

ГЕНЕРАТОР НАНОРАЗМЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ И НА РАЗЛИВАХ НЕФТИ*

А. Д. Рычков, Ю. И. Шокин

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: rych@ict.nsc.ru

Numerical modeling is used to investigate an opportunity of application of the pulse aerosol system of fire fighting (PASFF) in the cases of flare smoke jets and oil spills. On the basis of numerical experiment it was established that gasdynamic structure of the flow field can provide an effective transport of aerosol particles of the flame retardant substance and their vapors into the combustion zone for reliable fire extinguishing of heat sources.

Введение

В настоящее время для эффективной борьбы с интенсивными очагами возгорания на больших площадях широкое применение находят системы порошкового пожаротушения на основе различного рода пламегасителей, в качестве которых используются фосфорорганические, металлоорганические, а также некоторые галогенсодержащие соединения. Попадая в зону пламени, эти пламегасящие вещества (ПГВ) разлагаются с образованием 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], поэтому разработка эффективных способов его доставки в очаг пламени является чрезвычайно актуальной задачей. Заметим, 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 наноразмерных частиц наиболее предпочтительна. Однако получение аэрозолей с такими размерами частиц в существующих импульсных системах порошкового пожаротушения не представляется возможным. Такие системы обычно представляют собой газогенераторы, использующие унитарные аэрозольгенерирующие

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН (проекты 2006-28, 2006-113), программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (проект 4.1.1) и научной школы НШ-9886.2006.9.

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2007.

твердотопливные составы, в продуктах сгорания которых содержатся мелкодисперсные частицы пламегасителя достаточно высокой концентрации, способные эффективно подавлять очаги возгорания за относительно короткое время [2]. Но их основным недостатком являются серьезные технологические трудности, связанные с приготовлением твердотопливных составов, обладающих необходимыми свойствами, а также относительно малая газопроизводительность. Это делает невозможным использование их при тушении пожаров на газовых скважинах и на больших площадях разливов нефти.

В данной работе для этих целей предлагается использовать импульсную аэрозольную систему пожаротушения (ИАСП) [3, 4], представляющую собой устройство раздельного снаряжения, в котором распыление пламегасящего вещества и транспортировка его в зону горения в виде мелкодисперсного аэрозольного облака осуществляется продуктами сгорания обычного твердотопливного газогенератора кратковременного (импульсного) действия, не содержащими окислитель.

Для тушения горящих факелов на газовых скважинах можно использовать систему из нескольких таких устройств, расположенных вокруг факела (рис. 1). Каждое такое устройство представляет собой полузамкнутый сосуд, содержащий заряд твердого топлива в виде гранул и мелкодисперсный порошок пламегасителя. Для тушения возгораний на разливах нефти можно использовать ИАСП в виде цилиндра (рис. 2), в центральной части которого располагается заряд газогенератора, а оставшийся объем заполнен пламегасящим веществом.

По-видимому, наиболее эффективным в этом случае при большой площади возгорания будет кассетное (множественное) применение таких ИАСП, которые можно сбрасывать с вертолета или метать иными способами внутрь очага горения, в результате чего пожар можно быстрее локализовать и потушить.

При воспламенении твердотопливного заряда газогенератора под воздействием продуктов его сгорания происходят компактирование и движение частиц пламегасителя внутри ИАСП. После их выхода из устройства продукты сгорания формируют баллистическую волну низкой интенсивности, которая сбивает пламя, а также распыляют

