

Импульсная система пожаротушения на основе твердотопливного газогенератора*

А. Д. РЫЧКОВ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: rych@ict.nsc.ru

A scheme of pulse system of fire fighting (PSFF) for intensive heat sources extinguishing with the help of a solid-propellant gas generator is suggested. Dispersion of the finely dispersed powder of the flame retardant substance and its transport into the combustion zone in the form of an aerosol cloud is made possible due to the high pressure created by the burning products of the gas generator. Mathematical model of processes in PSFF is proposed. Results of numerical modelling suggest that this device provides a rather stable structure of the particle cloud and which is able to support an effective transport of aerosol particles into the combustion zone.

Введение

Задача эффективного гашения интенсивных очагов пламени, внезапно возникающих при аварийных ситуациях и техногенных катастрофах, является чрезвычайно актуальной. Решение этой задачи обуславливает выбор экологически безопасного, нетоксичного и приемлемого с экономической точки зрения пламегасящего вещества (ПГВ), а также эффективных средств его доставки к очагу пламени. Наиболее перспективны для этих целей фосфорорганические соединения (ФОС), металлоорганические соединения или МОС (органические соли и комплексные соединения К, Na, Ca и др.), а также некоторые галогенсодержащие соединения (CH_3I , CF_3I). Суть механизма гашения состоит в том, что в пламени эти вещества разлагаются с образованием активных соединений, которые вступают в химические реакции с радикалами (частицами, ответственными за горение и распространение пламени), переводя их в неактивные частицы, тем самым обрывая цепные разветвленные реакции горения, в результате чего и происходит гашение пламени. Для эффективного гашения пламени достаточно объемной концентрации этих продуктов разложения порядка 1–2 %. Таким образом, эти классы соединений являются перспективными кандидатами для замены хладонов, широко используемых в настоящее время в средствах пожаротушения, но запрещенных к производству Монреальской конвенцией 1987 г.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН (проекты № 28 и № 113), Программы фундаментальных исследований ОЭММ-ПУ РАН (грант № 4.1.1), Программы Государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами Российской Федерации (грант НШ-931.2008.9).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

Главное препятствие для применения большинства как уже известных, так и новых эффективных ПГВ — это потери при их доставке к очагу пламени. Применение мелкодисперсных аэрозолей пламегасителей с размером частиц порядка 20...40 мкм и более мелких уменьшает эти потери. Однако получение аэрозолей с такими характеристиками в средствах пожаротушения на данный момент является технически трудной задачей. Как правило, для этого используются унитарные аэрозольгенерирующие составы. Такие составы используются в системах пожаротушения на основе твердотопливных газогенераторов, в продуктах сгорания которых содержатся мелкодисперсные частицы пламегасителя в достаточно высокой концентрации, способные эффективно подавлять очаги возгорания за относительно короткое время. Однако их основной недостаток заключается в серьезных технологических трудностях, связанных с приготовлением твердотопливных составов, обладающих необходимыми свойствами, а также в относительно малой газопроизводительности, что затрудняет их использование при тушении очагов возгорания на больших площадях (например, при лесных пожарах).

Как альтернативный и более эффективный метод пожаротушения в данной работе предлагается использование устройства раздельного снаряжения, в котором распыление пламегасящего вещества и транспортировка его в зону горения осуществляются продуктами сгорания обычного твердотопливного газогенератора кратковременного (импульсного) действия, продукты сгорания которого имеют относительно низкую температуру и не содержат окислитель. Важной проблемой здесь является разработка конструкций таких устройств и составов твердотопливных зарядов для газогенераторов, которые, с одной стороны, были бы сравнительно безопасны, а с другой — обеспечивали бы нужные параметры получаемого с их помощью облака аэрозолей пламегасителей, необходимые для эффективного тушения пламени.

Одна из возможных схем такой импульсной аэрозольной системы пожаротушения (ИАСП) приведена на рис. 1. Устройство представляет собой цилиндр, в центральной части которого расположен заряд твердого топлива в виде гранул. Периферийная часть цилиндра содержит распыляемый мелкодисперсный порошок пламегасителя. Между центральной и периферийной частями имеется перегородка, не оказывающая заметного гидродинамического сопротивления движению газа. Верхняя и нижняя крышки цилиндра непроницаемы и неподвижны, так что движение частиц в нем под воздействием газообразных высокотемпературных продуктов сгорания высокого давления происходит только в радиальном направлении. Тем самым в течение короткого времени (50...100 мс) осуществляются генерация и транспорт облака ПГВ аэрозоля высокой плотности в зону горения, что не удастся сделать с помощью традиционных средств пожаротушения.

