

Р. С. ВОЛКОВ, младший научный сотрудник кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

Г. В. КУЗНЕЦОВ, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: elf@tpu.ru)

Е. Ю. КУРИЛЕНКО, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры строительной механики, Тюменский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2; e-mail: ksmeh@tgasu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ КАПЕЛЬ В ПАРОВОДЯНОМ ПОТОКЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ В ПЛАМЕННОЙ ЗОНЕ ГОРЕНИЯ

Проведено экспериментальное исследование макроскопических закономерностей влияния дисперсности капель жидкости (характеризуемой относительной концентрацией, размерами и расстояниями между ними) в пароводяном потоке на параметры их перемещения и испарения в пламенной зоне горения. Установлены характерные режимы коагуляции капель при движении через высокотемпературную пламенную зону. Выполнен анализ результатов экспериментов с использованием численного моделирования процессов тепломассопереноса и фазовых превращений. Определено влияние размеров, скоростей движения и дисперсности капель в парожидкостном потоке на температуру и концентрацию продуктов сгорания. Выделены специфические особенности движения капель воды в парожидкостном потоке через высокотемпературную газовую среду.

Ключевые слова: водяной пар; вода; капли; пароводяной поток; пламя; испарение; температура и концентрация продуктов сгорания.

Введение

Во многих современных технологиях пожаротушения, особенно опирающихся на применение капельных жидкостных потоков (например [1–8]), основное внимание уделяется, как правило, оптимальному выбору размеров капель и компонентов тушащего состава. Это, в первую очередь, обусловлено определяющим влиянием данных факторов на характеристики эндотермических фазовых превращений в зоне горения.

Теоретические [9–14] и экспериментальные [15–18] исследования позволили сформулировать основные положения теории тепломассопереноса и фазовых превращений при движении капель жидкостей (в том числе существенно неоднородного состава) через высокотемпературные газовые среды, соответствующие типичным пожарам. Установлены характерные масштабы влияния размеров, скоростей движения и состава жидкостей (воды и эмульсий на их

основе) на интегральные характеристики парообразования в зоне пламени [9–18]. Показано, что процессы движения сопровождаются эффектами дробления и коагуляции [18]. Это существенно затрудняет выбор оптимальных (с точки зрения ресурсоэффективности) параметров распыления тушащего жидкостного состава в реальной практике. При этом эффект дробления приводит в основном к интенсификации испарения, а коагуляция оказывает разностороннее влияние [18]. Представляет интерес экспериментальное и теоретическое исследование влияния дисперсности капель в пароводяном потоке на характеристики их перемещения и испарения в пламенной зоне горения с учетом возможных эффектов коагуляции.

Цель настоящей работы — исследование влияния дисперсности капель в пароводяном потоке на характеристики их перемещения и испарения в пламенной зоне горения.

Экспериментальный стенд и методы исследований

Исследования выполнены с применением стенда [15–18], схема которого приведена на рис. 1. Для регистрации результатов использовалась аппаратура: высокоскоростная видеокамера 1 с форматом изображения 1024×1024 пикселей, частотой кадров до 10^5 в секунду; кросскорреляционная видеокамера 2 с форматом изображения 2048×2048 пикселей, частотой кадров 1,5 Гц, минимальной задержкой между кадрами 5 мкс; двойной импульсный твердотельный лазер 3 с длиной волны 532 нм, минимальной энергией в импульсе 70 мДж, максимальной длительностью импульса 12 нс, частотой повторений 15 Гц; синхронизирующий процессор 4 с максимальной дискретизацией сигналов 10 нс.

По аналогии с экспериментами, описанными в [15–18], применялся полый цилиндрический канал 14 (высота 1 м, внутренний и внешний диаметры 0,3 и 0,306 м) из огнеупорного жаростойкого стекла для регистрации исследуемых процессов в условиях интенсивных фазовых превращений. В основании канала 14 устанавливался другой полый цилиндр 15 (высота 0,1 м, внутренний и внешний диаметры 0,26 и 0,3 м), в межстеночное пространство которого заливали керосин (около 250 мл) и зажигали его перед проведением опытов. С помощью нагнетательной

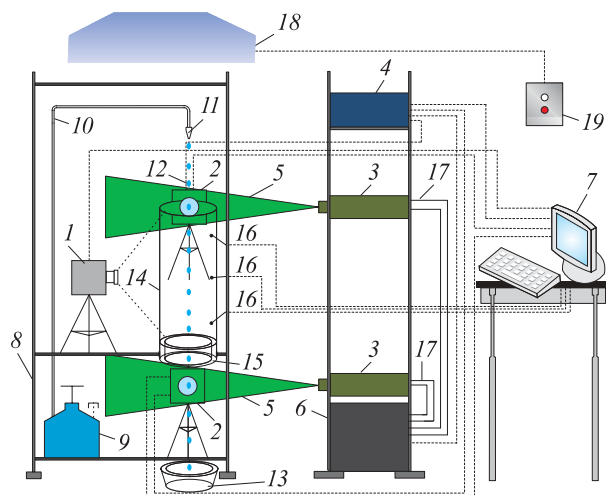


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — кросскорреляционная видеокамера; 3 — двойной твердотельный импульсный лазер; 4 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 — световой “нож”; 6 — генератор лазерного излучения; 7 — ПК; 8 — штатив; 9 — емкость с рабочей жидкостью; 10 — канал подачи рабочей жидкости; 11 — дозатор-распылитель; 12 — капли рабочей жидкости; 13 — уловитель; 14 — цилиндрический канал из жаростойкого светопрозрачного материала; 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью во внутреннем пространстве; 16 — термопары; 17 — канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 — нагнетательная система вентиляции; 19 — пульт включения/отключения нагнетательной системы вентиляции

