

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАШЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОГО ФАКЕЛА С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА АЭРОЗОЛЕЙ

А. Д. Рычков

Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090 Новосибирск
Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, rych@ict.nsc.ru

Моделируется работа импульсной аэрозольной системы пожаротушения (ИАСП), предназначенной для эффективного тушения пожаров на газовых скважинах, на примере гашения метановоздушной дозвуковой струи, истекающей из соплового насадка. Система представляет собой устройство раздельного снаряжения, состоящего из заряда унитарного твердого топлива (газогенератора) и контейнера с мелкодисперсным порошком пламегасящего вещества. Горение смеси описывалось одностадийной брутто-реакцией, влияние концентрации паров пламегасящего вещества на процесс горения учитывалось путем уменьшения предэкспоненциального множителя в законе Аррениуса и описывалось эмпирической зависимостью. Вычислительный эксперимент показал, что применение ИАСП обеспечивает эффективный транспорт мелкодисперсных аэрозольных частиц пламегасящего вещества и его паров в зону горения в количестве, достаточном для подавления очага возгорания.

Ключевые слова: численное моделирование, горение газов, двухфазные турбулентные течения, тушение пожаров.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема эффективной борьбы с пожарами на газовых скважинах и с возгораниями разливов нефти и нефтепродуктов при техногенных авариях и катастрофах чрезвычайно актуальна. Анализ динамики возникновения таких пожаров и их развития показывает, что наиболее успешной является борьба с ними на начальной стадии возгорания. Поэтому большое внимание уделяется вопросам разработки и создания эффективных средств пожаротушения постоянной готовности, которые позволяют за короткое время генерировать и доставлять к очагу возгорания достаточно большую массу пламегасящего вещества. Наиболее подходящими для этих целей являются системы порошкового пожаротушения на основе различного рода пламегасителей, в качестве которых используются фосфорорганические, металлоорганические, а также некоторые галогенсодержащие соединения. В зоне пламени эти пламегасящие вещества разлагаются с

образованием газообразных активных соединений, которые вступают в химические реакции с радикалами (частицами, ответственными за горение и распространение пламени), переводя их в неактивные частицы. При этом обрываются цепные разветвленные реакции горения и происходит гашение пламени. Эффективность тушения очагов горения таким способом 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 также суммарная площадь поверхности всех частиц пламегасителя. Поэтому наиболее предпочтительной была бы доставка их в зону горения в виде аэрозольного облака мелкодисперсных частиц. Однако существующие импульсные системы порошкового пожаротушения не позволяют получать аэрозоли с размерами частиц порядка 10 мкм. Такие системы обычно представляют собой газогенераторы, использующие унитарные аэрозольгенерирующие твердотопливные составы, в продуктах горения которых содержатся мелкодисперсные частицы пламегасителя в высокой концентрации, достаточной для эффективного подавления очагов возгорания за относи-

Работа выполнена при поддержке программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН (проекты 2006-98, 2006-113), программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (проект 4.1.1) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-9886.2006.9).

тельно короткое время [2]. Однако основным недостатком этих систем являются серьезные технологические трудности, связанные с приготовлением твердотопливных составов с необходимыми свойствами, а также относительно малая газопроизводительность. Поэтому их использование при тушении пожаров на газовых скважинах и на больших площадях возгорания оказывается неэффективным.

В данной работе для этих целей предлагается использовать импульсную аэрозольную систему пожаротушения (ИАСП), концепция которой изложена в работах [3–5]. Система представляет собой устройство раздельного снаряжения, в котором распыление пламегасящего вещества и транспортировка его в зону горения в виде облака мелкодисперсных аэрозолей осуществляются продуктами сгорания обычного твердотопливного газогенератора кратковременного (импульсного) действия, которые не содержат окислителя. Для тушения горящих факелов на газовых скважинах можно использовать систему из нескольких таких устройств, располагаемых вокруг факела (рис. 1). Каждое устройство (полузамкнутый сосуд) содержит заряд твердого топлива и мелкодисперсный порошок пламегасителя.