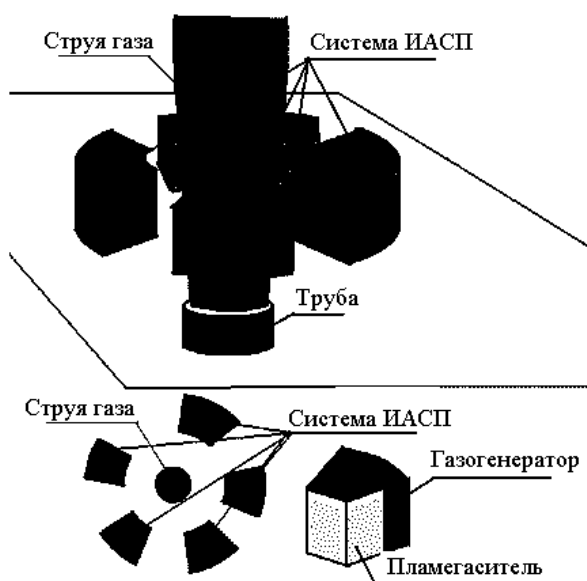


Рис. 1. Схема тушения газового факела



Рис. 2. Схема тушения разлива нефти

и диспергируют пламегаситель, который в виде аэрозольного облака наноразмерных частиц доставляется в зону горения. При испарении частиц пламегасителя из-за поглощения ими тепла происходит понижение температуры среды в зоне облака частиц 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, 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.

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 [5]. Движение полидисперсной твердой фазы описывалось в рамках стохастического подхода [6], учитывающего влияние турбулентной природы поля течения несущего газа на движение частиц.

Основной целью данной работы являлось изучение газодинамической структуры поля течения при воздействии ИАСП на очаг возгорания и определение полей концентраций частиц ПГВ. Поэтому при построении математической модели принимались следующие допущения:

— совокупность ИАСП (см. рис. 1), воздействующих на газовый факел, заменялась тором прямоугольного сечения, что позволяет заменить пространственное течение осесимметричным без существенного искажения сути протекающих процессов;

— несущий газ представлял собой химически не реагирующую многокомпонентную смесь, состоящую из воздуха, природного газа, продуктов сгорания газогенератора и продуктов разложения ПГВ;

— течение является турбулентным, двухфазным, осесимметричным и нестационарным;

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

— распределение температуры по объему частицы полагалось однородным. Когда температура достигает заданной величины T_{vap} , 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.

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

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

$$\frac{\partial \rho Y_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_{O_2} + q_{x,O_2}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v Y_{O_2} + q_{r,O_2}) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho Y_{\text{ПГВ}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_{\text{ПГВ}} + q_{x,M}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v Y_{\text{ПГВ}} + q_{r,\text{ПГВ}}) = - \sum_{i=1}^N \langle \frac{dm_i}{dt} \rangle n_i; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_M + q_{x,M}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v Y_M + q_{r,M}) = M_{gen}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p + \tau_{xx}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho u v + \tau_{xr}) + \frac{2}{3} \frac{\partial \rho k}{\partial x} = - \sum_{i=1}^N n_i \langle m_i \frac{du_i}{dt} \rangle; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v u + \tau_{rx}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v^2 + p + \tau_{rr}) + \frac{2}{3} \frac{\partial \rho k}{\partial r} + 2 \frac{\mu_e v}{r^2} = p - \sum_{i=1}^N n_i \langle m_i \frac{dv_i}{dt} \rangle; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u(\rho E + p) + u\tau_{xx} + v\tau_{xr} + \varphi_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(v(\rho E + p) + u\tau_{xr} + v\tau_{rr} + \varphi_r) = \\ = - \sum_{i=1}^N n_i \left[u \langle m_i \frac{du_i}{dt} \rangle + v \langle m_i \frac{dv_i}{dt} \rangle + \langle \pi d_i \lambda \cdot Nu(T - T_i) \rangle \right] + Q_{gen} M_{gen}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u q + \tau_{x,q}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v q + \tau_{r,q}) = S_q; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \omega + \tau_{x,\omega}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v \omega + \tau_{r,\omega}) = S_\omega; \quad (9)$$

$$p = \rho T R_0 \left(\frac{Y_{O_2}}{M_{O_2}} + \frac{Y_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{Y_M}{M_M} + \frac{Y_{\text{ПГВ}}}{M_{\text{ПГВ}}} \right); \quad Y_{O_2} + Y_{N_2} + Y_M + Y_{\text{ПГВ}} = 1; \quad (10)$$

$$S_q = C_{q1}(C_\mu S/\omega^2 - 2D/(3\omega) - 1)\rho\omega q, \quad S_\omega = [C_{\omega1}(C_\mu S/\omega^2 - C_{\omega3}D/\omega) - C_{\omega2}]\rho\omega^2,$$

