

УДК 532.529:536.46

**Численное моделирование работы
импульсной аэрозольной системы
пожаротушения при возгораниях жидких
углеводородных топлив***

А.Д. Рычков

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск,
Новосибирский государственный университет*

E-mail: rych@ict.nsc.ru

Моделируется работа импульсной аэрозольной системы пожаротушения, предназначенной для тушения пожаров на нефтехранилищах и на разливах нефтепродуктов, пары от которой моделировались газообразным метаном. Система представляет собой устройство раздельного снаряжения, состоящее из заряда унитарного твердого топлива (газогенератора) и контейнера с мелкодисперсным порошком пламегасящего вещества. Горение метана описывалось одностадийной брутто-реакцией, влияние концентрации паров порошка пламегасящего вещества на процесс горения учитывалось через уменьшение предэкспоненциального множителя в законе Аррениуса и описывалось эмпирической зависимостью.

Вычислительный эксперимент показал, что применение импульсной аэрозольной системы пожаротушения обеспечивает эффективный транспорт мелкодисперсных аэрозольных частиц пламегасящего вещества и образующихся его паров в зону горения; концентрация частиц обеспечивает подавление очага возгорания.

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

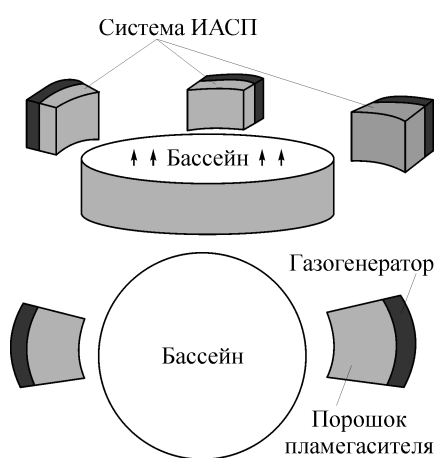
ВВЕДЕНИЕ

Проблема эффективной борьбы с пожарами на нефтехранилищах и с возгораниями разливов нефти и нефтепродуктов при техногенных авариях и катастрофах является чрезвычайно актуальной. Анализ сценариев возникновения таких пожаров и динамики их развития показывает, что наиболее успешной является борьба с ними на начальной стадии возгорания, и поэтому вопросам разработки и создания эффективных средств пожаротушения постоянной готовности, позволяющим за короткое время сгенерировать и доставить к очагу возгорания достаточно большую массу пламегасящего вещества (ПГВ), уделяется большое значение. Наиболее подходящими для этих целей являются системы порошкового

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (НШ-9886.2006.9), Президиума РАН (проект № 4.1) и Программы междисциплинарных интеграционных фундаментальных исследований СО РАН № 26.

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, в результате чего и происходит гашение пламени. Эффективность тушения очагов горения при таком способе определяется, главным образом, показателем концентрации порошка пламегасителя в зоне горения [1]. Следует также заметить, что в соответствии с описанным выше механизмом гашения пламени большую роль в повышении эффективности пожаротушения играет и 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 аэрозольгенерирующие твердотопливные составы, в продуктах сгорания которых содержатся мелкодисперсные частицы пламегасителя достаточно высокой концентрации, способные эффективно подавлять очаги возгорания за относительно короткое время [2]. Однако их основным недостатком являются серьезные технологические трудности, связанные с приготовлением твердотопливных составов, обладающих необходимыми свойствами, а также относительно малая газопроизводительность. Это делает невозможным их использование при тушении пожаров на больших площадях возгорания.

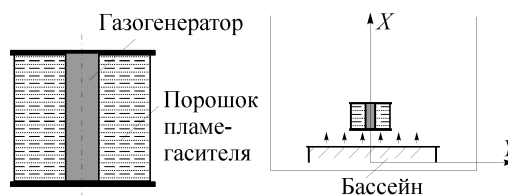
В настоящей работе для этих целей предлагается использовать импульсную аэрозольную систему пожаротушения (ИАСП), концепция которой изложена в работах [3, 4, 5]. Система представляет собой устройство раздельного снаряжения, в котором распыление пламегасящего вещества и транспортировка его в зону горения в виде облака мелкодисперсного аэрозоля осуществляется продуктами сгорания обычного твердотопливного газогенератора кратковременного (импульсного) действия. Продукты сгорания не содержат окислитель. Для тушения горящих танков нефтехранилищ и разливов нефтепродуктов можно использовать систему из нескольких таких устройств, расположенных вокруг очага возгорания (рис. 1), каждое из которых представляет собой полузамкнутый сосуд, содержащий заряд



