

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Анищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы. – М.: Наука, 1985. – 172 с.
3. Крайнов А.В., Швалова Г.В. Основы теплоэнергетики. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 164 с.
4. Логинов В.С., Крайнов А.В., Юхнов В.Е., Феоктистов Д.В., Шабунина О.С. Примеры и задачи по теплообмену. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 256 с.
5. Рассохин Н.Г., Локтионов В.В., Мухтаров Э.С., Орлов В.Е., Молодых К.Е., Ярошенко Н.И. Особенности поведения корпуса реактора ВВЭР-1000 в условиях тяжёлой аварии // Труды II Российской нац. конф. по теплообмену: Пленарные и общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т. 1. – С. 153–158.
6. Гаврилов П.М., Цыганов А.А. Теплообмен и внутренняя самозащищённость ядерных реакторов // Труды II Российской нац. конф. по теплообмену: Пленарные и общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т. 1. – С. 147–152.
7. Krainov A.V., Shvalova G.V. Heating plants and systems. – Tomsk: TPU Publishing House, 2012. – 115 с.
8. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
9. Кузнецов Г.В., Крайнов А.В. Исследование сопряжённого теплообмена и гидродинамики при движении вязкой несжимаемой жидкости в каверне прямоугольного типа // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 5. – С. 136–142.
10. Ши Д. Численные методы для решения задач теплообмена. – М.: Наука, 1988. – 544 с.

Поступила 22.01.2013 г.

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ РАСПЫЛЕНИЯ ВОДЫ НА ТЕМПЕРАТУРУ В СЛЕДЕ «ВОДЯНОГО СНАРЯДА»

О.В. Высокоморная, А.О. Марков*, М.Н. Назаров**, П.А. Стрижак, С.Р. Янов

Томский политехнический университет

*ЗАО «Сибирский энергетический научно-технический центр», г. Красноярск

**Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: pavelspa@tpu.ru

С использованием нескольких моделей «водяных снарядов» малых размеров выполнено численное исследование макроскопических закономерностей испарения монодисперсной совокупности капель тонкораспыленной воды при прохождении через высокотемпературные продукты сгорания. Установлены зависимости интегральных характеристик теплопереноса от отношения площадей испарения и площадей, занимаемых «водяным снарядом». Определены условия распыления воды для эффективного снижения температуры в зоне горения.

Ключевые слова:

Высокотемпературные газы, продукты сгорания, испарение, капли воды, моделирование.

Key words:

High temperature gases, combustion products, evaporation, water drops, simulation.

Задачи разработки флегматизаторов горения и расчета параметров их оптимального распыления в зоне горения актуальны в связи со статистическими данными [1] по возрастающим материальным потерям, сопровождающим пожары различной степени сложности (особенно лесные). В таких условиях важную роль играют результаты научных исследований в направлении совершенствования существующих технологий тушения и создания новых. Одной из наиболее перспективных можно считать технологию тушения пожаров тонкораспыленной водой [2–5]. Однако до настоящего времени физические и теоретические основы этой технологии не разработаны в полной мере. Во многом это можно объяснить отсутствием результатов фундаментальных исследований макроскопических закономерностей взаимодействия

тонкораспыленной воды с высокотемпературными продуктами сгорания [4, 5].

Для решения этой проблемы в последние годы выполнен цикл численных исследований процессов теплопереноса и фазовых переходов при движении одиночной капли [6, 7], «тандема» [8] и группы из четырех [9] и пяти [10] капель тонкораспыленной воды через высокотемпературные продукты сгорания. Определены зависимости времен испарения (существования) капель от температуры продуктов сгорания, скорости движения, размеров и расстояния между каплями для нескольких систем «водяной снаряд–пламя» [6–10]. Проанализированы условия движения капель в струях тушащей жидкости [11]. Представляет интерес анализ условий распыления воды для эффективного снижения температуры в следе «водяного снаряда».

Цель работы – численное исследование влияния условий распыления «водяного снаряда» на температуру в следе его движения.

Результаты ранее выполненных исследований [6–11] показывают, что основные закономерности движения «водяного снаряда» через высокотемпературные газы можно рассмотреть на примерах двух движущихся последовательно капель (рис. 1, а), двух капель, движущихся параллельно на заданном удалении (рис. 1, б), и пяти капель (рис. 1, в). Установлено [8–11], что если расстояние между каплями больше некоторого предельного (L_n^*), то их «совместное» влияние на температуру газов и концентрацию водяных паров в следе «снаряда» будет незначительным. Поэтому при постановке задачи (рис. 1) принималось, что капли движутся со скоростью V_d на некотором расстоянии друг от друга $L_n < L_n^*$. При записи уравнений, описывающих движение «водяного снаряда», учитывалось влияние сил тяжести капель и сопротивления высокотемпературной газовой среды. Исследования выполнены для продуктов сгорания типичного жидкого (представляющего наиболее пожаровзрывоопасную

группу [1]) топлива – керосина. Начальная температура капель T_0 принималась много меньше температуры газовой среды T_r . Считалось, что при движении через газы капли прогреваются за счет теплопроводности и испаряются. Пары воды вдуваются в пристенную область капли и смешиваются с продуктами сгорания. Температура газов в непосредственной близости от траектории движения капель снижается. В условиях интенсивного парообразования размеры капель уменьшаются. Через некоторое время возможно их полное испарение.