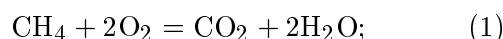
Под воздействием продуктов сгорания (высокого давления) твердотопливного заряда газогенератора происходит компактирование и движение частиц пламегасителя. После их вы-

хода из устройства продукты сгорания формируют баллистическую волну низкой интенсивности, которая сбивает пламя, а также распыляет и диспергирует пламегаситель, доставляемый в зону горения в виде аэрозольного облака мелкодисперсных частиц. При испарении частиц пламегасителя из-за поглощения ими тепла понижается температура в зоне облака частиц. Кроме того, здесь происходит вытеснение кислорода воздуха от очага горения, поскольку продукты сгорания газогенератора его не содержат. Сочетание этих факторов (действие баллистической волны, охлаждение газа в зоне облака частиц, вытеснение из этой зоны кислорода воздуха, наличие паров пламегасителя), а также подбор нужного соотношения массы заряда газогенератора и пламегасителя позволяют тушить различные типы пожаров большой интенсивности.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Газообразные продукты сгорания твердотопливного газогенератора создают давление в несколько десятков атмосфер, их истечение в окружающую среду проходит 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] с учетом влияния турбулентной природы поля течения несущего газа на движение частиц. При построении математической модели принимались следующие допущения:

- конструкция ИАСП (см. рис. 1) заменялась тором прямоугольного сечения, что позволило вместо пространственного течения рассматривать осесимметричное без существенного искажения сути протекающих процессов;
- горение смеси метана с воздухом в струе 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 пламегасящего вещества;

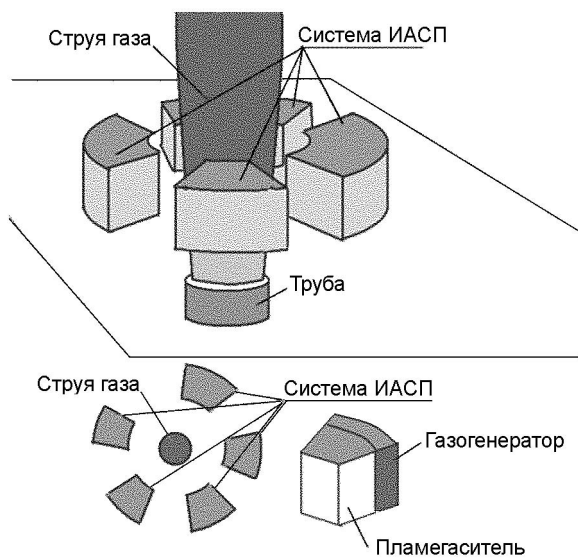


Рис. 1. Схема тушения горящего газового факела

- течение является турбулентным, двухфазным, осесимметричным и нестационарным;
- частицы пламегасящего вещества являются полидисперсными, имеют сферическую форму и состоят из N фракций, в каждой из которых содержатся частицы одинакового размера. Столкновениями между частицами на данном этапе моделирования пренебрегалось;
- распределение температуры по объему частицы однородное. При достижении ею заданного значения T_{vap} происходит разложение пламегасящего вещества с образованием паров, причем линейная скорость разложения предполагается постоянной;
- газоприход от гранул твердого топлива и от частиц пламегасящего вещества при их разложении моделировался источниками членами в уравнениях сохранения массы и энергии;
- тепловое излучение от струи на данном этапе исследований не учитывалось.

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

$$W = \rho^2 Y_{O_2} Y_{CH_4} K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2)$$

где ρ , T — плотность газовой смеси и ее температура; Y_{O_2} , Y_{CH_4} — массовые концентрации кислорода и метана соответственно; K_0 , E , R — предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса, энергия активации и газовая постоянная. Влияние паров пламегасящего вещества на процесс горения учитывалось через уменьшение предэкспоненциального множителя K_0 в (2) путем замены его множителем K_0^* , вычисляемым по формуле, предложенной 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 пламегасящего вещества.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) =$$

$$= M_{gen} - \sum_{i=1}^N \left\langle \frac{dm_i}{dt} \right\rangle n_i; \quad (4)$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u q + \tau_{xq}) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v q + \tau_{rq}) = S_q; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \omega + \tau_{x\omega}) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v \omega + \tau_{r\omega}) = S_\omega; \end{aligned} \quad (10)$$