твердого топлива и мелкодисперсный порошок пламегасителя. Кроме того, для тушения таких возгораний можно использовать ИАСП в виде цилиндра (рис. 2), в центральной части которого располагается заряд газогенератора, а оставшийся объем заполнен порошком ПГВ. По-видимому, наиболее эффективным способом применения таких систем пожаротушения в этом случае будет кассетное (множественное), когда ИАСП сбрасывается с верто-

Рис. 1. Схема периферийного тушения очага возгорания.

Рис. 2. Схема ИАСП при локальном тушении возгорания.



лета или, например, с помощью метания с безопасного расстояния доставляется внутрь очага горения, в результате чего пожар можно быстрее локализовать и потушить.

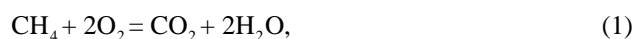
При воспламенении твердотопливного заряда газогенератора продукты его сгорания создают достаточно высокое давление, под воздействием которого происходит компактирование и движение частиц пламегасителя внутри корпуса ИАСП. После их выхода из устройства продукты сгорания формируют баллистическую волну низкой интенсивности, которая сбивает пламя, а также распыляет и диспергирует пламегаситель, который в виде аэрозольного облака мелкодисперсных частиц доставляется в зону горения. При испарении частиц пламегасителя из-за поглощения ими тепла происходит понижение температуры среды в зоне облака частиц, образование паров ПГВ и, кроме того, происходит вытеснение кислорода воздуха из очага горения, поскольку продукты сгорания газогенератора его не содержат. Сочетание всех этих факторов (действие баллистической волны, охлаждение газа в зоне облака частиц, наличие паров пламегасителя и вытеснение из этой зоны кислорода воздуха), а также подбор нужного соотношения массы заряда газогенератора и пламегасителя позволяют тушить различные типы пожаров большой интенсивности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ 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:

- совокупность ИАСП (см. рис. 1), воздействующих на очаг возгорания, заменялась тором прямоугольного сечения, что позволило вместо пространственного течения рассматривать осесимметричное без существенного искажения сути протекающих процессов,

- пары испаряющегося жидкого топлива моделировались газообразным метаном, который смешивался с воздухом и сгорал в диффузионном режиме. Горение метана описывалось одностадийной 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 окислитель, 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 предполагалась 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:

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

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 ПГВ на процесс горения учитывалось через уменьшение значения предэкспоненциального множителя K_0 в (2) путем замены его на множитель K_0^* , вычисляемый по формуле, предложенной О.П. Коробейниковым с сотрудниками*:

$$K_0^* = \begin{cases} K_0 (1 - 7,071 \cdot Y_{ПГВ}^{1/2})^2, & \text{при } Y_{ПГВ} \leq 0,02, \\ 0, & \text{при } Y_{ПГВ} > 0,02, \end{cases} \quad (3)$$

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

Система уравнений, описывающая такое течение в цилиндрической системе координат, имеет следующий вид:

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

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

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

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

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

* Частное сообщение.

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

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

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

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

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

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

$$S_\omega = [C_{\omega1} (C_\mu S / \omega^2 - C_{\omega3} D / \omega) - C_{\omega2}] \rho \omega^2,$$

где \vec{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 вязкости соответственно, p , T — статическое давление и температура, R_0 — универсальная газовая постоянная. Величины 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). Члены в угловых скобках означают осреднение по объему ячейки разностной сетки. Константы, входящие в описание модели турбулентности, имели следующие значения:

$$C_{\omega1} = 0,55, \quad C_{\omega2} = 0,833, \quad C_{\omega3} = 0,666, \quad C_\mu = 0,09, \quad C_{q1} = 0,5, \quad \mu_t = C_\mu \rho q^2 / \omega.$$

$$\tau_{xx} = -2\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{rr} = -2\mu_e \frac{\partial v}{\partial r}, \quad \tau_{xr} = \tau_{rx} = -\mu_e \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right),$$

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

$$\lambda_t = \mu_t C_p / \text{Pr}_t, \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r}, \quad S = (u_{i,j} + u_{j,i}) u_{i,j} - 2/3 u_{k,k}^2,$$

$$\bar{q}_x = - \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \vec{Y}}{\partial x}, \quad \bar{q}_r = - \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \vec{Y}}{\partial r},$$

в выражении для S по повторяющимся индексам проводится суммирование (нотация Эйнштейна).