системы вентиляции 18 в канале 14 изменялась скорость движения продуктов сгорания керосина в диапазоне $0,1 < U_g < 2,5$ м/с (где U_g — скорость газов). Температура газов в канале 14, контролируемая хромель-алюмелевыми термопарами 16 (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, погрешность измерения $\pm 3,3$ К), измерялась в трех точках по высоте канала (0,15; 0,50 и 0,85 м на оси его симметрии) и составляла (1070 ± 30) К. Для генерации капель жидкости использовался распылитель 11. Контролировались следующие параметры капель: относительная объемная концентрация — объем капель жидкости на единицу объема газа ($\gamma_m = 0,001 \div 0,0012$ м³/м³), размер (радиус) ($0,05 < R_m < 2,5$ мм) и скорость ($0,5 < U_m < 5$ м/с). Объемная концентрация капель жидкости в газовой среде выбиралась исходя из ограничений (по минимальному числу “трассеров” в регистрационных областях видеок кадров) оптических методов Particle Image Velocimetry (PIV) [19–21] и Interferometric Particle Imaging (IPI) [22–24]. В качестве “трассеров” использовались частицы нанопорошка диоксида титана, которые в количестве 0,5 % по массе вводились в воду для повышения контрастности видеogramм. При обработке результатов экспериментов [15] установлено, что ввод “трассирующих” частиц диоксида титана в такой концентрации несущественно влияет на характеристики испарения и движения капель воды в высокотемпературной газовой среде.

При проведении экспериментов отслеживалось перемещение капель в зоне пламени с определением их размеров. Радиус R_m принят в качестве характерного размера капель. При $R_m \leq 0,3$ мм и конфигурациях, несущественно отличающихся от сферической (амплитуды деформации менее 10 % от радиуса сферы), для определения характерных размеров капель использовался метод IPI [22–24] с алгоритмами из [16–18]. Капли жидкости в регистрационной области многократно освещались “ножом” 5. При этом наблюдалась интерференция между отраженным и преломленным водой светом. Выполнялась процедура видеофиксации изображений с помощью кросскорреляционной камеры 2, и по числу наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос [22–24] определялись размеры капель. При $R_m > 0,3$ мм и существенном отклонении конфигурации капель от сферы (вследствие ограничений метода IPI [22–24]) для фиксации изображений использовалась высокоскоростная камера 1. По изображениям определялись максимальные диаметры капель в пикселях (от 6 до 10 значений в зависимости от конфигурации), которые затем усреднялись (по числу измерений). С учетом масштабного коэффициента S (изменяющегося в диапазоне 10–50 мкм/пикс в зависимости от размеров регист-

рационных областей) рассчитывались радиусы R_m (процедура аналогична применяемой в экспериментальных исследованиях [15–18]).

Скорости движения капель жидкости и газов определялись по перемещениям “трассеров” с применением метода PIV [19–21] и алгоритмов [15–18]. Измерение мгновенного поля скорости в заданном сечении полидисперсного газопаракапельного потока основано на измерении расстояния, преодолеваемого “трассерами”, находящимися в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени (принимаемый в соответствии с методиками [19–21] равным 100 мкс). Применялся кросскорреляционный алгоритм, предполагающий использование метода быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения корреляционной теоремы [19–21].

Для контроля скорости газов U_g перед вводом капель жидкости в канал 14 в него вдувались частицы нанопорошка диоксида титана (от 5000 до 7000 частиц в соответствии с требованием по минимальному числу “трассеров” в расчетных областях видеокадров [19–21]). Затем регистрировались поля скоростей “трассеров” и распределения последних по радиусу канала 14. При достижении условий относительно равномерного движения газов с заданной скоростью (отклонения значений скоростей “трассеров” по радиусу не более 7 %) в канал вводились капли жидкости. Скорость каждой капли U_m определялась по скоростям содержащихся в ней “трассирующих” частиц (малые перемещения “трассеров” в капле незначительно влияют на скорость ее движения [15–18]).

Систематические погрешности определения размеров капель и скоростей “трассеров” составили соответственно 1,5 и 2,1 %. Максимальные случайные погрешности определения этих параметров (при выполнении от 7 до 10 экспериментов в идентичных условиях) достигали 4,2 %.

При проведении экспериментов в отличие от опытов, описанных в [17, 18], основное внимание уделялось анализу изменения расстояний между каплями L_n в пламени, их размеров и траекторий движения, а также возможных режимов коагуляции. Для анализа результатов экспериментов использовалась модель тепломассопереноса, которая в отличие от постановок, принятых в [9–14], учитывает все основные процессы и факторы, характерные для системы *капля воды – высокотемпературные газы*.

Модель тепломассопереноса и методы решения

Применялись три типичные системы *капли жидкости – высокотемпературные газы*, отличающиеся взаимным расположением капель (рис. 2). Предполагалось, что капли воды движутся с безразмерной скоростью V_d на некотором начальном расстоянии друг от друга L_n под действием сил тяжести и сопротивления в области, заполненной высокотемпературными газами (соответствующими типичным продуктам сгорания). Принято, что начальная температура капель Θ_0 существенно ниже температуры газов Θ_f . Считалось, что капли прогреваются за счет теплопроводности. На границе *жидкость – газ* происходит их испарение. Пары воды вдуваются в высокотемпературную газовую среду и смешиваются с нагретыми газами. Вследствие эндотермического фазового превращения и вдува паров температура парогазовой смеси в непосредственной близости от капель снижается. В условиях интенсивного парообразования размеры капель уменьшаются (соответственно, меняется и расстояние между ними относительно начального значения L_n). Через некоторое время происходит полное испарение капель, движущихся первыми в совокупности (назовем их каплями-лидерами) (см. рис. 2). Аналогично испаряются и все последующие капли.