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

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

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

$$H = \int_{T_0}^T c_p dT, \quad c_p = \sum_{k=1}^7 Y_k c_{p,k},$$

$$S_q = C_{q1} \left(\frac{C_\mu S}{\omega^2} - \frac{2D}{3\omega} - 1 \right) \rho \omega q;$$

$$S_\omega = \left[C_{\omega 1} \left(\frac{C_\mu S}{\omega^2} - \frac{C_{\omega 3} D}{\omega} \right) - C_{\omega 2} \right] \rho \omega^2;$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho q^2}{\omega}; \quad \tau_{rx} = \tau_{xr} = \mu_e \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right);$$

$$\phi_x = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \phi_r = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r}; \quad \mu_e = \mu + \mu_t;$$

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_t; \quad \lambda_t = \frac{\mu_t c_p}{\text{Pr}_t}; \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r};$$

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

Здесь u, v — проекции вектора скорости на оси координат; ρ — плотность; M_i — молекулярные массы компонентов смеси; T_i — их температуры; c_i — удельная теплоемкость частицы; n_i — концентрация частиц i -й фракции в ячейке в данный момент времени; \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 ; $E = c_v T + (u^2 + v^2)/2 + q^2$ — полная удельная энергия; $H = E + p/\rho$ — удельная энтальпия смеси; μ и μ_t — молекулярная и турбулентная вязкость соответственно; λ — теплопроводность; p, T — статическое давление и температура;

R_0 — газовая постоянная; S — тензор деформаций; 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. В описании модели турбулентности использовались следующие константы:

$$C_{\omega 1} = 0.55; \quad C_{\omega 2} = 0.833; \quad C_{\omega 3} = 0.666;$$

$$C_\mu = 0.09; \quad C_{q1} = 0.5.$$

Уравнения движения i -й частицы пламегасящего вещества вдоль ее траектории записывались в виде:

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

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

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

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

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

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

где x_i, y_i — координаты частицы; C_{Di} — коэффициенты сопротивления частиц:

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

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

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]

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

$$\tau_e = \frac{l}{|\mathbf{V}'|}, \quad \tau_t = \frac{l}{|\mathbf{V}_i - \bar{\mathbf{V}}|},$$

где $l = \frac{\mu t}{C_\mu^{1/4} \rho k^{1/2}}$ — 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 A-устойчивой разностной схемы также второго порядка точности [11]. Область решения системы уравнений (1)–(10) снизу ограничивалась непроницаемой поверхностью (подстилаящая поверхность, ось OY направлена в горизонтальном направлении, ось OX — в вертикальном), слева — осью симметрии течения, справа и сверху не ограничивалась ничем (безграничное пространство). Граничные условия для несущего газа задавались следующим образом: на оси OX задавались условия симметрии течения, на поверхностях ИАСП и на подстилаяющей поверхности — условия прилипания, на остальных границах — неотражающие граничные условия. Для системы (12)–(17) на подстилаяющей поверхности задавались условия неупругого отражения [12]:

$$\mathbf{v}_{i,n}^- = -(0.993 - 1.76\Theta + 1.56\Theta^2 - 0.49\Theta^3)\mathbf{v}_{i,n}^+,$$

$$\mathbf{v}_{i,\tau}^- = \frac{5}{7}\mathbf{v}_{i,\tau}^+,$$

где $\mathbf{v}_{i,n}^-$, $\mathbf{v}_{i,n}^+$, $\mathbf{v}_{i,\tau}^-$, $\mathbf{v}_{i,\tau}^+$ — нормальная и тангенциальная компоненты вектора скорости i -й частицы, символ (+) относится к падающей и символ (–) — к отраженной частицам; Θ — угол падения.

Для 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

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

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

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Во всех приведенных ниже расчетах полагалось, что скорость испарения частиц $r_p = 10$ мм/с, число фракций полидисперсной среды равно десяти, температура испарения частиц пламегасящего вещества $T_{vap} = 400$ К, теплотворность твердого топлива газогенератора $Q_{gen} = 800$ кДж/кг, диаметр его гранул 3 мм, скорость горения гранулы $r_{bg} = 20$ мм/с. В выражении (2) значения параметров взяты из [8]: $K_0 = 10^{10}$, $E/R = 18\,400$ К, теплота сгорания метана $Q_p = 50$ мДж/кг.