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

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

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

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

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

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

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

где 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

$$C_{Di} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_{pi}} \left(1 + \frac{\text{Re}_{pi}^{2/3}}{6} \right), & \text{if } \text{Re}_{pi} \leq 10^3, \\ 0,44, & \text{if } \text{Re}_{pi} > 10^3, \end{cases} \quad (18)$$

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

где $\bar{\mathbf{V}}$ — вектор осредненной скорости, $\bar{\mathbf{V}}'$ — случайный вектор возмущения скорости газа, N_r — случайное число из диапазона $[-1, +1]$, $\text{erfc}^{-1}()$ — обратная функция ошибок.

Для расчета течения несущего газа применялась противопотоковая LU (Lower-Upper) разностная схема второго порядка точности, обладающая TVD (Total Variation Diminishing) свойствами, близкая к схеме из работы [7]. Расчет движения частиц проводился с помощью А-устойчивой разностной схемы также второго порядка точности [8]. Область решения системы уравнений (1)–(10) снизу ограничивалась пористым диском заданного диаметра (бассейн), через который поступал газообразный метан, поверхность вне диска полагалась непроницаемой (подстилаящая поверхность), ось OY направлена в горизонтальном направлении, ось OX — в вертикальном.левой границей являлась ось симметрии течения, границы справа и сверху выбирались достаточно удаленными, имитирующими 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 поверхности бассейна задавался газоприход метана, вдуваемого по нормали к ней, и его

температура, на остальных границах бассейна — неотражающие граничные условия. Для системы (12)–(17) на подстилающей поверхности задавались условия неупругого отражения

$$\bar{v}_{i,n}^- = -(0,993 - 1,76\Theta + 1,56\Theta^2 - 0,49\Theta^3)\bar{v}_{i,n}^+, \quad \bar{v}_{i,\tau}^- = \frac{5}{7}\bar{v}_{i,\tau}^+,$$

где $\bar{v}_{i,n}^-$, $\bar{v}_{i,n}^+$, $\bar{v}_{i,\tau}^-$, $\bar{v}_{i,\tau}^+$ — нормальная и тангенциальная компоненты вектора скорости i -й частицы, символ плюс относится к падающей, а символ минус — к отраженной частицам, Θ — угол падения.

Величина массоприхода M_{gen} продуктов сгорания газогенератора в (4) определялась из решения уравнения

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

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 скорость испарения частиц полагалась равной $r_p = 10$ мм/с, число фракций полидисперсной среды равнялось десяти, температура испарения частиц ПГВ $T_{\text{исп}} = 400$, теплотворность твердого топлива газогенератора $Q_{\text{ген}} = 800$ К·дж/кг, в выражении (2) $K_0 = 10^{10}$ [м³/(кг·с)], $E/R = 18400$ К, теплота сгорания метана $Q_p = 50$ Мдж/кг.

Моделирование работы ИАСП проводилось для начальной стадии возгорания метана. Бассейн имел диаметр 1,7 м, метан подавался через его поверхность по нормали к ней со скоростью 0,4 м/с в открытую атмосферу, что обеспечивало после его воспламенения существование квазиустойчивого режима горения, обусловленного перемежающимся режимом турбулентного течения. Использовались две схемы устройств ИАСП — вышеописанная в виде тора, окружающего бассейн (см. рис. 1), и устройство в виде цилиндра (см. рис. 2), размещенного в центре бассейна. В первом случае внутренний диаметр тора был равен 2,2 м, вес заряда газогенератора составлял 2 кг, вес порошка ПГВ — 20 кг. На рис. 3 приведены изотермы в зоне горения, полученные в результате расчета течения после поджигания метана внешним тепловым источником до получения квазиустановившейся структуры течения. С этого момента времени начиналось воздействие ИАСП на процесс горения. Результаты расчетов для среднемассового размера частиц $d_{43} = 25$ мкм показаны на рис. 4–6. На рис. 4 показано распределение концентраций массовых долей ПГВ в зоне горения, черные точки соответствуют положениям частиц ПГВ. Видно, что в результате работы ИАСП (см. рис. 5–6) горение практически прекращается уже через 40 мс, температура над бассейном быстро падает ниже температуры воспламенения метана и в дальнейшем возобновление горения становится невозможным.