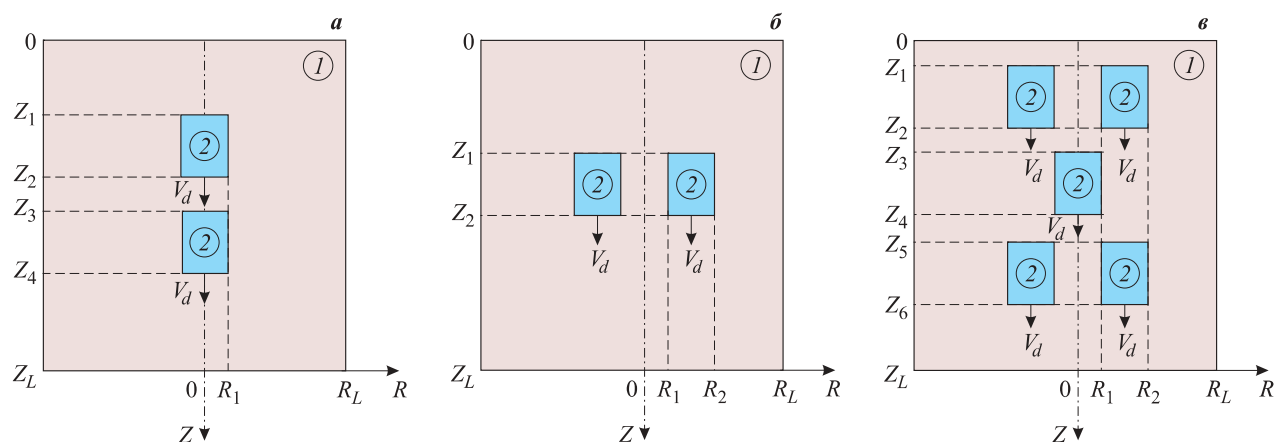


Рис. 2. Постановка задачи тепломассопереноса для двух капель, движущихся последовательно (а); двух капель, движущихся параллельно (б); пяти капель (в): 1 — высокотемпературная газовая смесь; 2 — капли воды

Математическая модель (в постановке в безразмерных переменных для уменьшения вычислительных ресурсов), соответствующая принятой постановке задачи (см. рис. 2,а) и сформулированная согласно основным положениям [25–27], включает следующую систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0 < \tau < \tau_d$):

- $0 < R < R_L$, $0 < Z < Z_1$, $Z_2 < Z < Z_3$, $Z_4 < Z < Z_L$; $R_1 < R < R_L$, $Z_1 < Z < Z_2$, $Z_3 < Z < Z_4$:

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2},$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial \tau} = Gr_3 \left(\frac{\partial^2 C_w}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial C_w}{\partial R} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial Z^2} \right),$$

$$C_f + C_w = 1;$$

- $0 < R < R_1$, $Z_1 < Z < Z_2$, $Z_3 < Z < Z_4$:

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2},$$

$$Fo_1 = \frac{\lambda_1 t_m}{\rho_1 C_1 z_m^2}, \quad Fo_2 = \frac{\lambda_2 t_m}{\rho_2 C_2 z_m^2}, \quad Gr_3 = \frac{D_3 t_m}{z_m^2},$$

где τ — безразмерное время;

τ_d — безразмерное время полного испарения капель;

R, Z — безразмерные координаты цилиндрической системы;

Θ — безразмерная температура;

Fo — число Фурье;

C_f, C_w — безразмерные концентрации продуктов сгорания и паров воды;

Gr — безразмерный диффузионный параметр;

λ — теплопроводность, Вт/(м·К);

t_m — характерный масштаб по времени, с;

C — теплоемкость, Дж/(кг·К);

z_m — характерный масштаб по координате, м;

ρ — плотность, кг/м³;

D — коэффициент диффузии, м²/с;

индексы: 1 — парогазовая смесь, 2 — капля воды, 3 — пары воды.

Начальные ($\tau = 0$) условия (см. рис. 2,а):

- $\Theta = \Theta_0$ при $0 < R < R_L$, $0 < Z < Z_1$, $Z_2 < Z < Z_3$, $Z_4 < Z < Z_L$; $R_1 < R < R_L$, $Z_1 < Z < Z_2$, $Z_3 < Z < Z_4$;
- $\Theta = \Theta_f$, $C_f = 1$, $C_w = 0$ при $0 < R < R_1$, $Z_1 < Z < Z_2$, $Z_3 < Z < Z_4$.

Граничные условия (см. рис. 2,а) принимались следующие:

- на границах *жидкость–газ* ($R = R_1$, $Z_1 < Z < Z_2$, $Z_3 < Z < Z_4$; $Z = Z_1$, $Z = Z_2$, $Z = Z_3$, $Z = Z_4$, $0 < R < R_1$) для уравнения диффузии — краевые условия II рода с учетом вдува паров воды;

- на внешних границах ($R = 0$, $R = R_L$, $0 < Z < Z_L$; $Z = 0$, $Z = Z_L$, $0 < R < R_L$) для всех уравнений — условие равенства нулю градиентов соответствующих функций.