На рис. 2–5 для двух моментов времени приведены результаты моделирования процесса воздействия ИАСП на горящую дозвуковую струю смеси метана (10 %) и воздуха, истекающую из соплового насадка диаметром 0.4 м со скоростью 10 м/с. Температура истекающей

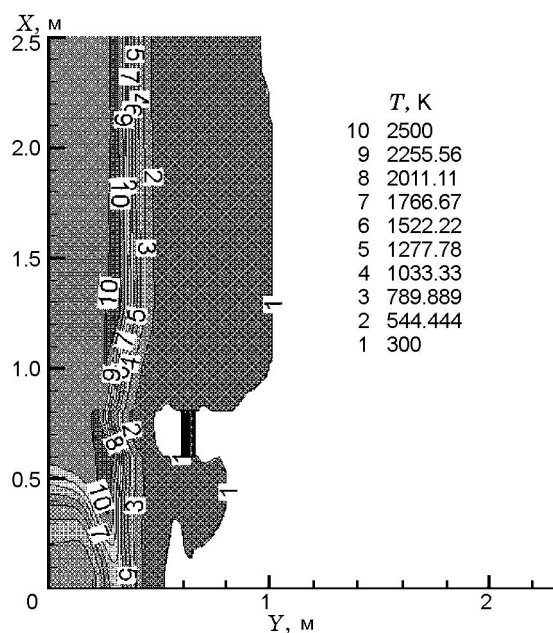


Рис. 2. Изотермы в струе в момент времени $t = 0$

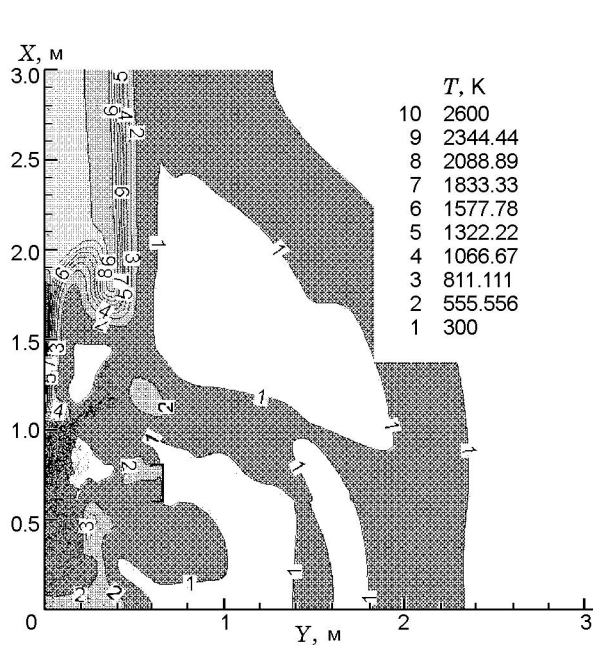


Рис. 3. Изотермы в струе в момент времени $t = 20$ мс ($d_{43} = 25$ мкм)

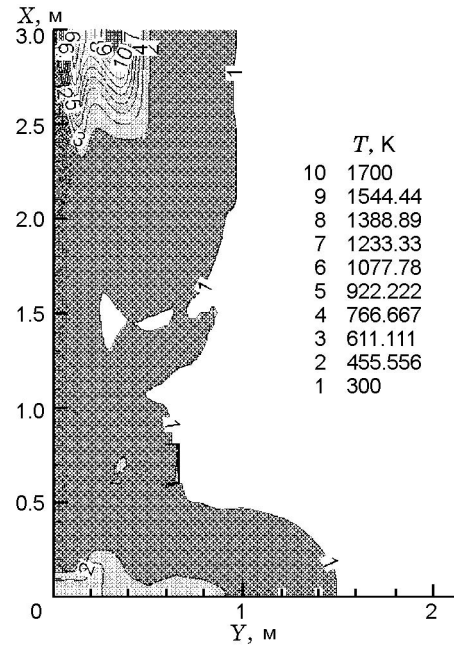


Рис. 4. Изотермы в струе в момент времени $t = 100$ мс ($d_{43} = 25$ мкм)