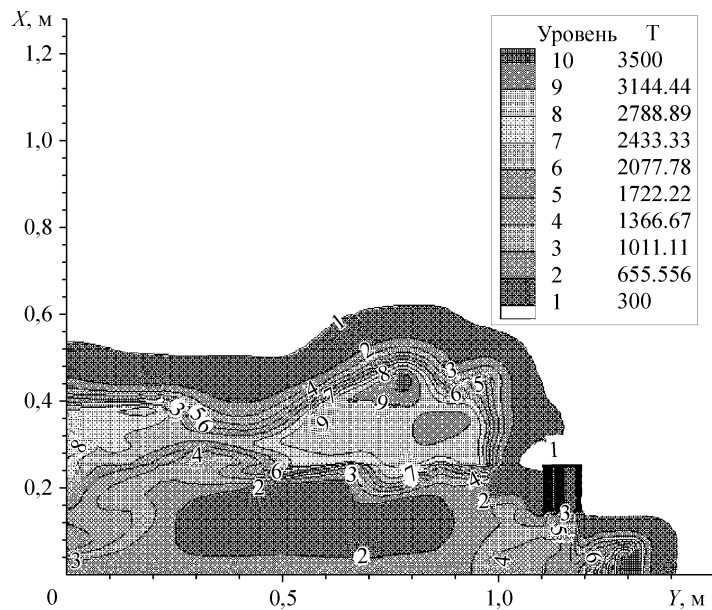


Рис. 3. Квазистационарная зона горения в бассейне ($t = 0$ мс).

Роль паров ПГВ в подавлении процесса горения хорошо видна на рис. 7, где для того же момента времени приведено положение изотерм в случае отсутствия влияния этих паров на данный процесс. Видно, что в этом случае даже структура течения существенно отличается от предыдущего варианта. Суммарное тепловыделение при горении метана в зоне горения определялось по формуле

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

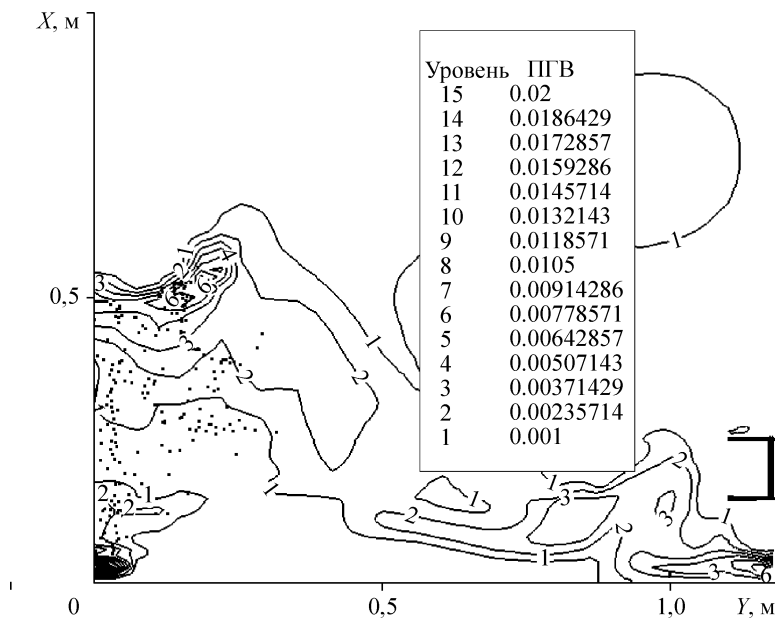


Рис. 4. Изотермы в зоне горения ($t = 40$ мс).