где $q = \sqrt{k}$, $\omega = \varepsilon/k$ — “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; μ и μ_t — молекулярная и турбулентная вязкости соответственно; p , T — статическое давление и температура; R_0 — газовая постоянная. Величины M_{gen} и Q_{gen} есть источники массы и энергии, моделирующие приход высокотемпературных продуктов сгорания от газогенератора. Члены в угловых скобках означают осреднение по объему ячейки разностной сетки. Константы, входившие в описание модели турбулентности, имели следующие значения:

$$C_{\omega1} = 0.55, \quad C_{\omega2} = 0.833, \quad C_{\omega3} = 0.666, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_{q1} = 0.5, \quad \mu_t = C_\mu \rho q^2 / \omega,$$

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

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

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

$$q_{x,k} = -(\rho D_k + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial Y_k}{\partial x}, \quad q_{r,k} = -(\rho D_k + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial Y_k}{\partial r},$$

где индекс k принимает следующие значения: $k = O_2, N_2, M, \text{ПГВ}$.

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

$$\frac{dm_i}{dt} = -\rho_p d_i^2 \pi \cdot r_p; \quad (11)$$

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\mu C_{Di} \text{Re}_{p,i}}{\rho_p d_i^2} (u + u' - u_i); \quad (12)$$

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

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{6}{C_i} \frac{\lambda \cdot Nu}{\rho_p d_i^2} (T - T_i); \quad (14)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i; \quad (15)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = v_i, \quad (16)$$

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; u', v' — компоненты случайного вектора возмущения скорости газа $\vec{V}' = (u', v')$; $\vec{V}' = \sqrt{2k/3} \text{erfc}^{-1}(N_r) \vec{V} / |\vec{V}|$; \vec{V} — вектор осредненной скорости; N_r — случайное число из диапазона $[-1, +1]$; $\text{erfc}^{-1}()$ — обратная функция ошибок.

Коэффициенты сопротивления в уравнениях движения частиц рассчитывались по формуле

$$C_{Di} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_{pi}} \left(1 + \frac{\text{Re}_{pi}^{2/3}}{6} \right), & \text{если } \text{Re}_{pi} \leq 10^3, \\ 0.424, & \text{если } \text{Re}_{pi} > 10^3, \end{cases} \quad \text{Re}_{pi} = \frac{d_i \rho |\vec{V} - \vec{V}_i|}{\mu}. \quad (17)$$

Для расчета течения несущего газа применялась противопотоковая LU-разностная схема второго порядка точности, обладающая TVD-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 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 (11)–(16) на подстилаяющей поверхности задавались условия неупругого отражения:

$$\vec{v}_{i,n}^- = -(0.993 - 1.76\Theta + 1.56\Theta^2 - 0.49\Theta^3) \vec{v}_{i,n}^+, \quad \vec{v}_{i,\tau}^- = \frac{5}{7} \vec{v}_{i,\tau}^+,$$

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

Величина массоприхода M_{gen} продуктов сгорания газогенератора в (1) определялась решением уравнения

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

где ρ_{gr} , S , r_{bg} — плотность материала гранулы твердого топлива, 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.

2. Некоторые результаты расчетов

Во всех приведенных ниже расчетах скорость испарения частиц $r_p = 10$ мм/с, число фракций полидисперсной среды равнялось 10, их среднемассовый размер $d_{43} = 20$ мкм, минимальный размер частиц равен 0.1 мкм, температура испарения частиц ПГВ $T_{vap} = 400$ К, теплотворность твердого топлива газогенератора $Q_{gen} = 1780$ кДж/кг.