Допущения, принятые при численном моделировании в рассматриваемых системах (рис. 1), аналогичны постановкам [6–11].

Важно отметить, что решение сформулированных выше задач в пространственных постановках представляет достаточно длительные вычислительные процедуры. Результаты решения таких пространственных задач применительно к условиям реальных пожаров пока не опубликовано. Этим обусловлен переход к плоским постановкам задач тепломассопереноса, аналогичным [6–11].

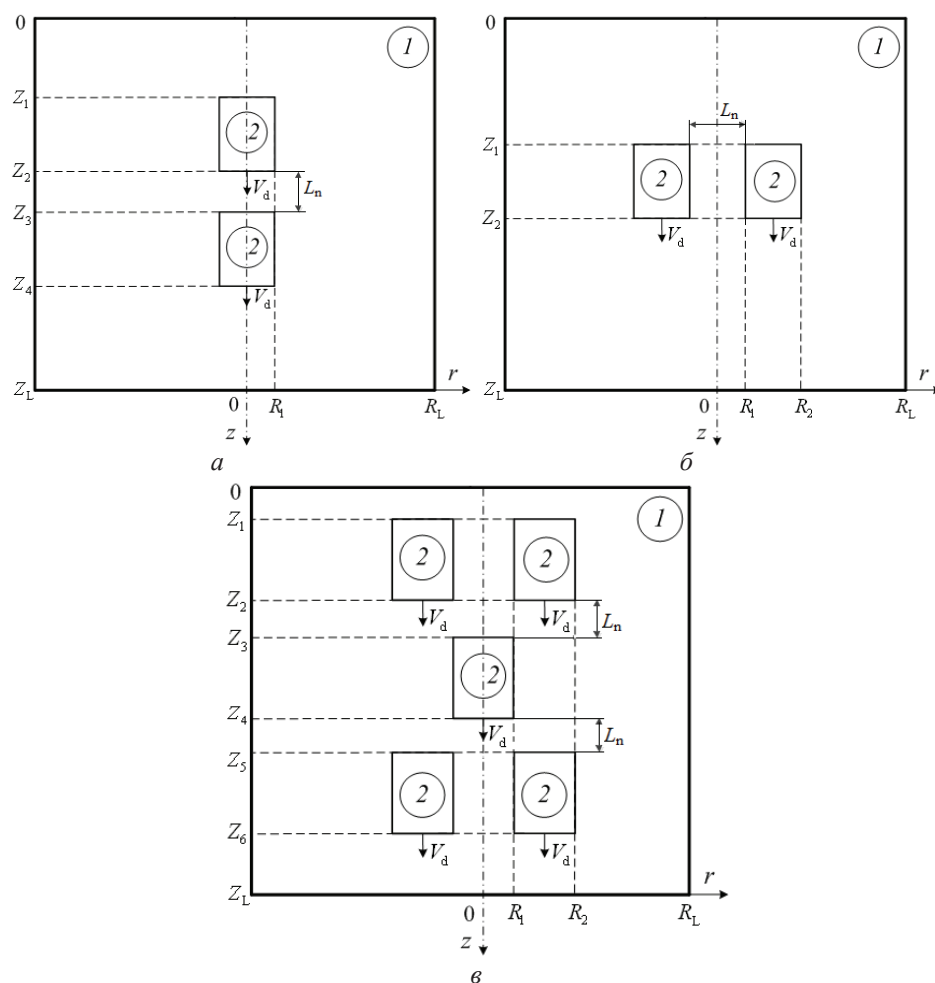


Рис. 1. Схема области решения задачи для двух капель, движущихся последовательно (а), двух, движущихся параллельно (б), пяти капель (в): 1 – высокотемпературная газовая смесь, 2 – капли воды

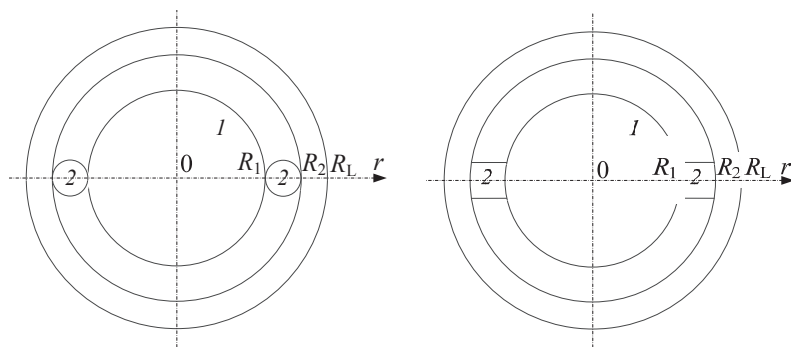


Рис. 2. Возможные представления поперечных сечений «снаряда» для системы с двумя каплями: 1 – высокотемпературные газы, 2 – капли

На рис. 2 показано несколько интерпретаций поперечных сечений в рассматриваемом «водяном снаряде» (капли приведены в форме сфер и некоторых кольцевых сегментов).