При работе газогенератора происходит компактирование частиц, а после их выхода

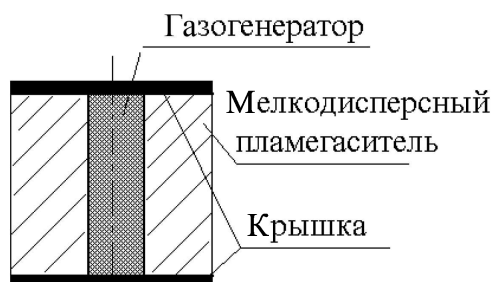


Рис. 1. Схема устройства

из цилиндра под воздействием истекающего газа начинается процесс формирования облака частиц. Возникающая при этом баллистическая волна низкой интенсивности сбивает пламя, а также распыляет и диспергирует пламегаситель, который в виде аэрозольного облака доставляется в зону горения. При испарении частиц пламегасителя из-за поглощения ими тепла температура газовой фазы в зоне облака частиц понижается и, кроме того, происходит вытеснение кислорода воздуха от очага горения, так как продукты сгорания твердотопливного газогенератора его не содержат.

Сочетание указанных выше факторов (действие баллистической волны, охлаждение газа в зоне облака частиц, вытеснение из этой зоны кислорода воздуха, наличие паров ПГВ) позволяет тушить пожары различных типов, включая лесные. Предлагаемый метод тушения пожаров отличается взрывом, когда возникающая ударная волна вызывает довольно сильные разрушения, но эти методы не применимы для тушения пожаров в производственных помещениях. Кроме того, он имеет еще одно важное преимущество – для тушения лесных пожаров устройства подобного типа можно сбрасывать с вертолетов или метать любыми способами как на кромку пожара, так и внутрь очага, где происходит их срабатывание. При этом тушение пламени происходит не только на передней кромке пожара (что характерно для традиционных способов тушения с помощью огнетушителей или брандспойтов), но также и внутри очага пламени.

По-видимому, наиболее эффективным будет кассетное применение ИАСП, поскольку при этом охватывается большая площадь горящих материалов, в результате чего пожар можно быстрее локализовать и потушить. Также следует отметить постоянную готовность такого устройства к действию, малое время срабатывания, простоту использования и доставки. Средства пожаротушения на основе ИАСП могут найти применение не только при тушении лесных пожаров, но и на транспорте, для защиты производственных и жилых помещений, а также для защиты от пожаров различных важных объектов (включая стратегические).

Заметим, что такого рода устройства могут применяться кроме ИАСП также для быстрого распыления различных сорбентов и порошков при химической обработке больших площадей и во многих других практических приложениях.

1. Описание модели и основные уравнения

Продукты сгорания топливных гранул в момент выхода “пробки” насыпного материала из цилиндра имеют давление 10...15 МПа, их истечение в окружающую среду происходит в сверхзвуковом режиме, и при описании их движения необходимо учитывать турбулентный характер течения. Поэтому в данной работе для моделирования процессов формирования и движения облака мелкодисперсных частиц ПГВ использовалась осредненная по Фавру система уравнений Навье—Стокса, замыкаемая $q - \omega$ -моделью турбулентности [1]. Описание движения полидисперсной второй фазы проводилось в рамках стохастического подхода [2], учитывающего влияние турбулентной природы поля течения несущего газа на движение частиц.

При описании математической модели рассматриваемых процессов были приняты следующие допущения:

— течение является турбулентным, двухфазным, осесимметричным, нестационарным и многокомпонентным. Истечение происходит в неподвижную атмосферу стандартного состава с высокой температурой;

— продукты сгорания газогенератора представляют собой инертный газ;

— частицы ПГВ являются полидисперсными, имеют сферическую форму и состоят из N фракций, внутри каждой из которых частицы одинакового размера. Столкновениями между частицами на данном этапе моделирования пренебрегается;

— распределение температуры по объему частицы полагается однородным;

— при нагреве частицы до определенной температуры начинается ее испарение, линейная скорость которого r_p предполагается заданной;

— газоприход от гранул твердого топлива и от частиц при их испарении моделируется источниковыми членами в уравнениях сохранения массы и энергии;

— химические реакции в среде не рассматриваются, учитывается только смешение компонентов.