В отличие от моделей [10–14] для учета влияния вдува паров воды на условия теплообмена на границах *жидкость–газ* в соответствии с заключениями [25–27] для уравнений энергии выставлялись следующие краевые условия:

- $R = R_1$, $Z_1 < Z < Z_2$, $Z_3 < Z < Z_4$:

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} - Q_e W_e \frac{z_m}{\Delta T \lambda_2} - \rho_3 C_3 V_e (\Theta_{3s} - \Theta_{2s}) \frac{z_m}{\lambda_2};$$

- $Z = Z_1$, $Z = Z_2$, $Z = Z_3$, $Z = Z_4$, $0 < R < R_1$:

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} - Q_e W_e \frac{z_m}{\Delta T \lambda_2} - \rho_3 C_3 V_e (\Theta_{3s} - \Theta_{2s}) \frac{z_m}{\lambda_2},$$

где Q_e — тепловой эффект испарения, Дж/кг;

W_e — скорость испарения, кг/(м²·с);

ΔT — коэффициент для определения безразмерной температуры;

Θ_{2s} , Θ_{3s} — безразмерные температуры соответственно жидкости и паров на границе *жидкость–газ*.

Уравнение движения капли в условиях парообразования с учетом действия сил сопротивления и тяжести согласно представлениям [27] имеет следующий вид:

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{3\rho_3}{4\rho_2 2r_d} c_\chi |v_d - v_e| (v_d - v_e) + g,$$

где v_d — скорость одиночной капли, м/с; $v_d(0) = v_0$;

t — время, с;

r_d — радиус одиночной капли, м;

c_χ — безразмерный коэффициент сопротивления;

v_e — скорость оттока паров воды с поверхности капли, м/с;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Безразмерный коэффициент сопротивления c_χ , зависящий в общем случае от конфигурации поверхности тела, его положения относительно направления движения обтекающего потока и других факторов, определялся в соответствии с теорией [27]. Так, зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса (Re), характеризующая влияние скорости движения v_d и размера r_d капли на силу сопротивления, при аппроксимации корреляционных кривых Шиллера–Неймана и Озеена для возможного диапазона изменения Re в рассматриваемых системах имеет вид [27]:

$$c_\chi = 24,3 Re^{-0,635}.$$

Для определения коэффициента сопротивления с учетом несферичности капли, ее нестационарного движения, испарения и конвективных течений внутри обтекаемого газовым потоком тела использовалось следующее выражение [27]:

$$c_{\chi} = 24,3k_g \frac{1}{B+1} \frac{1+2\mu_2/(3\mu_3)}{1+\mu_2/\mu_3} \times \\ \times (A+1)^{1,2 \pm 0,03} \text{Re}^{-0,635},$$

где k_g — безразмерный геометрический коэффициент, учитывающий отклонение формы обтекаемого тела от сферы [27];

B — число переноса Сполдинга;

μ — динамическая вязкость, кг/(м·с);

A — безразмерный комплекс, характеризующий относительное ускорение капель.

Соотношение $1/(B+1)$ представляет собой коэффициент, описывающий влияние процесса испарения капли на силу сопротивления:

$$B = \frac{C_2(T_{3s} - T_{2s})}{Q_e + q_i/W_e},$$

где T_{2s} , T_{3s} — размерные аналоги Θ_{2s} , Θ_{3s} , К;

q_i — поток тепла к капле, Вт/м² [27].

Выражение $\frac{1+2\mu_2/(3\mu_3)}{1+\mu_2/\mu_3}$ представляет собой коэффициент, учитывающий возможные конвективные течения внутри капли [27].

Выражение $(A+1)^{1,2 \pm 0,03}$ характеризует ускоренное движение тела [27]:

$$A = \frac{d}{v_d^2} \frac{dv_d}{dt}.$$

Для вычисления массовой скорости испарения воды использовалось выражение [27]:

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

где β — безразмерный коэффициент испарения (конденсации);

k_{β} — безразмерный коэффициент скорости испарения;

P^n — давление насыщенных паров воды, Н/м²;

P — давление паров воды вблизи границы испарения, Н/м²;

R_i — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T_e — температура поверхности капли, К;

M — молярная масса, кг/кмоль.

Принято считать [28], что достоверной экспериментальной информации о коэффициентах испарения β и k_{β} опубликовано очень мало, а теоретические методы их определения находятся на начальной стадии своего развития. Поэтому значения этих

коэффициентов принимались $\beta = 0,1$ и $k_{\beta} = 0,4$ в соответствии с условиями протекания рассматриваемых процессов исходя из физических представлений авторов [28].

Для вычисления давления паров воды использовалось уравнение Клапейрона – Менделеева [29].

Толщина испарившегося слоя жидкости l_e (м), характеризующая убыль массы капли в единицу времени, рассчитывалась аналогично [9–14] по формуле

$$l_e = W_e t / \rho_2.$$

Можно отметить, что зависимость $l_e = f(t)$ существенно нелинейна. Это обусловлено тем, что массовая скорость испарения W_e изменяется во времени нелинейно [28, 30, 31].

Для перехода к безразмерным переменным в качестве масштабных величин по аналогии с [12–14] использовались: усредненный характерный размер капли $z_m = 1$ мм, масштаб времени $t_m = 1$ с, температура $T_m = 1000$ К и скорость $v_m = 1$ м/с. Теплофизические характеристики капель и газов, а также алгоритмы численного решения задачи тепломассопереноса и методы аналогичны используемым в постановках [12–14].

Методика оценки достоверности результатов выполненных теоретических исследований, основанная на проверке консервативности применяемой разностной схемы, аналогична используемым в исследованиях [32–35].