При решении плоских задач тепломассопереноса их геометрии будут соответствовать моделям, приведенным на рис. 1. Поэтому в первом приближении при описании процессов тепломассопереноса в «водяном снаряде» можно использовать рассматриваемые осесимметричные постановки.

Математические модели, соответствующие постановкам задач тепломассопереноса (рис. 1), включают системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных [6–11], сформулированные в соответствии с основными положениями математической физики [12–14]. Так, например, для модели, приведенной на рис. 1, а, система уравнений в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

$$0 < r < R_L, 0 < z < Z_1, Z_2 < z < Z_3, Z_4 < z < Z_4;$$

$$R_1 < r < R_L, Z_1 < z < Z_2, Z_3 < z < Z_4;$$

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \left[\frac{\partial T_1^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial T_1^2}{\partial z^2} \right],$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial \tau} = D_3 \left[\frac{\partial C_w^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_w}{\partial r} + \frac{\partial C_w^2}{\partial z^2} \right], C_f + C_w = 1;$$

$$0 < r < R_1, Z_1 < z < Z_2, Z_3 < z < Z_4;$$

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \left[\frac{\partial T_2^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial T_2^2}{\partial z^2} \right].$$

Здесь τ – время, с; τ_d – время полного испарения каплей, с; r, z – координаты цилиндрической системы, м; R_L, Z_L – размеры области решения, м; C – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); C_w – концентрация паров воды; D – коэффициент диффузии, м²/с; C_f – концентрация продуктов сгорания; индексы 1, 2, 3 соответствуют продуктам сгорания, каплям воды, парам воды.

Начальные ($\tau=0$) условия (рис. 1, а): $T=T_0$ при $0 < r < R_1, Z_1 < z < Z_2, Z_3 < z < Z_4; T=T_1, C_f=1, C_w=0$ при $0 < r < R_L, 0 < z < Z_1, Z_2 < z < Z_3, Z_4 < z < Z_L; R_1 < r < R_L, Z_1 < z < Z_2, Z_3 < z < Z_4.$

Граничные условия: на границах «жидкость–высокотемпературная газовая среда» ($r=R_1, Z_1 < z < Z_2, Z_3 < z < Z_4; z=Z_1, z=Z_2, z=Z_3, z=Z_4, 0 < r < R_1$) принимались граничные условия IV рода для уравнений энергии с учетом парообразования, для уравнения диффузии задавались граничные условия II рода с учетом вдува паров воды; на оси симметрии ($r=0, 0 < z < Z_1$) и внешних границах ($r=R_L, 0 < z < Z_L; z=0, z=Z_L, 0 < r < R_1$) для всех уравнений принималось условие равенства нулю градиентов соответствующих функций.

Уравнение движения капель в условиях парообразования с учетом действия сил сопротивления и тяжести имеет следующий вид [15]:

$$\frac{dV_d}{d\tau} = \frac{3\rho_3}{4\rho_2 2R_d} c_\chi |V_d - V_e| (V_d - V_e) + g,$$

где V_d – скорость движения капель, м/с; c_χ – безразмерный коэффициент сопротивления движению капель; V_e – линейная скорость паров воды вблизи торцевых поверхностей капель, м/с; R_d – радиус каплей, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Безразмерный коэффициент сопротивления c_χ , зависящий в общем случае от конфигурации поверхности тела и его положения относительно направления движения обтекающего потока, определялся согласно [15].

Для вычисления массовой скорости испарения каплей воды использовалось следующее выражение [16]:

$$W_e = \frac{\beta}{1 - k_\beta \beta} \frac{(P^n - P)}{\sqrt{2\pi R_L T_e / M}},$$

где β – безразмерный коэффициент конденсации (испарения); k_β – безразмерный коэффициент ($k_\beta \approx 0,4$ [17]); P^n – давление насыщенных паров воды, Н/м²; P – давление паров воды вблизи границ испарения, Н/м²; M – молекулярная масса воды, кг/кмоль; T_e – температура капли вблизи границы испарения, К.

Для вычисления давления паров воды использовалось уравнение Клапейрона–Менделеева [12].