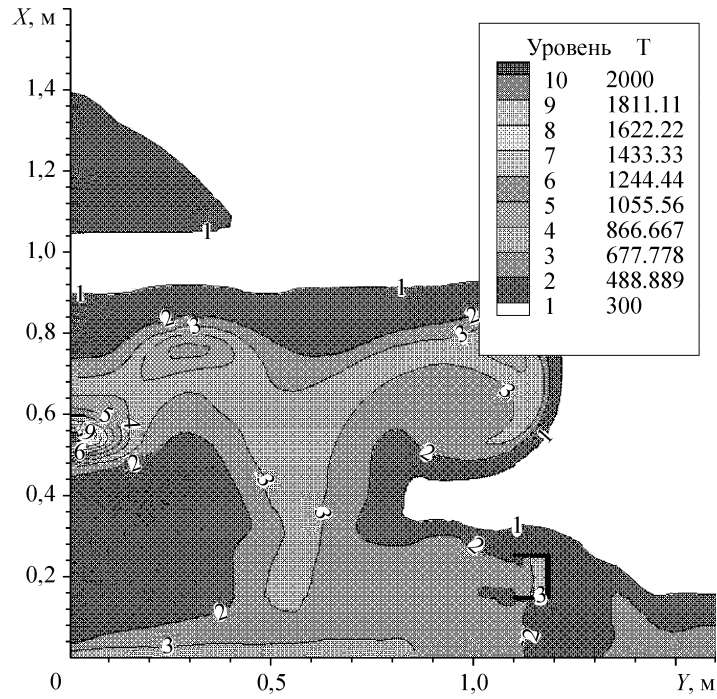


Рис. 5. Концентрация ПГВ в зоне горения ($t = 40$ мс).

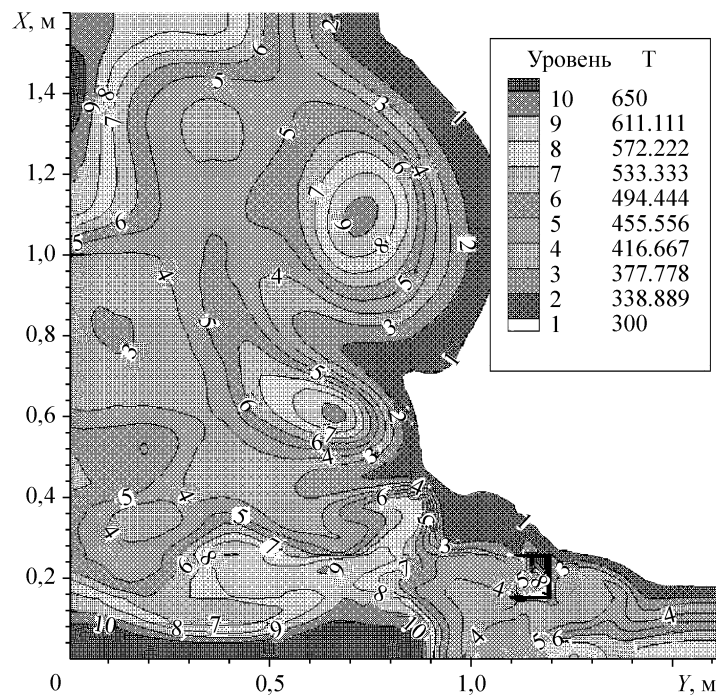


Рис. 6. Изотермы в зоне горения ($t = 100$ мс).