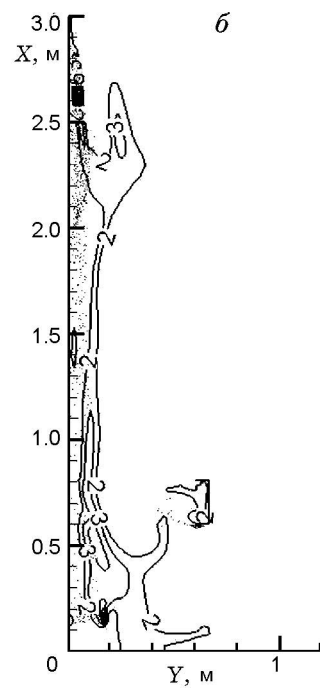
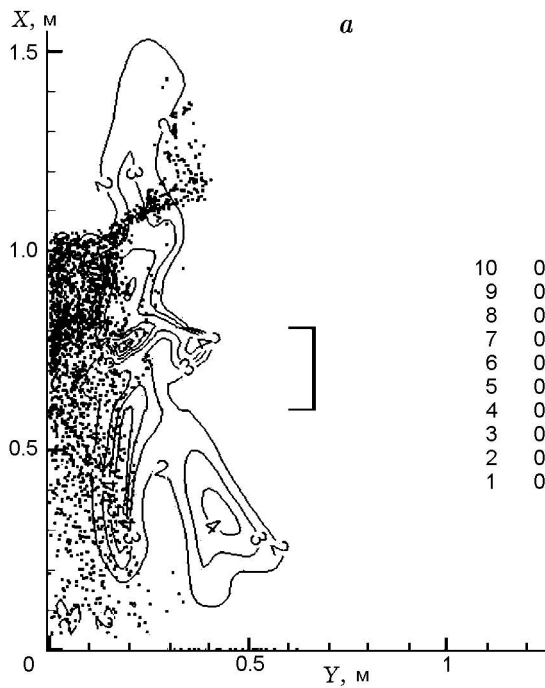


Рис. 5. Изолинии концентраций паров пламегасящего вещества (ПГВ): $d_{43} = 25$ мкм, $t = 20$ (а) и 100 мс (б)

смеси 600 К обеспечивала достаточную близость начала зоны горения к срезу сопла. Стационарное течение в такой струе после стабилизации зоны горения, полученное методом установления, показано на рис. 2.

При моделировании процесса воздействия ИАСП на струю, как отмечалось выше, устройство ИАСП моделировалось тором прямоугольного сечения, окружающего струю. Внутренний диаметр тора равен 1.2 м. Устройство содержало 2 кг гранулированного твердого топлива и 20 кг пламегасящего порошка со средним массовым размером частиц $d_{43} = 25$ мкм. Отсчет времени начинался с момента срабатывания заряда газогенератора. Ось OX цилиндрической системы координат направлена в вертикальном направлении, ось OY — в горизонтальном.

На рис. 3 видно, что в зоне воздействия мелкодисперсных частиц пламегасящего вещества, положение которых показано черными точками, и продуктов сгорания газогенератора на струю структура последней быстро разрушается, а пары пламегасящего вещества и волна разрежения приводят к быстрому падению температуры и прекращению горения в этой зоне. Далее (рис. 4) происходит транспорт частиц по струе в вертикальном направлении и выделяющиеся пары пламегасящего вещества продолжают подавлять процесс горения. Изолинии концентраций этих паров для тех же моментов времени, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что уровень их концентрации, позволяющий эффективно подавлять реакции горения, поддерживается в достаточно большом объеме струи. Роль паров пламегасящего вещества в подавлении горения хорошо демонстрирует рис. 6, где приведены положения изотерм в отсутствие влияния паров на процесс в момент времени $t = 100$ мс. Видно, что в этом случае даже структура течения существенно отличается от предыдущего варианта. Суммарное тепловыделение при горении метана в факеле определялось по формуле

$$Q = \int_V W Q_p dv,$$

где v — область решения системы уравнений (4)–(11). Изменение величины Q во времени с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) влияния паров пламегасящего вещества на процесс горения показано на рис. 7. Пики на кривых