Толщина испаряющегося слоя капли определялась по формуле [16]: $L_e = \frac{W_e \tau}{\rho_2}.$

Системы дифференциальных уравнений для рассматриваемых постановок (рис. 1) решались методом конечных разностей [18]. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решались локально-одномерным методом [18]. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [18]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений с нелинейными граничными условиями применялся метод простых итераций [19]. Для повышения точности решения системы дифференциальных уравнений использовались неравномерные шаги по времени (10^{-6} – 10^{-4} с) и координатной сетке (0,001...0,1 мм). Вблизи границ фазового перехода разностная сетка сгущалась.

Методика оценки достоверности результатов выполненных теоретических исследований, основанная на проверке консервативности применяемой разностной схемы, аналогична используемой в [20–23].

Численные исследования выполнены при следующих типичных для практики значениях параметров [15, 17, 24–27]: начальная температура капель воды $T_0=300$ К; температура продуктов сгорания $T_f=1170$ К; тепловой эффект испарения воды $Q_c=2,26$ МДж/кг; размеры капель $R_d=0,25$ мм, $Z_d=1$ мм; расстояние между каплями $L_n=0,01$ – 5 мм; размеры области решения $R_l=0,1$ м, $Z_l=2$ м; молекулярная масса воды $M=18$ кг/кмоль; коэффициент сопротивления движению $c_z=0,98$; безразмерный коэффициент конденсации (испарения) $\beta=0,1$. Теплофизические характеристики взаимодействующих веществ (капель воды, продуктов сгорания жидкого топлива, паров воды) приведены в [24–27].

Для анализа влияния распределения капель жидкости в «водяном снаряде» на температуру в следе его движения рассмотрены изотермы, полученные ранее [6–11] для систем, приведенных

на рис. 1. В качестве характеристики процесса выбрана температура [6–11] в следе «водяного снаряда» на расстоянии от последней капли, равном пяти ее продольным размерам ($L^*=5Z_d$). Так, например, на рис. 2 приведены изотермы для системы с двумя движущимися параллельно (рис. 1, б) на расстоянии $L_n=0,3$ мм друг от друга каплями и выделено сечение L^* . Характерный вид изотерм в окрестности оси симметрии при некотором увеличении (рис. 3) иллюстрирует выполнение сформулированных выше граничных условий (равенство нулю градиентов соответствующих функций).

Выполнен анализ распределения температуры газопаровой смеси в следе «снаряда» в сечении L^* (рис. 3). Следует отметить, что аналогичный анализ можно выполнить для изолиний концентраций водяных паров C_w и продуктов сгорания C_f , приведенных в [6–11]. Однако больший интерес представляет исследование изотерм. Это обусловлено тем, что согласно представлениям классической теории диффузии и теплопередачи в химической кинетике [14] температура в зоне реакции играет определяющую роль. Зависимость скорости реакции окисления от температуры – экспоненциальная, а от концентрации – степенная [14]. В таких условиях при тушении пожаров и возгораний целесообразно, в первую очередь, снизить температуру в зоне реакции до предельной, при которой рассматриваемая реакция затухает.

Для оценки эффективности снижения температуры в следе «снаряда» сформулированы два безразмерных параметра – T_1^* и S_1^* . Параметр T_1^* представляет отношение температуры в следе «водяного снаряда» (на расстоянии L^* от последней капли) T_z к начальной температуре продуктов сгорания T_f ($T_1^*=T_z/T_f$). Параметр S_1^* – это отношение площади испарения S_c к площади зоны (в форме цилиндра с высотой L^* и радиусом R^*) в следе «водяного снаряда» S_z ($S^*=S_c/S_z$), в которой температу-

