резкого повышения давления, возникающая при взаимодействии ударной и баллистической волн, оказывается достаточно локальной и не распространяется в сторону открытой части штрека и, следовательно, не приводит к баротравмам людей и не разрушает горно-добывающее оборудование в защищаемой части штрека.

Более подробная динамика движения фронта горения в виде кривых распределения температуры и давления вдоль оси OX показана на рис. 4, 5, из которых следует, что

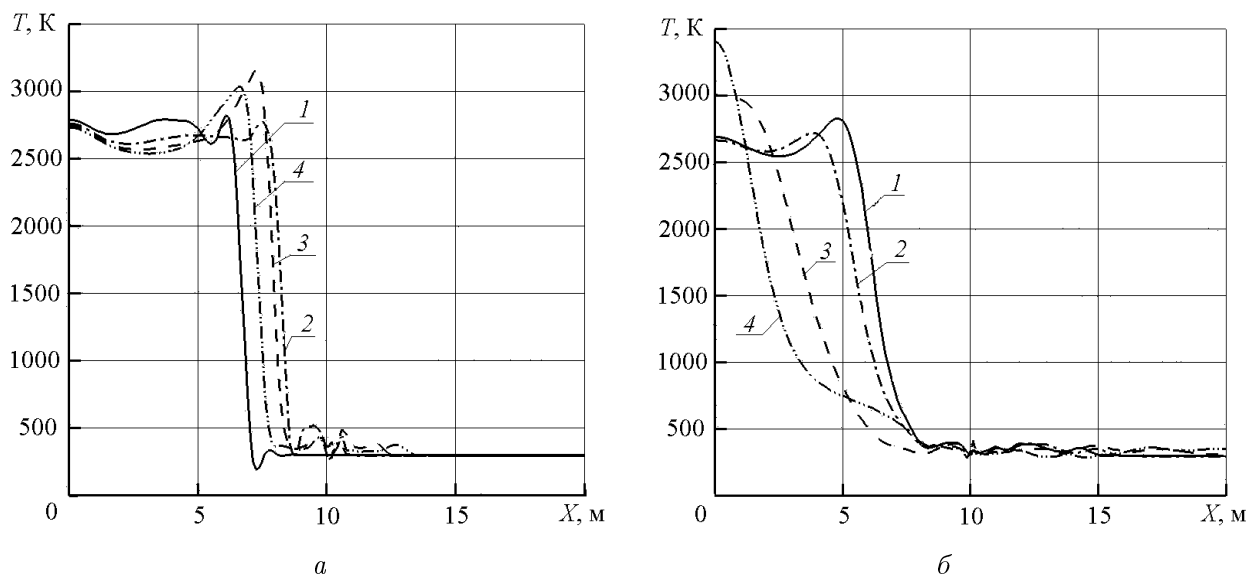


Рис. 4. Распределение температуры вдоль оси OX в различные моменты времени: $a - t = 5$ мс (1), 10 (2), 12 (3), 14 мс (4); $b - t = 18$ мс (1), 20 (2), 30 (3), 40 мс (4)

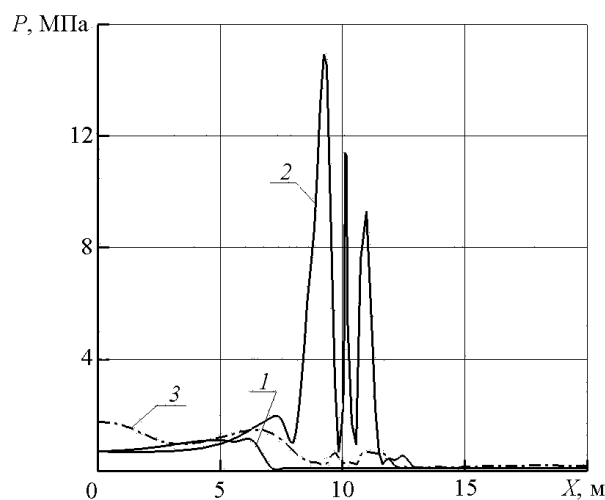


Рис. 5. Распределение давления вдоль оси OX в моменты времени $t = 5$ (1), 14 (2), 40 мс (3)

в защищаемой части штрека уровень температуры остается достаточно низким, при котором не происходит воспламенение метана. Кроме того, инертные продукты сгорания газогенератора вблизи места расположения ИАСП понижают концентрацию воздушно-метановой смеси и вытесняют ее к открытой части штрека, тем самым осуществляя вентиляцию последнего.

При расчетах использовалась прямоугольная неравномерная разностная сетка, которая сгущалась в области, занимаемой ИАСП, и вблизи непроницаемых границ.

Для оценки точности полученных численных решений проводились расчеты одного из вариантов на последовательности трех вложенных разностных сеток, основная из которых имела размер 150×60 узлов по осям OX и OY соответственно. Проведенные расчеты показали, что значения температуры в поле течения определяются с точностью около 3%. Для получения качественных оценок основных характеристик процесса взаимодействия ИАСП с движущимся фронтом горения такая точность является вполне приемлемой.

Список литературы

- [1] БАРАТОВ А.Н., ВОГМАН Л.П. Огнетушащие порошковые составы. М.: Стройиздат, 1982. 72 с.
- [2] ИСАВНИН Н.В. Средства порошкового пожаротушения. М.: Стройиздат, 1983. 156 с.
- [3] РЫЧКОВ А.Д., ШОКИН Ю.И., МИЛОШЕВИЧ Х. Исследование возможности применения твердотопливных газогенераторов для тушения пожаров на газовых скважинах // Математическое моделирование научно-технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности. Материалы VI Казахстанско-Российской международной научно-практ. конф. Астана: Изд-во Евразийского ун-та, 2007. С. 274–278.
- [4] РЫЧКОВ А.Д., ШОКИН Ю.И. Генератор наноразмерных аэрозолей для тушения пожаров на газовых скважинах и на разливах нефти // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 6. С. 81–89.
- [5] РЫЧКОВ А.Д. Импульсная система пожаротушения на основе твердотопливного газогенератора // Там же. 2008. Т. 13. Спец. выпуск 2. С. 78–86.
- [6] COAKLEY T.J. Turbulence modeling for high speed flows // AIAA Paper, 92-0436, 1992.
- [7] CROW C.T. Review-numerical models for dilute gas-particles flows // Trans. ASME J. Fluid Eng. 1982. Vol. 104. P. 297–303.
- [8] ВОЛКОВ Э.П., КУДРЯВЦЕВ Н.Ю. Моделирование образования окислов азота в турбулентном диффузионном факеле // Инж.-физ. журнал. 1989. Т. 56, № 6. С. 885–894.
- [9] GOSMAN A.D., IOANNIDES S.I. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors // AIAA J. Energy. 1983. Vol. 7, No. 6. P. 482–490.
- [10] YOON S., JAMESON A. An LU-SSOR scheme for the Euler and Navier-Stokes equations // AIAA Paper, 87-600, 1987.
- [11] РЫЧКОВ А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.

Поступила в редакцию 14 апреля 2010 г.