Результаты и их обсуждение

В результате анализа видеogramм экспериментов установлено несколько режимов коагуляции капель при движении их через пламя. Так, в частности, при слежении за изменением расстояний между каплями и температуры парогазовой смеси в следе капель выявлено, что коагуляция последних может реализовываться в трех режимах:

1) движущиеся в следе капли догоняют идущие впереди (рис. 3);

2) капли изменяют направление своего движения на противоположное вследствие сил сопротивления газового потока и коагулируют с идущими следом каплями (рис. 4);

3) капли вследствие реализации фазовых превращений коагулируют с движущимися на некотором расстоянии от них каплями (рис. 5).

Причины реализации выявленных режимов коагуляции установлены с использованием видеogramм экспериментов и численного моделирования (постановки на рис. 2). Так, например, первый режим обусловлен существенным замедлением движения идущих первыми капель при парообразовании и созданием условий (за счет снижения температуры в следе) для значительно менее интенсивного испарения каждой последующей капли. Идущие пер-

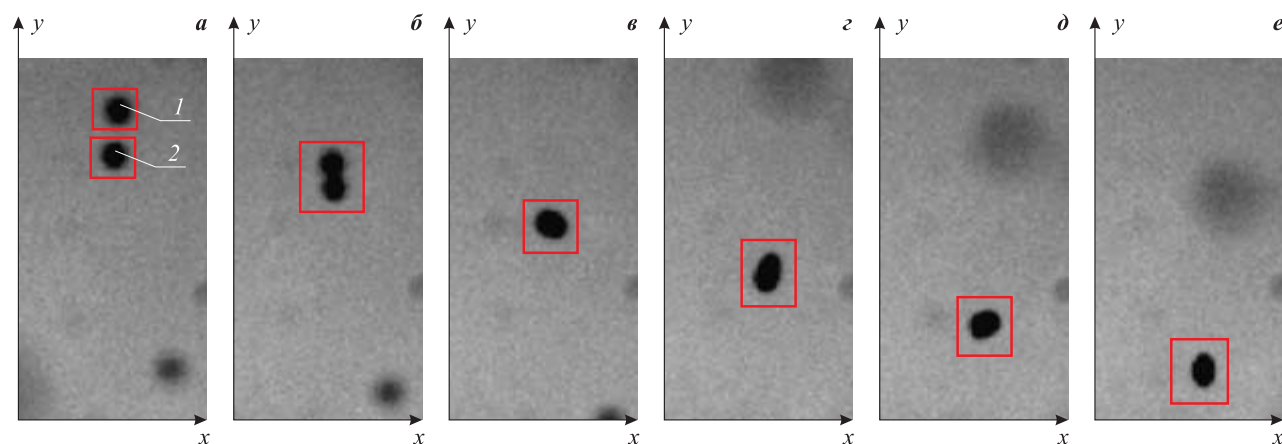


Рис. 3. Последовательные кадры видеogramм при реализации первого режима коагуляции: *a* — $t = 0$; *б* — $t = 0,15$ мс; *в* — $t = 0,3$ мс; *г* — $t = 0,45$ мс; *д* — $t = 0,6$ мс; *е* — $t = 0,75$ мс

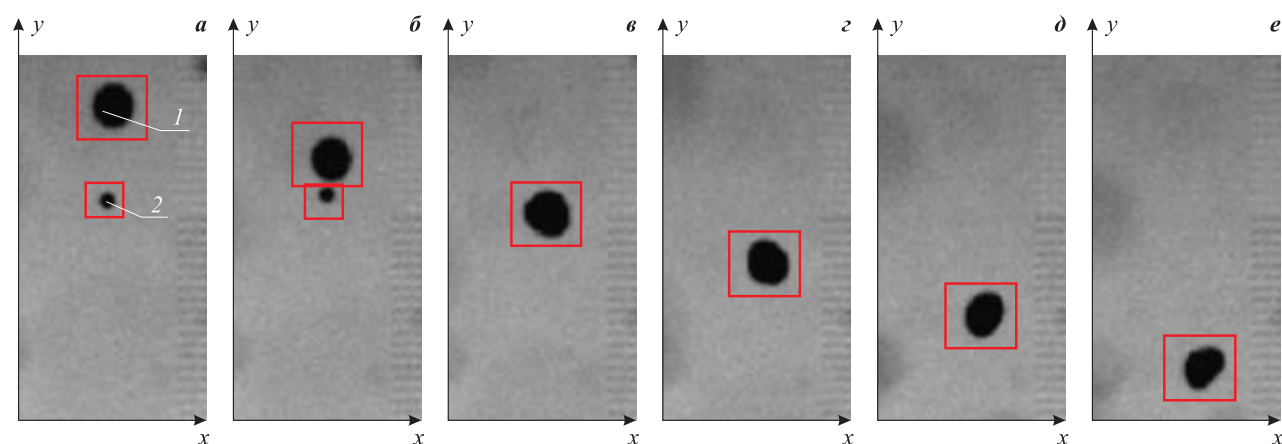


Рис. 4. Последовательные кадры видеogramм при реализации второго режима коагуляции: *a* — $t = 0$; *б* — $t = 0,1$ мс; *в* — $t = 0,2$ мс; *г* — $t = 0,3$ мс; *д* — $t = 0,4$ мс; *е* — $t = 0,5$ мс