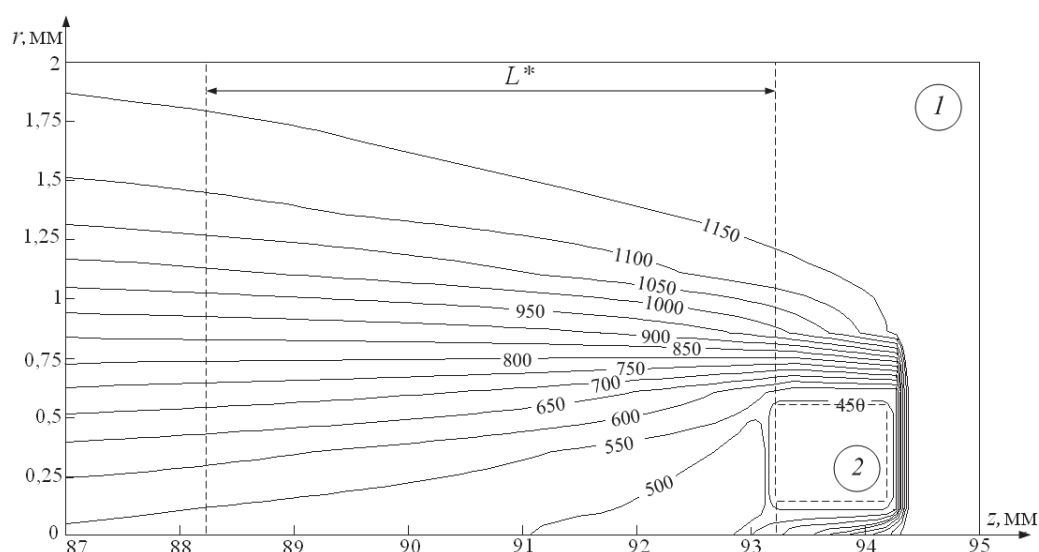


Рис. 3. Изотермы (T , К) в системе с двумя параллельно движущимися каплями при $\tau=0,1$ с, $L_n=0,3$ мм: 1 – высокотемпературная газовая смесь, 2 – капли воды

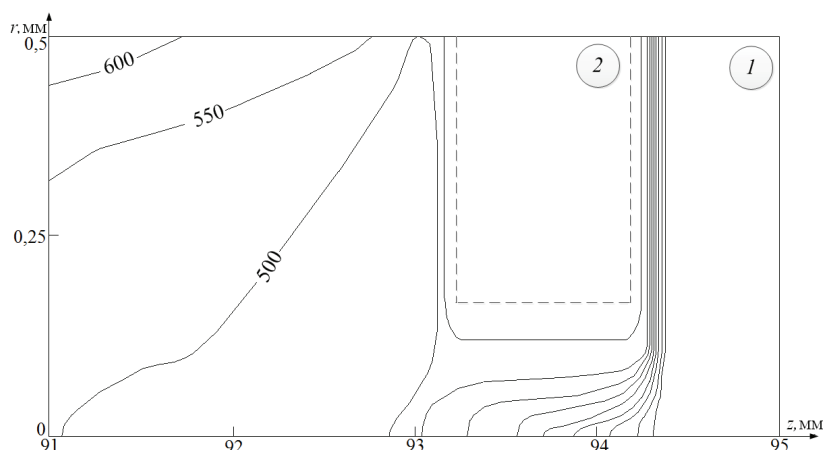


Рис. 4. Изотермы (T, K) в малой окрестности оси симметрии задачи при $\tau=0,1$ с, $L_n=0,3$ мм: 1 – высокотемпературная газовая смесь, 2 – капли воды

ра смеси газов и паров воды не превышает T_z . Так, например, на рис. 2 в следе капле показано характерное расстояние L^* от последней капли. Расстояния от оси симметрии ($r=0$) до точек пересечения линии L^* с изотермами представляют радиусы R^* зон в следе капле, в которых температуры не превышают значений, соответствующих пересеченным изотермам. Например, на рис. 2 в точке пересечения изотермы $T=800$ К и линии L^* определен радиус $R^*=0,72$ мм. Для этого радиуса рассчитывается соответствующее значение площади S_z (зоны в форме цилиндра с высотой $L^*=5Z_d$ и радиусом $R^*=0,72$ мм).

Для вычисления площадей S_c и S_z использовались соотношения:

$$S_c = \sum_{i=1}^n (2\pi R_{d_i} L_{d_i} + 2\pi R_{d_i}^2), \quad S_z = 2\pi R^* L^* + 2\pi R^{*2},$$

где i – номер капли; n – количество капель; R^* и L^* – характерные размеры области в следе капле с температурой $T \leq T_z$.

На рис. 5 приведены зависимости $T_1^*=f(S_1^*)$ для систем с двумя каплями, движущимися последовательно на расстоянии $L_n=5$ мм (рис. 1, а), двумя каплями, движущимися параллельно на расстоянии $L_n=0,3$ мм (рис. 1, б), и пятью каплями (рис. 1, в) при $L_n=2$ мм. Значения L_n выбраны исходя из результатов ранее [6–11] выполненных исследований, как наиболее типичные. При таких L_n «совместное» влияние капель на время существования «водяного снаряда» значительно [6–11]. Можно отметить достаточно существенно отличающиеся диапазоны изменения S_1^* (рис. 4) для рассматриваемых систем (рис. 1) при близких значениях L_n и равных размерах капель.

Для зависимостей $T_1^*=f(S_1^*)$, представленных на рис. 4, сформулирована группа аппроксимационных выражений ($0,1 < S_1^* < 0,4$):

- $T_1^*=3,698-14,282S_1^*+16,223S_1^{*2}$ – для двух движущихся последовательно капель (рис. 1, а);
- $T_1^*=1,069-3,257S_1^*+5,087S_1^{*2}$ – для двух движущихся параллельно капель (рис. 1, б);

- $T_1^*=9,289-48,793S_1^*+68,146S_1^{*2}$ – для пяти капель (рис. 1, в).