Система уравнений, описывающая такое течение в цилиндрических координатах, имеет следующий вид:

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

$$\frac{\partial \rho Y_{\text{O}_2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_{\text{O}_2} + q_{x, \text{O}_2}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(\rho v Y_{\text{O}_2} + q_{r, \text{O}_2}) = 0; \quad (2)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$p = \rho T R_0 \left(\frac{Y_{\text{O}_2}}{M_{\text{O}_2}} + \frac{Y_{\text{N}_2}}{M_{\text{N}_2}} + \frac{Y_M}{M_M} + \frac{Y_P}{M_P} \right); \quad Y_{\text{O}_2} + Y_{\text{N}_2} + Y_M + Y_P = 1. \quad (10)$$

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

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

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

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

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

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i, \quad \frac{dy_i}{dt} = v_i. \quad (15)$$

Здесь $q = \sqrt{k}$ и $\omega = \varepsilon/k$ — “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 и 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; Nu и Re — числа Нуссельта и Рейнольдса соответственно.

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

Константы, входящие в описание модели турбулентности, имели такие значения:

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

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

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \quad \lambda_e = \lambda + \lambda_t, \quad \lambda_t = \frac{\mu_t C_p}{\text{Pr}_t},$$

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r}, \quad S = (u_{i,j} + u_{j,i}) u_{i,j} - \frac{2}{3 u_{k,k}^2},$$

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

k — O₂, N₂, M; P — пламягасящее вещество; члены в угловых скобках означают осреднение по объему ячейки разностной сетки; n_i — концентрация частиц i -й фракции в ячейке в данный момент времени;

$$C_{Di} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_{p,i}} \left(1 + \frac{\text{Re}_{p,i}^{2/3}}{6} \right), & \text{если } \text{Re}_{p,i} \leq 10^3, \\ 0.44, & \text{если } \text{Re}_{p,i} > 10^3, \end{cases} \quad \text{Re}_{p,i} = \frac{d_i \rho |\mathbf{v} - \mathbf{v}_i|}{\mu}. \quad (16)$$

Здесь u' и v' — компоненты случайного вектора возмущения скорости газа $\mathbf{v}' = (u', v')$; $\mathbf{v}' = \sqrt{\frac{2k}{3}} \operatorname{erfc}^{-1}(N_r) \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|}$; \mathbf{v} — вектор осредненной скорости; N_r — случайное число из диапазона $[-1, +1]$; $\operatorname{erfc}^{-1}(\cdot)$ — обратная функция ошибок; C_i — удельная теплоемкость i -й частицы, x_i и y_i — ее координаты.

Для расчета течения несущего газа применялась противопотоковая LU разностная схема второго порядка точности, обладающая TVD-свойствами, близкая к схеме из работы [3]. Расчет движения частиц проводился с помощью А-устойчивой разностной схемы также второго порядка точности [4]. Область решения системы уравнений (1)–(8) снизу ограничивалась непроницаемой поверхностью (подстилающая поверхность, ось OY направлена горизонтально, ось OX — вертикально), слева — осью симметрии течения, справа и сверху не ограничивалась ничем (безграничное пространство). Граничные условия для несущего газа задавались следующим образом. На оси OX принимались условия симметрии течения, на поверхностях крышек цилиндра и на подстилающей поверхности — условия прилипания, на остальных границах — неотражающие граничные условия. Для системы (9)–(14) на подстилающей поверхности задавались условия неупругого отражения

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

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, а символ “−” — к отраженной частицам; Θ — угол падения.

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

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

где ρ_{gr} , S и 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.

2. Некоторые результаты расчетов

Расчеты проводились при следующих исходных условиях: диаметр цилиндра ИАПС равен 0.33 м; высота цилиндра 0.2 м; масса частиц ПГВ составляла 10 кг; скорость испарения частиц $r_p = 10$ мм/с; число фракций равнялось десяти; их среднемассовый размер $d_{43} = 30$ мкм; температура испарения частиц ПГВ $T_{\text{исп}} = 400$ К. Заряд гранулированного твердого топлива газогенератора имел массу 0.1 кг; теплотворность топлива $Q_{\text{gen}} = 1780$ кДж/кг. Температура окружающей среды $T_0 = 800$ К. Расстояние от нижней крышки цилиндра ИАСП до подстилающей поверхности в первом варианте расчета составляло $h = 1$ м и $h = 0.1$ м — во втором.