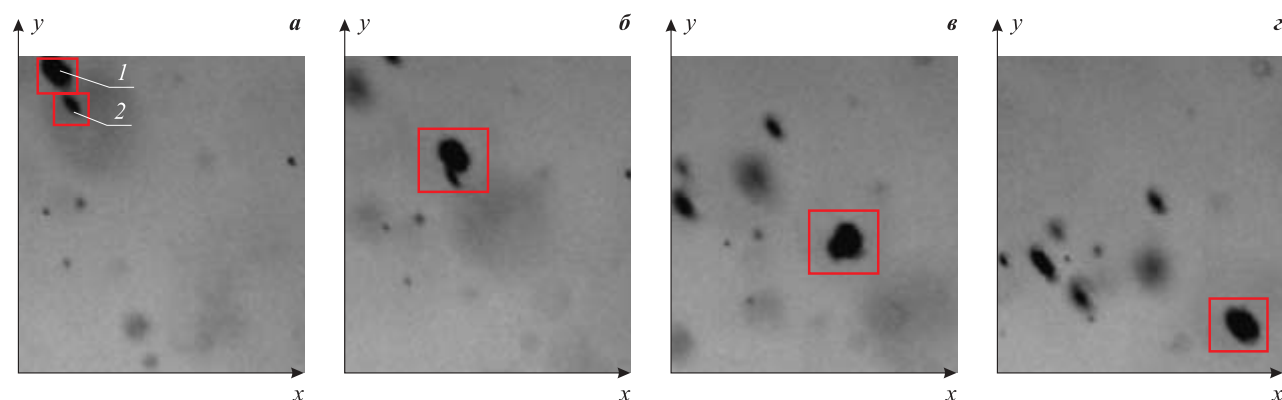


Рис. 5. Последовательные кадры видеogramм при реализации третьего режима коагуляции: *a* — $t = 0$; *б* — $t = 0,125$ мс; *в* — $t = 0,25$ мс; *г* — $t = 0,375$ мс

выми капли практически останавливаются за счет встречного движения восходящих продуктов сгорания и интенсивного уноса массы при парообразовании, а движение следующих за ними капель ускоряется (вследствие уменьшения скорости фазового перехода и температуры продуктов сгорания во фронте движения). Через определенный промежу-

ток времени эти капли догоняют значительно испарившиеся капли-лидеры и сливаются с ними, продолжая движение уже в виде “объединенных” капель. Этот процесс может продолжаться до полного испарения всех капель распыленной жидкости.

Проведенные эксперименты показали, что доля испарившихся капель в зависимости от их харак-

терных размеров (от 0,05 мм до 2,5 мм) существенно различается. В частности, установлено, что при $R_m \leq 0,17$ мм испаряется практически 100 % капле в канале длиной 1 м, при $0,17 < R_m \leq 0,3$ мм — около 70 %, при $R_m \approx 0,5$ мм — до 20 %, а при $R_m \rightarrow 2,5$ мм — не более 8 %. Как следствие, существенно уменьшается относительная концентрация капель в потоке высокотемпературных газов α_m : $\alpha_m \rightarrow 0$ — для малых капель ($R_m \leq 0,2$ мм); $\alpha_m \approx 0,7$ — для средних ($0,2 < R_m \leq 0,4$ мм); $\alpha_m = 0,3$ — для крупных (по начальным размерам) капель. Изменение значений α_m и R_m в процессе движения капель через высокотемпературные газы характеризует существенно нелинейный и нестационарный процесс. Очевидно, это обусловлено зависимостью скорости парообразования W_e от температуры поверхности T_e каждой капли жидкости.

На рис. 6 приведены значения W_e , установленные по результатам обработки экспериментальных данных и проведенного численного моделирования. Видно, что они существенно нелинейно (в несколько раз) увеличиваются при росте температуры поверхности капли. При этом можно отметить удовлетворительное отличие теоретических и экспериментальных значений W_e (в том числе при относительно низких температурах [27]). В частности, по результатам измерений массы и размеров капель на входе и выходе из высокотемпературного канала установлено, что средняя скорость испарения воды составляет около 0,241–0,278 кг/(м²·с). Численные исследования показали, что температура поверхностей капель T_e при $T_f \approx 1100$ К может возрасти от 350 до 370 К с увеличением времени перемещения в газовой среде, причем этот процесс носит нелинейный характер. При таких значениях T_e скорость испарения изменяется от 0,136 до 0,261 кг/(м²·с).

В результате численного моделирования установлен нелинейный характер прогрева капель в процессе движения через высокотемпературную смесь. Так, например, на рис. 7 представлено распределение температур в капле в разные моменты времени при внешней температуре газов около 1100 К. Из графиков видно, что температура капли (в том числе ее поверхности T_e) вследствие ее прогрева с ростом времени значительно повышается. Это приводит к интенсификации фазовых превращений и, как показали численные исследования, к существенному изменению скоростей движения капель. В частности, выявлено, что с ростом массы вдуваемых паров размер буферного слоя вокруг капли значительно увеличивается. Как следствие, наблюдается рост сил сопротивления, и движение капель-лидеров замедляется, а идущие следом капли догоняют их и коагулируют с ними.