Выполненные численные исследования позволили установить (рис. 5), что наименьшие площади испарения S_c для обеспечения максимальных площадей S_z с температурой T_1^* в следе «водяного снаряда» соответствуют двум движущимся параллельно каплям (рис. 1, б). Максимальные значения S_c соответствуют системе с двумя последовательно перемещающимися каплями (рис. 1, а). Для пяти капель (рис. 1, в) характерны средние значения S_1^* (рис. 5).

Установленные особенности можно объяснить тем, что при использовании пяти капель характерный радиус R^* больше, чем для двух капель. Однако вместе с тем и суммарная площадь испарения для пяти капель S_c существенно больше, чем для двух. Как следствие, отношения S_1^* для системы с пятью каплями больше, чем для двух параллельно движущихся капель. В тоже время значения S_1^* для пяти капель меньше, чем для двух последовательно движущихся капель. Это можно объяснить тем, что для двух последовательно движущихся капель характерный размер (R^*) области с заданной температурой T_1^* существенно меньше, чем для систем, приведенных на рис. 1, б и в.

Для определения расстояний между каплями (рис. 1), оптимальных с точки зрения эффективного снижения температуры продуктов сгорания, выполнены численные исследования влияния параметров L_n на температуру газов в следе капле. Для системы с двумя параллельно движущимися каплями (рис. 1, б) параметр L_n варьировался в диапазоне от 0,01 до 0,6 мм. В случае двух последовательно движущихся (рис. 1, а) и пяти (рис. 1, в) капель диапазон варьирования этого параметра составил $L_n=0,01...5$ мм. На рис. 6 приведены зависимости $T_2^*=f(S_2^*)$ для рассматриваемых систем (рис. 1).

Параметр T_2^* представляет отношение температуры в следе капли на расстоянии L^* от последней капли (на оси симметрии – $r=0$) к температуре T_f . Параметр S_2^* используется для иллюстрации отно-

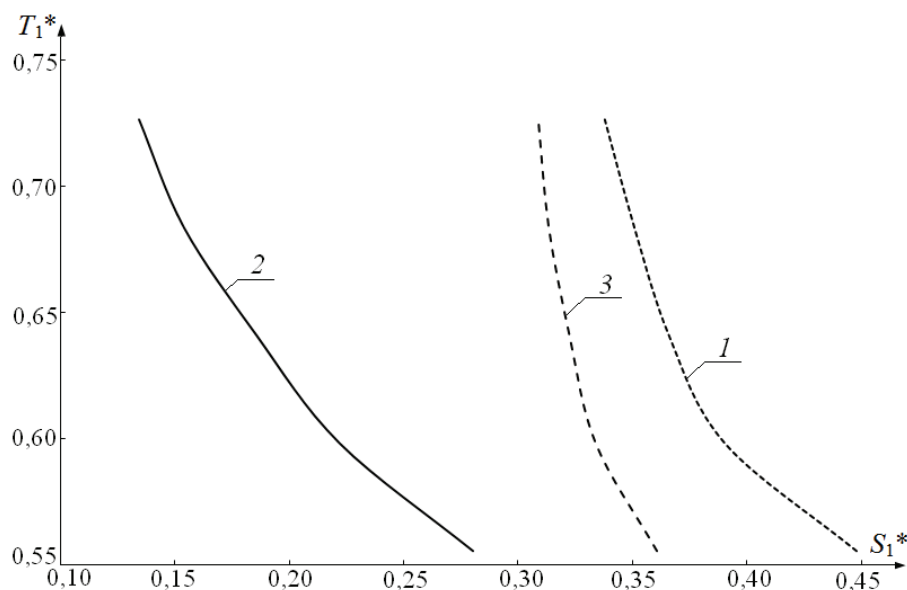


Рис. 5. Зависимости параметра T_1^* от S_1^* при $\tau=0,1$ с: 1 – две движущиеся последовательно капли, 2 – две движущиеся параллельно капли, 3 – пять капель

шения площади испарения «водяного снаряда» S_c к занимаемой им площади S_w (характеризует плотность распределения капель в «водяном снаряде»). Для приведенных на рис. 1 постановок задач теплопереноса площади S_w можно определить по формулам: $S_w=2\pi R_1(2L_d+L_n)+2\pi R_1^2$ – система с двумя последовательно движущимися каплями (рис. 1, а); $S_w=2\pi R_2L_d+2\pi R_2^2$ – система с двумя параллельно движущимися каплями (рис. 1, б); $S_w=2\pi R_2(3L_d+2L_n)+2\pi R_2^2$ – система с пятью каплями (рис. 1, в).

Для зависимостей $T_2^*=f(S_2^*)$, приведенных на рис. 6, сформулированы следующие аппроксимационные выражения ($0,3 < S_2^* < 0,9$):

- $T_2^*=0,644-0,507S_2^*+0,291S_2^{*2}$ – для двух движущихся последовательно капель (рис. 1, а);
- $T_2^*=1,444-2,781S_2^*+1,894S_2^{*2}$ – для двух движущихся параллельно капель (рис. 1, б);
- $T_2^*=0,648-0,428S_2^*+0,255S_2^{*2}$ – для пяти капель (рис. 1, в).