При моделировании процесса воздействия ИАСП на горящий факел природного газа принимались во внимание следующие соображения. Поскольку давление в пласте достаточно высокое, истечение струи из насадка (см. рис. 1) может быть сверхзвуковым. Воспламенение и горение такого факела происходит на достаточном удалении от насадка после турбулентного смешения природного газа с кислородом воздуха. Поэтому имеет смысл рассмотреть два способа тушения факела — воздействием ИАСП на начальный участок струи, где горения нет, и на саму зону горения. Начальный участок

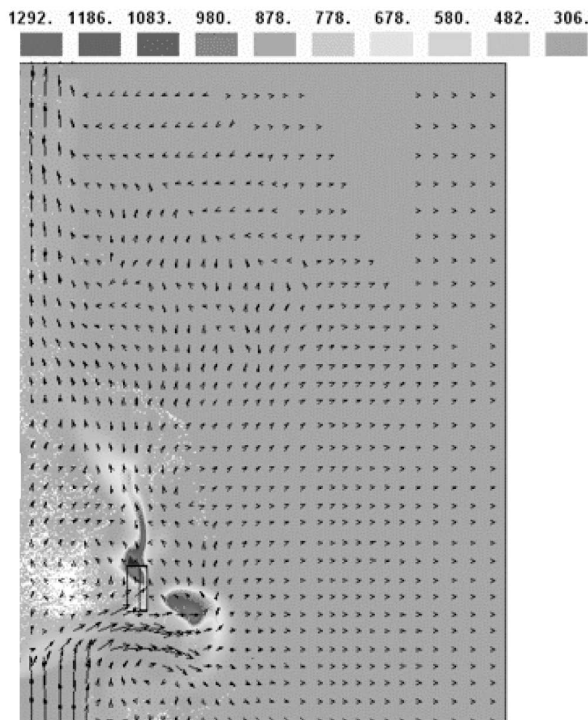


Рис. 3. Структура поля течения и изотермы в холодной струе ($t = 10$ мс)

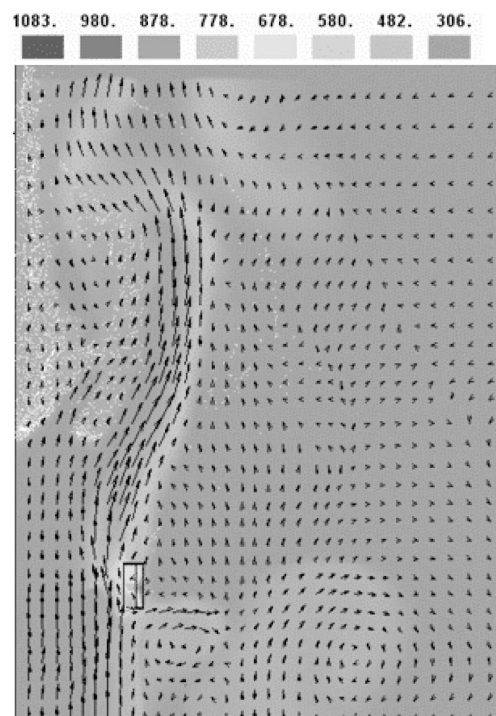


Рис. 4. Структура поля течения и изотермы в холодной струе ($t = 40$ мс)

такой струи моделировался сверхзвуковой холодной струей природного газа с числом Маха, равным 3. Диаметр струи был равен 0.5 м, температура в струе $T = 320$ К.

Внутренний и внешний диаметры тора ИАСП равны 0.9 м и 1.06 м соответственно, масса пламегасителя — 60 кг, масса заряда твердого топлива — 2 кг.

На рис. 3 и 4 показаны распределения температуры в поле течения и положения частиц пламегасящего вещества в два различных момента времени. Видно, что на начальном этапе воздействия ИАСП на факел сначала происходят “развал” струи, что способствует быстрому отсеканию поступления газа в горящую часть факела, и формирование в центре струи зоны частиц ПГВ с достаточно высокой их концентрацией. После прекращения работы ИАСП структура струи частично восстанавливается и осуществляется транспорт частиц пламегасителя в зону горения.