На рис. 2 показаны структура поля течения и положение частиц ПГВ в момент времени $t = 10$ мс. Распределение температуры свидетельствует о ее понижении в области, занятой частицами ПГВ, из-за поглощения тепла частицами, начальная температура которых 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. 3).

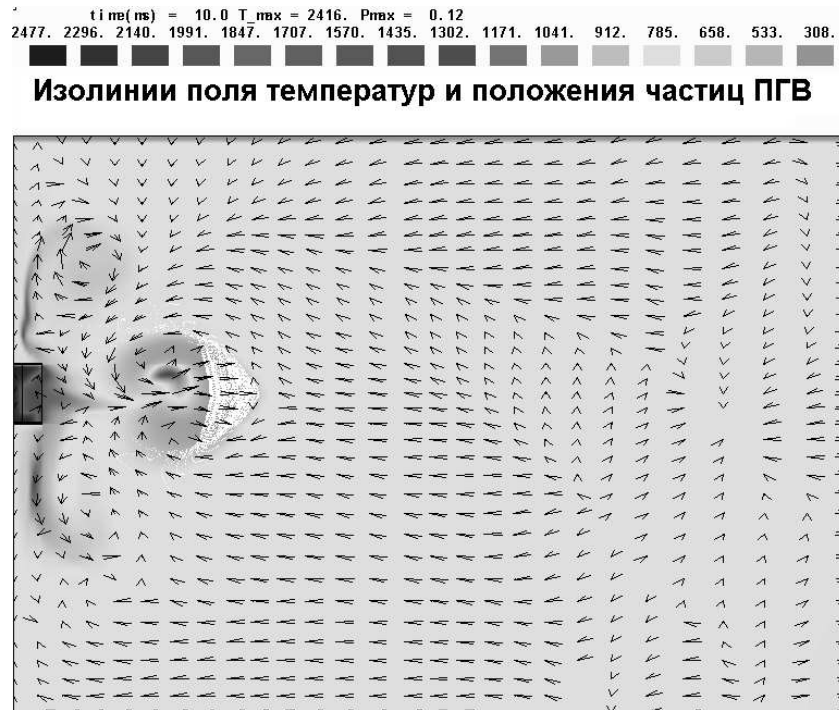


Рис. 2. Поле течения при $h = 1$ м ($t = 10$ мкс)