Установленные зависимости $T_2^*=f(S_2^*)$ показывают, как при снижении плотности распределения капель воды (уменьшении S_2^*) температура в следе «водяного снаряда» возрастает. При этом в случае достаточно больших значений характерных удалений L_n (для двух параллельно движущихся капель при $L_n > 2R_d$) температура в следе несущественно снижается относительно T_f (рис. 6).

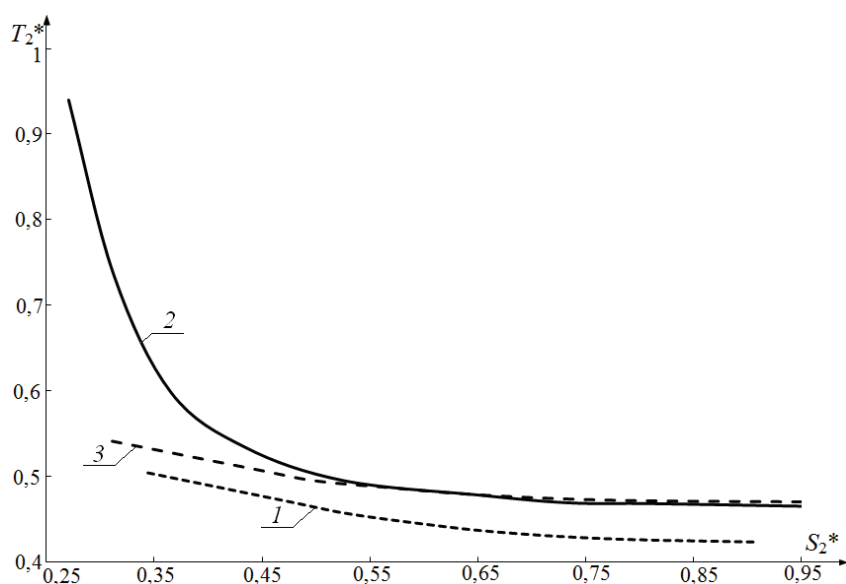


Рис. 6. Зависимости параметра T_2^* от S_2^* при $\tau=0,1$ с: 1 – две движущиеся последовательно капли, 2 – две движущиеся параллельно капли, 3 – пять капель

При повышении S_2^* вне зависимости от геометрии расположения капель относительно друг друга температура в следе «водяного снаряда» существенно снижается относительно T_f (рис. 6). Это особенно хорошо видно на примере системы с двумя параллельно движущимися каплями (кривая 2).

При превышении параметром S_2^* значения 0,5 отклонения T_2^* для кривых 2 и 3 не превышают 3%. Дальнейший рост S_2^* не приводит к заметному изменению T_2^* (рис. 6). Установленная закономерность позволяет сделать вывод о том, что при распылении «водяного снаряда» с обеспечением значения параметра S_2^* не меньше 0,5 могут быть достигнуты условия, достаточные для снижения температуры в зоне горения без дальнейшего повышения S_2^* .

В тоже время важно отметить, что для систем с двумя последовательно движущимися каплями (рис. 1, а) и пятью каплями (рис. 1, в) изменения значений T_2^* с ростом S_2^* не так существенны, как для двух параллельно движущихся капель (рис. 1, б). Этот результат показывает, что на линиях, соответствующих траекториям движения капель, температура в следе снижается не так значительно при уменьшении L_n , как в окрестности этих линий. Это достаточно хорошо показано в работах [6–11] и видно, в частности, на рис. 2.

Установленные зависимости $T_1^*=f(S_1^*)$ и $T_2^*=f(S_2^*)$ показывают, что для снижения температуры в зоне горения (не только на оси симметрии $r=0$ или внешнем контуре тела вращения с радиусом $r=R^*$) целесообразно, скорее всего, фрагментарное распыление флегматизатора. На рис. 5 показано, что наименьшие температуры T_1^* в следе «снаряда» при малых значениях S_1^* соответствуют системе с двумя параллельно движущимися капля-

ми. На рис. 6 видно, что минимальные значения температуры T_2^* в следе «снаряда» при варьировании S_2^* в достаточно широких диапазонах зафиксированы для двух последовательно движущихся капель. Можно сделать вывод о том, что для увеличения размеров зоны в следе «водяного снаряда», в которой температура может быть снижена относительно T_f до некоторой заданной, необходимо применение «снарядов» с последовательно-параллельной (фрагментарной) системой распыления (например, как показано на рис. 1, в).