Горящий участок факела моделировался горячей дозвуковой струей не реагирующего природного газа с числом Маха $= 0.4$. В этом случае из-за теплового расширения струи ее диаметр полагался равным 1 м, температура в струе $T = 1200$ К. Внутренний и внешний диаметры тора ИАСП были равны 1.4 м и 1.56 м соответственно, масса пламегасителя — 90 кг, масса заряда твердого топлива — 3 кг. На рис. 5 и 6 представлены распределения температуры в поле течения и положения частиц ПГВ на начальном и конечном этапах воздействия ИАСП на струю. Видно, что на начальном этапе воздействия дозвуковая струя, в отличие от сверхзвуковой, теряет свою устойчивость, что также приводит к ее “развалу” и к существенной перестройке течения в ней, а также к затягиванию процесса ее “релаксации”, что положительно влияет на процесс гашения пламени.

Как уже говорилось, для тушения разливов горячей нефти предлагалась схема ИАСП в виде цилиндра, в центральной части которого располагался заряд твердого топлива газогенератора (см. рис. 2). В этом случае очаг горения моделировался воздухом, нагретым до температуры $T = 800$ К, ИАСП располагался на расстоянии $h = 0.1$ м от подстилающей поверхности (разлива нефти) и основной целью исследования явля-

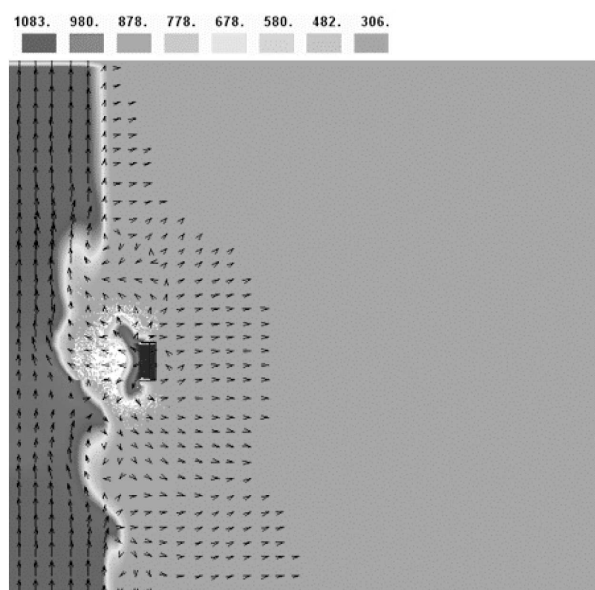


Рис. 5. Течение в дозвуковой струе ($t = 20$ мс)

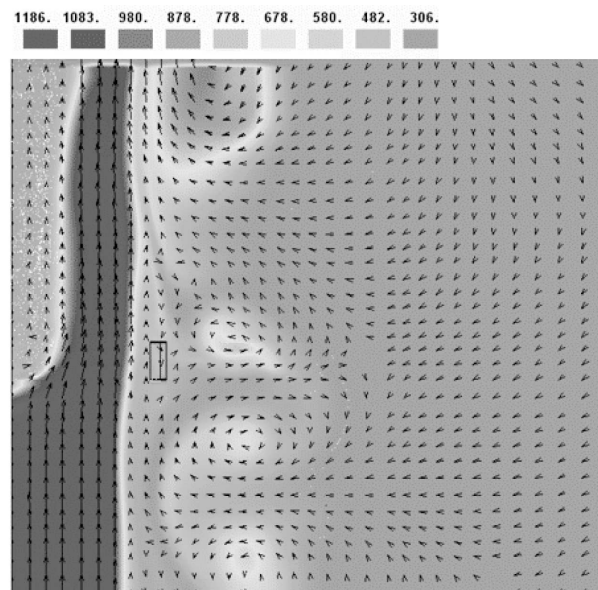


Рис. 6. Течение в дозвуковой струе ($t = 50$ мс)