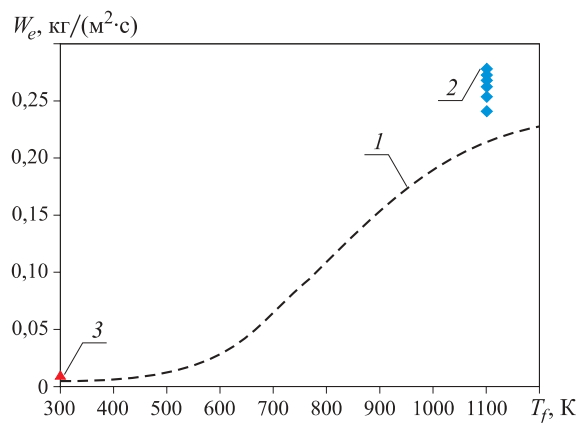


Рис. 6. Зависимость скорости испарения капель воды от температуры их поверхности: 1, 2 — теоретические и экспериментальные значения; 3 — экспериментальные значения из [27]

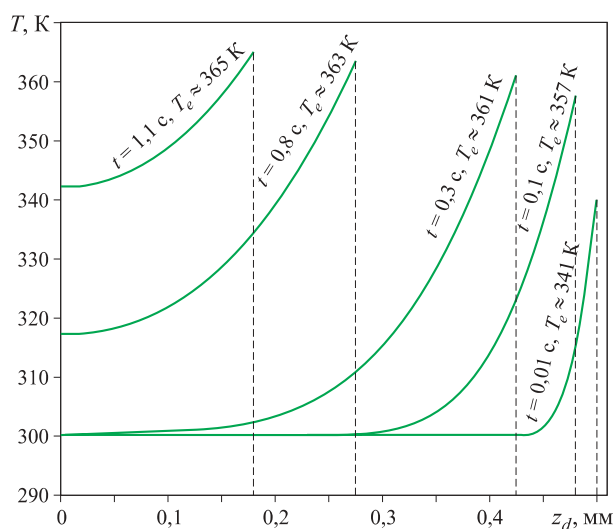


Рис. 7. Распределение температуры в капле воды при начальных размерах $r_d = 0,25$ мм, $z_d = 1$ мм и температуре газов $T_f = 1100$ К в разные моменты времени

Эти процессы приводят к значительным изменениям концентрации и температуры продуктов сгорания между каплями в водяном потоке. В частности, с использованием разработанных моделей тепломассопереноса (см. рис. 2) установлены типичные изотермы и изолинии концентраций продуктов сгорания в малой окрестности капель (рис. 8).

На рис. 9 представлены значения температур T_f и концентраций C_f в следе капель при различных расстояниях между ними. Аналогично исследованиям с упрощенной моделью [14] можно выделить расстояния L_n , при которых значения T_f и C_f минимальны. При этом если рассматривать параметр S^* [14], иллюстрирующий отношение общей начальной площади поверхности испарения совокупности капель S_e к общей начальной площади поверхности S_w занимаемого ими объема, то можно отметить соизмеримый эффект как для двух параллельных капель, так и для пяти. Эти результаты позволяют

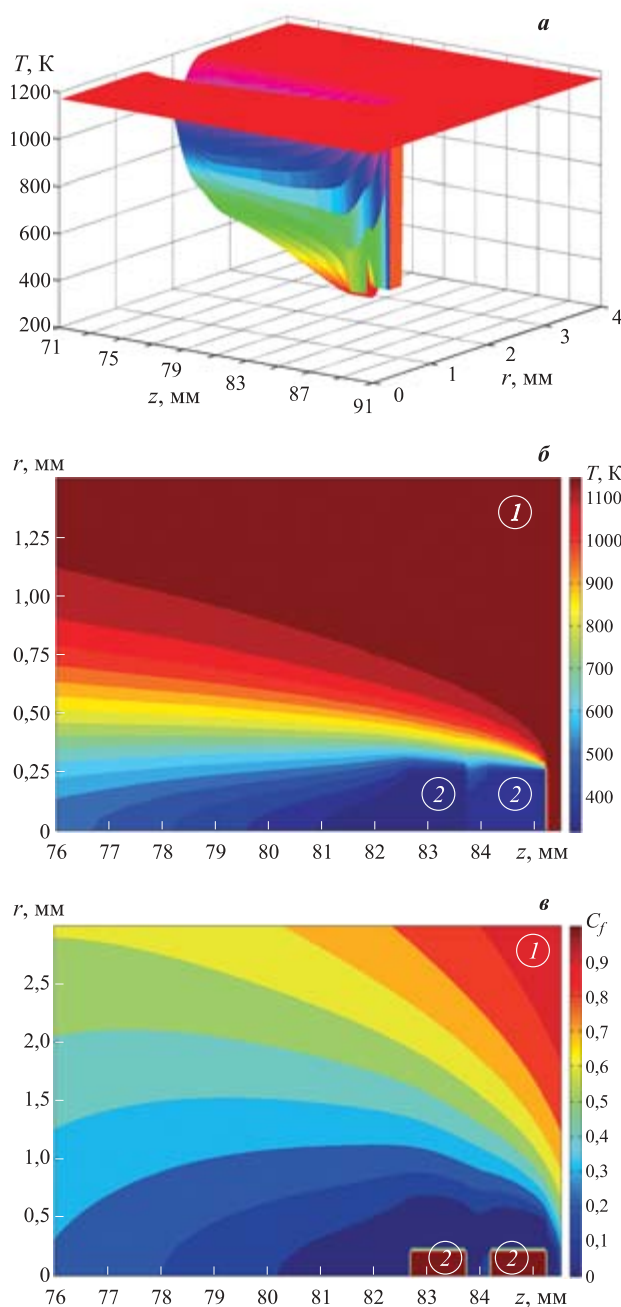


Рис. 8. Температурное поле (а), изотермы (б) и концентрации продуктов сгорания (в) при $r_d = 0,25$ мм, $z_d = 1$ мм, $L_n = 0,5$ мм, $T_f = 1100$ К: 1 — парогазовая смесь; 2 — капли воды

объяснить реализацию первого режима коагуляции (см. рис. 3).