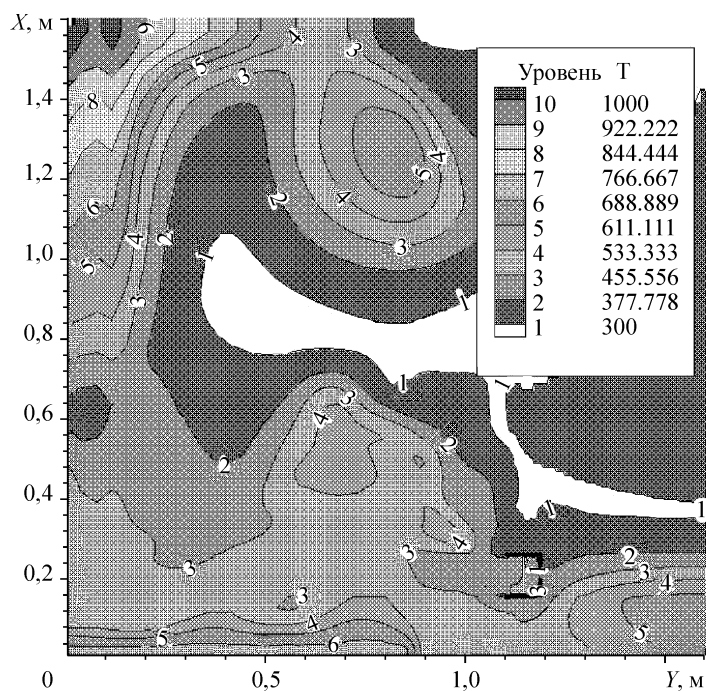


Рис. 7. Изотермы в зоне горения без влияния паров ПГВ ($t = 100$ мс).

где V — область решения системы уравнений (4)–(11). Изменение величины Q во времени с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) влияния паров ПГВ на подавление процесса горения приведено на рис. 8. Пики на этих кривых связаны с интенсивным поступлением кислорода воздуха в зону горения на начальной стадии воздействия ИАСП за счет интенсивного перемешивания, вызванного баллистической волной.

Подобные расчеты, проведенные для среднемассового размера частиц $d_{43} = 12$ мкм, показали, что в этом случае эффективность гашения пламени падает, поскольку испарение частиц ПГВ с уменьшением их размеров происходит более интенсивно и концентрация их паров остается достаточно высокой в основном

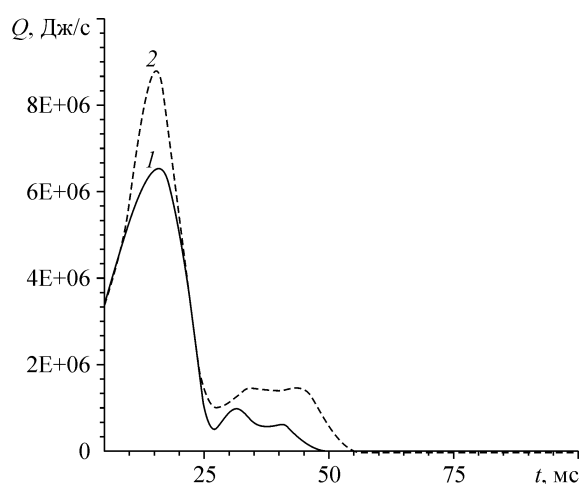


Рис. 8. Изменение суммарного тепловыделения.

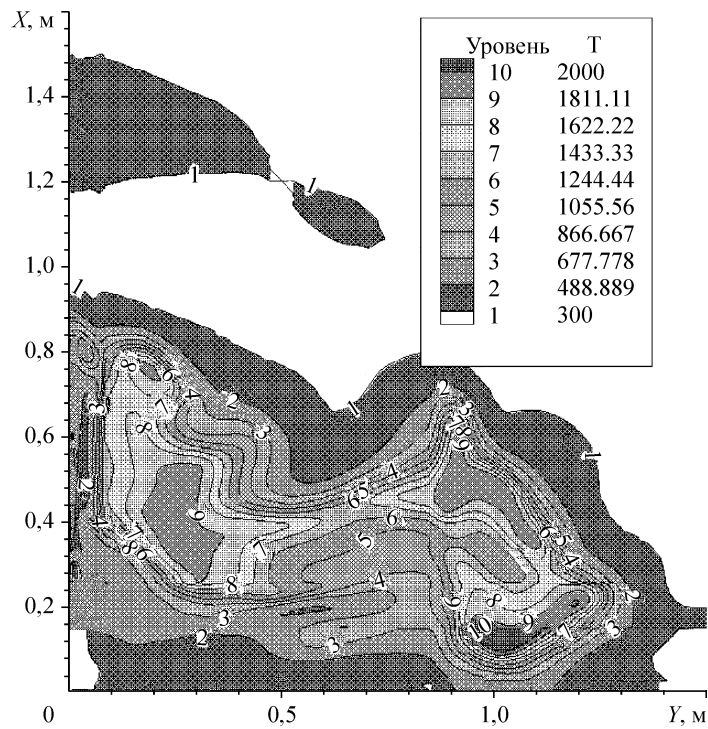


Рис. 9. Изотермы в бассейне при центральном расположении ИАСП ($t = 100$ мс).

на периферии бассейна. Поэтому выбор дисперсности порошка ПГВ имеет важное значение для эффективной работы ИАСП.