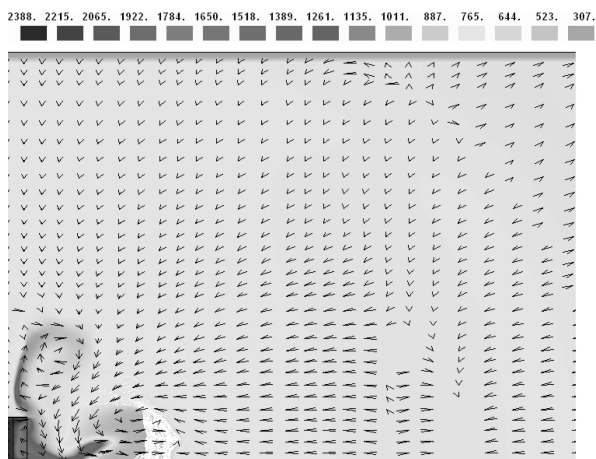


Рис. 7. Поле течения при тушении разлива нефти

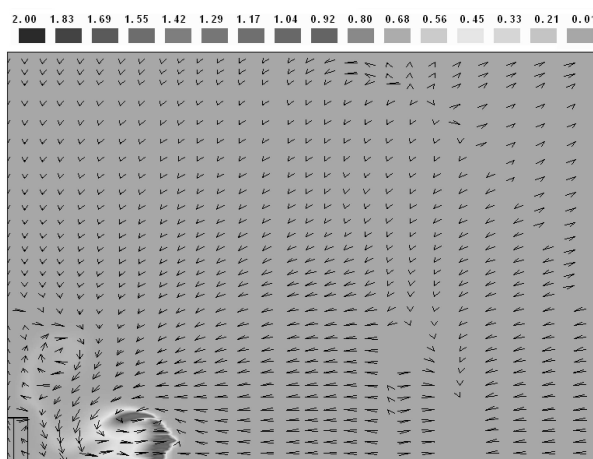


Рис. 8. Концентрация паров ПГВ

лось определение структуры аэрозольного облака частиц и распределения концентрации паров ПГВ. Диаметр цилиндра ИАСП был равен 0.36 м, высота цилиндра — 0.2 м, масса заряда твердого топлива — 0.1 кг, масса ПГВ — 10 кг. На рис. 7 показаны структура поля течения и положения частиц ПГВ в момент времени $t = 10$ мс. Распределение температуры свидетельствует о ее понижении в области, занятой частицами ПГВ, из-за поглощения ими тепла, начальная температура которых была равна 300 К, а температура испарения — ниже температуры окружающей среды. Вихревая структура за облаком частиц обеспечивает устойчивую компактную форму облака аэрозоля в форме тора, генерирующую достаточно высокую концентрацию паров ПГВ (рис. 8). Видно, что предлагаемое устройство способно осуществлять транспортировку достаточно большой массы аэрозольного облака ПГВ в зону горения без заметного разрушения его структуры продуктами сгорания газогенератора.

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. Моделирование работы генератора аэрозолей в качестве пламегасящего устройства // Матер. XV междунар. конф. по вычисл. механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2007), 25–31 мая. Алушта, 2007. С. 446–448.
- [4] 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 (Матер. VI Казахстанско-российской междунар. научно-практ. конф. Астана: Изд-во Евразийского ун-та, 2007. С. 274–278.
- [5] COAKLEY T.J. Turbulence modeling for high speed flows // AIAA Paper. 1992. 92–0436.

- [6] CROW C.T. Review — Numerical models for dilute gas-particles flows // Trans. of ASME J. of Fluid Eng. 1982. Vol. 104. P. 297–303.
- [7] YOON S., JAMESON A. An LU-SSOR scheme for the Euler and Navier-Stokes equations // AIAA Paper. 1987. 87–600.
- [8] РЫЧКОВ А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.

Поступила в редакцию 12 ноября 2007 г.