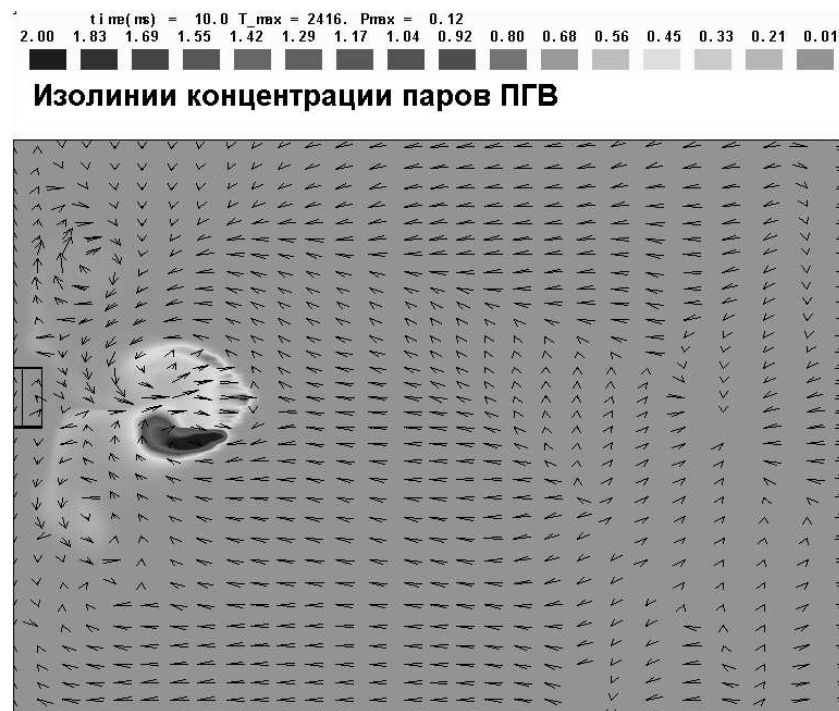
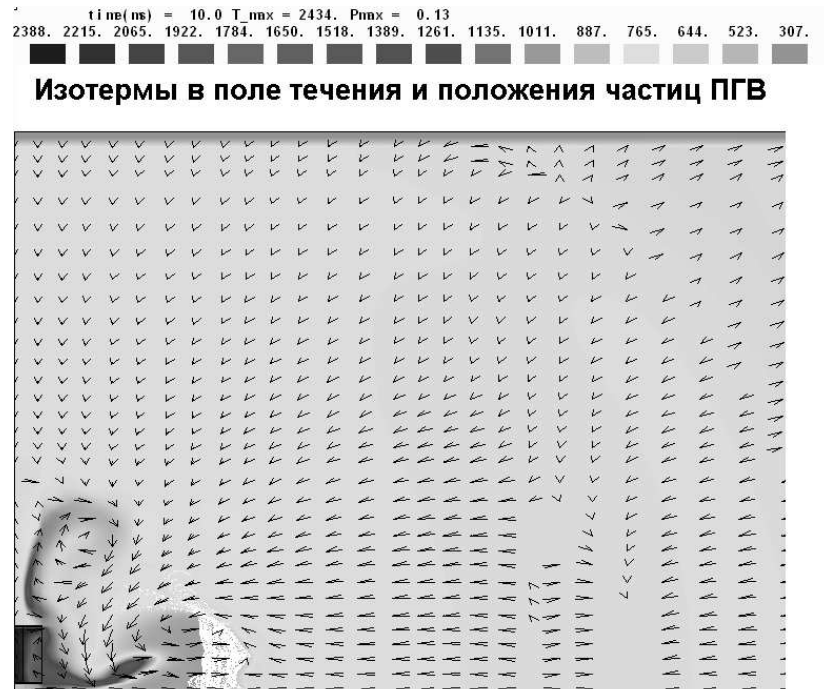
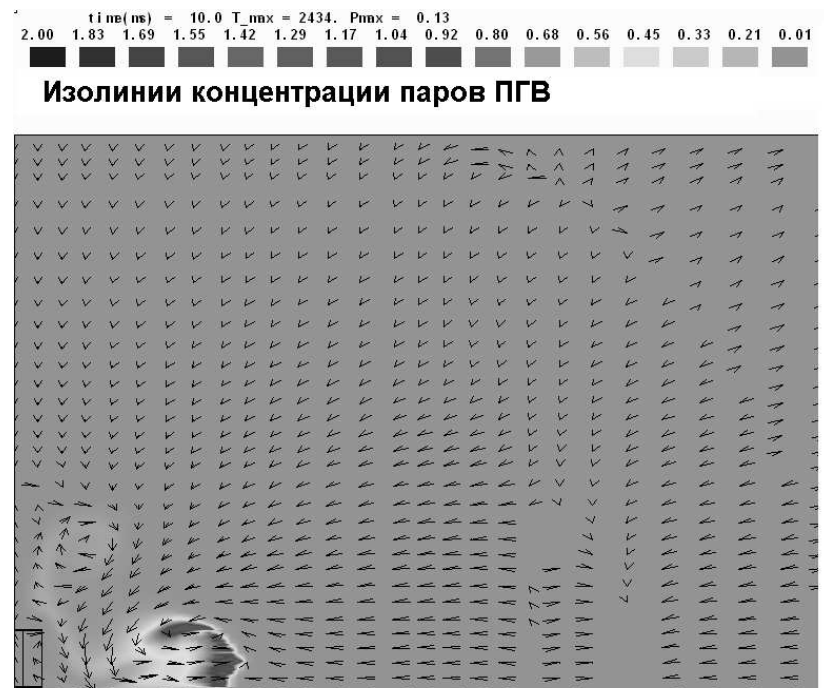


Рис. 3. Концентрации паров ПГВ ($t = 10$ мкс)

Рис. 4. Поле течения при $h = 0.1$ м ($t = 10$ мс)Рис. 5. Концентрация паров ПГВ ($t = 10$ мс)

Аналогичная картина приведена на рис. 4 и 5 для случая, когда ИАСП расположено вблизи подстилающей поверхности. И в этом случае 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] COAKLEY T.J. Turbulence modeling for high speed flows // AIAA Paper. 1992. 92-0436.
- [2] CROW C.T. Review – numerical models for dilute gas-particles flows // Trans. of ASME J. of Fluid Eng. 1982. Vol. 104. P. 297-303.
- [3] YOON S., JAMESON A. An LU-SSOR scheme for the Euler and Navier-Stokes equations // AIAA Paper. 1987. 87-600.
- [4] РЫЧКОВ А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.