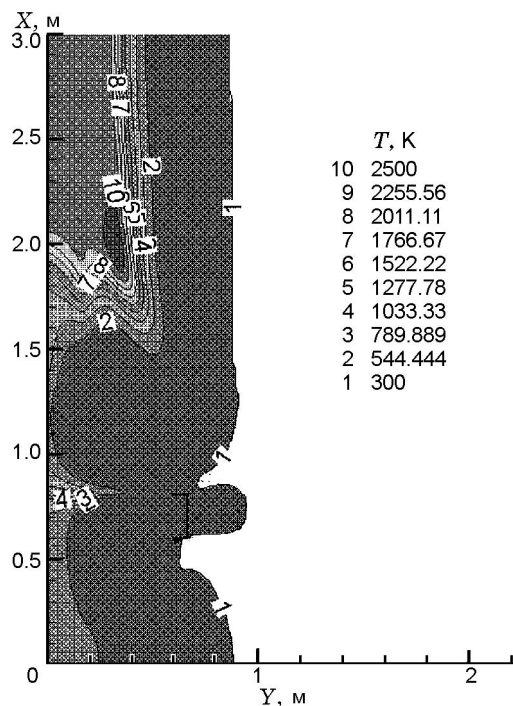


Рис. 6. Изотермы в струе без влияния паров пламегасящего вещества ($t = 100$ мс, $d_{43} = 25$ мкм)

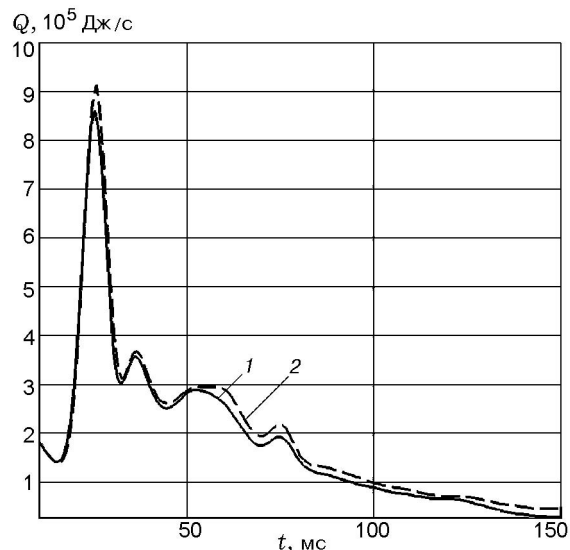


Рис. 7. Изменение суммарного тепловыделения в горящем факеле:

1 — с учетом влияния паров пламегасящего вещества, 2 — без учета

связаны с интенсивным поступлением кислорода воздуха в зону горения на начальной стадии воздействия ИАСП на факел.

Результаты расчетов для частиц пламе-

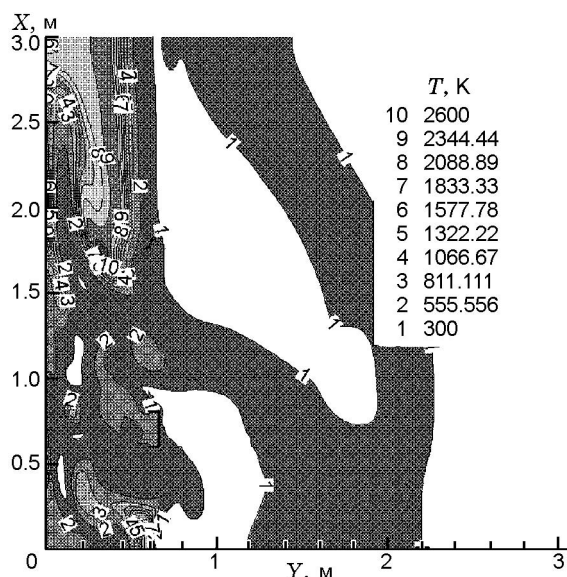


Рис. 8. Изотермы в струе в момент времени $t = 20$ мс ($d_{43} = 5$ мкм)