Результаты аналогичного исследования в случае применения ИАСП в виде цилиндра приведены на рис. 9–10. Масса заряда твердого топлива равнялась 0,1 кг, масса порошка ПГВ — 2 кг, диаметр цилиндра — 0,18 м, высота — 0,11 м.

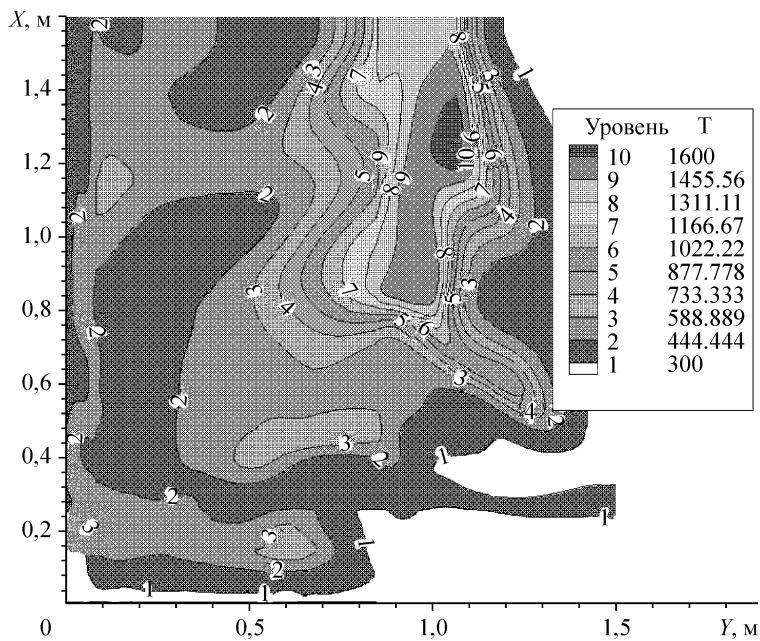


Рис. 10. Изотермы в бассейне при центральном расположении ИАСП ($t = 250$ мс).

Видно, что в этом случае область, где воздействие ИАСП на процесс горения оказывается эффективным, ограничена сравнительно небольшим радиусом, что связано как с меньшей исходной массой порошка ПГВ, так и с тем, что концентрация его частиц, а, следовательно, и паров ПГВ, при их движении в радиальном направлении от ИАСП быстро уменьшается. Поэтому в данном случае целесообразно использовать несколько таких устройств ИАСП, покрывающих площадь бассейна.

Для оценки погрешности получаемых численных решений проводились расчеты одного из вариантов на последовательности трех вложенных разностных сеток, в результате чего было установлено: значения температуры в поле течения определяются с точностью до 3 %. Для получения качественных оценок основных характеристик процесса воздействия ИАСП на зону горения такая точность оказывается вполне приемлемой.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель для качественной оценки результатов взаимодействия аэрозольного облака частиц пламегасящего вещества с очагом возгорания паров жидких углеводородных топлив.

2. На основе численного моделирования показана возможность тушения факела с помощью импульсной аэрозольной системы пожаротушения за сравнительно короткое время.

3. Установлено существенное влияние дисперсности частиц пламегасящего вещества на эффективность гашения факела.

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 // Мат. моделирование научно-технол. и эколог. проблем в нефтегазодобывающей промышленности (Материалы VI Казахстанско-Рос. межд. 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 // Вычислительные технологии. — 2007. — Т. 12, № 6. — С. 81–89.
5. Рычков А.Д. Импульсная система пожаротушения на основе твердотопливного газогенератора // Вычислительные технологии. — 2008. — Т. 13, спец. выпуск № 2. — С. 78–86.
6. Coakley, T.J. Turbulence modeling for high speed flows // AIAA Paper. — 1992. — 92-0436.
7. Crow, C.T. Review – Numerical models for dilute gas-particles flows // Trans. of ASME. J. of Fluid Engng. — 1982. — Vol. 104. — P. 297–303.
8. Yoon, S., Jameson A. An LU-SSOR scheme for the Euler and Navier-Stokes equations // AIAA Paper. — 1987. — 87-600.
9. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. — Новосибирск: Наука, 1988. — 222 с.

Статья поступила в редакцию 11 июля 2008 г.