Выводы

Результаты выполненных численных исследований показали, что плотность распределения капель в «водяном снаряде» играет определяющую роль в процессе испарения типичного флегматизатора горения – воды, и его воздействия на температуру в зоне горения. Показано, что при повышении этой плотности до максимально возможных значений возрастает масса воды, неиспарившейся (неэффективно использованной) при движении через высокотемпературные продукты сгорания. При понижении плотности распределения капель в «водяном снаряде» температура в зоне горения снижается незначительно относительно температуры пожара. Поэтому целесообразно применение распыленных флегматизаторов горения, в которых плотность распределения капель в «водяном снаряде» должна определяться исходя из требуемой длины его пути и характерных размеров очага горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, мероприятие 1.4, соглашение № 14.В37.21.2071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акинин Н.И., Булхов Н.Н., Герш В.А. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 10. – С. 53–55.
- Карпышев А.В., Душкин А.Л., Рязанцев Н.Н. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 2. – С. 69–73.
- Гаев Д.В., Ершов А.В., Прохоров В.П., Карпышев А.В., Душкин А.Л. Система противопожарной защиты салона вагона метрополитена на базе высоких технологий // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2009. – № 3. – С. 67–72.
- Душкин А.Л., Ловчинский С.Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 11. – С. 53–55.
- Душкин А.Л., Карпышев А.В., Ловчинский С.Е. Особенности распространения жидкостной струи в атмосфере // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 12. – С. 45–48.
- Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 5. – С. 74–78.
- Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование теплопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 12. – С. 531–538.
- Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 8. – С. 26–31.
- Волков Р.С., Высокоморная О.В., Стрижак П.А. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 74–79.
- Андреев Г.Г., Глушков Д.О., Панин В.Ф., Стрижак П.А. Теплоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Бутлеровские сообщения. – 2012. – № 8. – С. 86–94.
- Стрижак П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 9. – С. 17–23.
- Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979.
- Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984.
- Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 490 с.

15. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
16. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 391 с.
17. Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. – 1969. – № 5. – С. 959–967.
18. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
19. Коздoba Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 227 с.
20. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание накаливаемой одиночной частицей жидких углеводородных топлив // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 5–9.
21. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. – 2009. – № 5. – С. 42–50.
22. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle–liquid fuel interface on the ignition characteristics // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – № 2. – P. 162–167.
23. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – Iss. 5–6. – P. 923–930.
24. Варафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: ООО «Старс», 2006. – 720 с.
25. Теплофизический справочник: в 2 т. Т. 1 / под ред. В.Н. Юрнева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 743 с.
26. Теплофизический справочник: в 2 т. Т. 2 / под ред. В.Н. Юрнева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 896 с.
27. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. Ч. 1. – М.: Пожнаука, 2004. – 713 с.

Поступила 19.12.2012 г.

УДК 621.18

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

И.С. Ануфриев, Г.В. Кузнецов*, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов, Ю.А. Аникин, С.В. Двойнишников, Д.В. Куликов,
В.В. Рахманов

Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск

*Томский политехнический университет

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

Исследована структура изотермического закрученного течения в модели вихревой топки новой конструкции с горизонтальной осью вращения и распределенным тангенциальным вводом топливовоздушных струй с помощью метода цифровой трассерной визуализации. Измерены осредненные характеристики поля скорости в ряде сечений. Проанализированы особенности внутренней аэродинамики новой конструкции вихревой топки парогенератора при различных режимных параметрах.

Ключевые слова:

Турбулентные закрученные потоки, вихревая топка, тангенциальный ввод горелочных струй, метод цифровой трассерной визуализации, перспективное оборудование теплоэнергетики.

Key words:

Turbulent swirl flows, vortex furnace, tangential input of burner streams, particle image velocimetry, promising energy equipment.

При проектировании и разработке новых аппаратов и технологий теплоэнергетики ключевым этапом является физическое моделирование, которое позволяет при низких затратах изучить основные физические процессы в элементах энергетического оборудования с целью оптимизации конструктивных и режимных параметров разрабатываемых устройств [1, 2].

В данной работе исследуется вихревое топочное устройство новой конструкции с горизонтальной осью вращения и рассредоточенным по периметру тангенциальным вводом топливовоздушных струй (патент РФ № 2042084). Основными отличительными особенностями новой конструкции вихревой топки (по сравнению с известной топкой Н.В. Голванова [3]) является: дополнительный тангенциальный подвод топлива, расположенный в ни-

жней части камеры сгорания, и увеличенная ширина горловины диффузора. Наличие в исследуемой конструкции вихревой топки рассредоточенных по периметру (условной окружности камеры горения) горелочных струй, ориентированных в противоположном направлении, обеспечивает гибкость управления структурой течения и режимными параметрами, а горизонтальная ось вращения потока увеличивает полноту выгорания топлива.

Цель данной работы – экспериментальные исследования структуры закрученного течения в новой конструкции вихревой топки. Измерение аэродинамических характеристик пространственного турбулентного течения проводилось в изотермической лабораторной модели, изготовленной из оргстекла толщиной 10 мм (рис. 1, а). Основными эл-