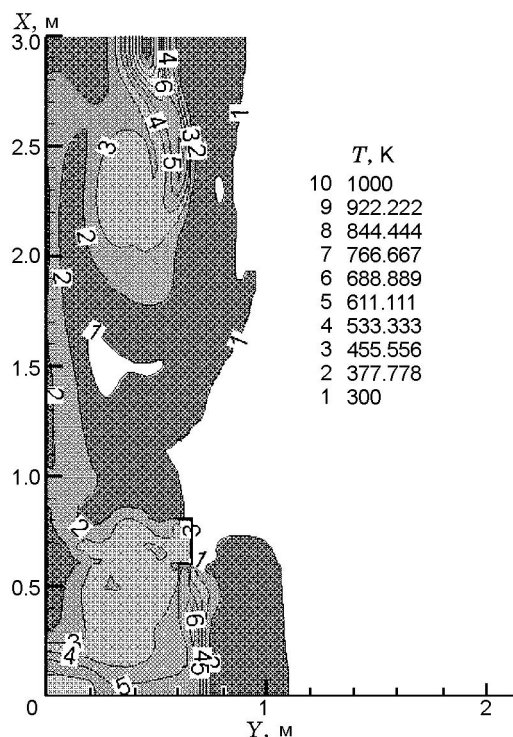


Рис. 9. Изотермы в струе в момент времени $t = 100$ мс ($d_{43} = 5$ мкм)

гающего вещества среднемассового размера $d_{43} = 5$ мкм приведены на рис. 8, 9. В этом случае уменьшение среднемассового размера частиц приводит к их более быстрому испарению,

причем пары концентрируются в основном в зоне воздействия ИАСП на струю, что снижает эффективность гашения пламени. Поэтому выбор дисперсности порошка пламегасящего вещества имеет важное значение для эффективной работы ИАСП.

В расчетах использовалась прямоугольная неравномерная разностная сетка, которая сгущалась в области, занимаемой ИАСП, и вблизи непроницаемых границ. Для оценки точности получаемых численных решений проводились расчеты одного из вариантов на последовательности трех вложенных разностных сеток, основная из которых имела размер 150×200 узлов в плоскости OXY . Расчеты показали, что значения температуры в поле течения определяются с точностью $\approx 3\%$. Для получения качественных оценок основных характеристик процесса взаимодействия ИАСП с факелом такая точность вполне приемлема.

ВЫВОДЫ

- Построена математическая модель для качественной оценки результатов взаимодействия аэрозольного облака частиц пламегасящего вещества с горящим факелом метановоздушной смеси.
- На основе численного моделирования показана возможность тушения факела с помощью ИАСП за сравнительно короткое время.
- Установлено существенное влияние размеров и дисперсности частиц пламегасящего вещества на эффективность гашения факела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баратов А. Н., Вогман Л. П. Огнетушащие порошковые составы. — М.: Стройиздат, 1982.
2. Исавнин Н. В. Средства порошкового пожаротушения. — М.: Стройиздат, 1983.
3. Рычков А. Д., Шокин Ю. И., Милошевич Х. Исследование возможности применения твердотопливных газогенераторов для тушения пожаров на газовых скважинах // Математическое моделирование научных и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности: Материалы VI Казахстанско-Российской международной науч.-практич. 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 // Вычислит. технологии. — 2007. — Т. 12, № 6. — С. 81–89.

5. **Рычков А. Д.** Импульсная система пожаротушения на основе твердотопливного газогенератора // Вычислит. технологии. — 2008. — Т. 13, спец. вып. № 2. — С. 78–86.
6. **Coakley T. J.** Turbulence modeling for high speed flows // AIAA Paper. — N 92-0436. — 1992.
7. **Crow C. T.** Review — Numerical models for dilute gas-particles flows // Trans. ASME. J. Fluid Engineering. — 1982. — V. 104. — P. 297–303.
8. **Волков Э. П., Кудрявцев Н. Ю.** Моделирование образования окислов азота в турбулентном диффузионном факеле // Инж.-физ. журн. — 1989. — Т. 56, № 6. — С. 885–894.
9. **Gosman A. D., Ioannides S. I.** Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors // AIAA Journal Energy. — 1983. — V. 7, N 6. — P. 482–490.
10. **Yoon S., Jameson A.** An LU-SSOR scheme for the Euler and Navier — Stokes equations // AIAA Paper. — 1987. — N 87-600.
11. **Рычков А. Д.** Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. — Новосибирск: Наука, 1988.
12. **Bai C., Gosman A. D.** Development of methodology for spray impingement simulation // SAE Techn. Paper Series. — 1995. — N 950283.

*Поступила в редакцию 26/VI 2008 г.,
в окончательном варианте — 22/IX 2008 г.*