Второй режим коагуляции (см. рис. 4) реализуется вследствие уноса капель воды формирующимся потоком продуктов сгорания. Так, при численных и экспериментальных исследованиях установлены соотношения начальных скоростей газов, а также скоростей и размеров капель, при которых происходит унос последних и реализация второго режима коагуляции. При $U_m \approx U_g$ в рассматриваемой области смешения потоков существенно меньшая доля

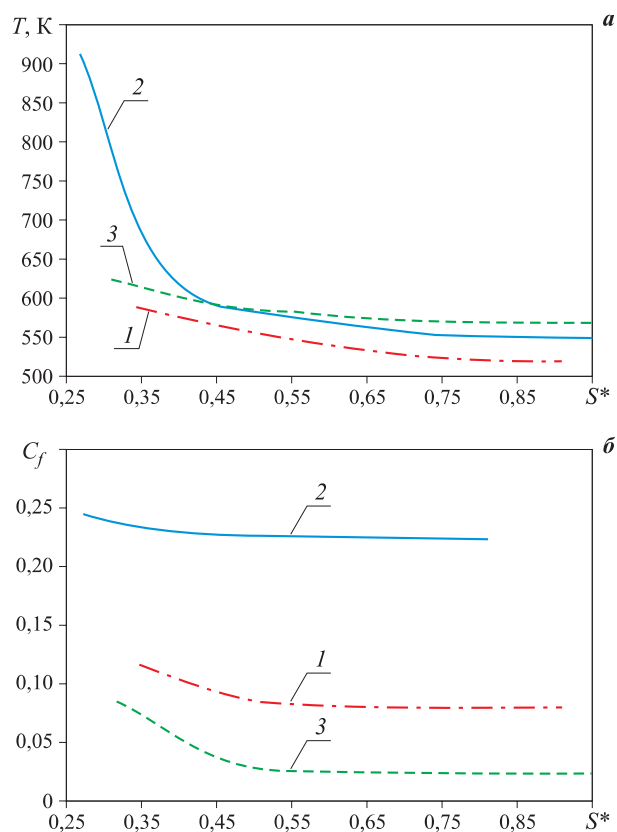


Рис. 9. Зависимость температуры (а) и концентрации (б) продуктов сгорания в следе каплей от расстояний между ними для модели: 1 — с двумя последовательно перемещающимися каплями; 2 — с двумя параллельно движущимися каплями; 3 — с пятью каплями

капель жидкости (только при $R_m < 0,17$ мм) изменяет направление своего движения относительно начального на противоположное. При начальном соотношении $U_m > U_g$ от 70 до 90 % каплей (даже при $R_m < 0,17$ мм) сохраняют направление движения, соответствующее направлению их ввода в высокотемпературную газовую среду. При этом с ростом размеров R_m число таких капель нелинейно увеличивается.

В результате обобщения экспериментальных данных с использованием разработанных моделей тепломассопереноса установлен параметр, который можно использовать при численном определении условий уноса капель газами. Так, в рассмотрение введен параметр γ_f , характеризующий соотношение сил сопротивления F_a и тяжести F_m , действующих на каплю. Значения F_a и F_m вычислялись в соответствии с положениями теории тепломассопереноса и гидродинамики в газокapельных потоках [27].

Исходя из анализа рис. 10, можно сформулировать условие торможения капель в виде $\gamma_f = 1$. При $\gamma_f < 1$ капли сохраняют начальное направление движения, а при $\gamma_f > 1$ уносятся газовым потоком. Параметр γ_f можно использовать при прогнозировании второго режима коагуляции.

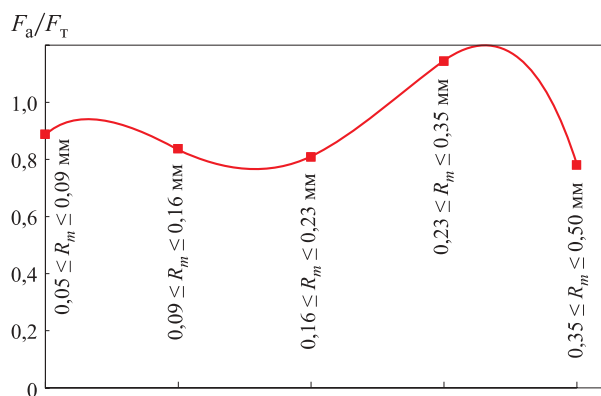


Рис. 10. Соотношение сил сопротивления и тяжести, действующих на капли воды при уносе газами

Третий режим коагуляции (см. рис. 5) реализуется при движении нескольких капель разных размеров на некотором расстоянии друг от друга (условно это движение можно назвать параллельным). На рис. 11 приведены типичные поля скоростей “трассеров”, соответствующих каплям воды и высокотемпературным газам при реализации третьего режима.

В результате численного моделирования установлено, что вследствие испарения капель воды и, соответственно, уменьшения их размеров довольно значительно изменяется давление парогазовой смеси в малой окрестности поверхности капель. Кроме того, при уменьшении размеров капли уменьшаются и характерные размеры их “температурных следов” (областей в следе капель, в которых температура продуктов сгорания снижается до умеренных значений — не более 400 К). Вследствие изменения температуры и давления парогазовой смеси между каплями за счет сил термофореза и турбофореза [27] расстояние между параллельно перемещающимися капля-

ми L_n уменьшается или возрастает. При повышении скоростей испарения капель параметр L_n растет, при снижении — уменьшается.

Можно отметить, что третий режим, как правило, реализуется совместно со вторым вследствие существенного изменения скоростей движения капель в потоке высокотемпературных продуктов сгорания. Поэтому идентификация этих двух режимов достаточно сложна и, как показали проведенные эксперименты, возможна только при использовании подходов высокоскоростной “трассерной” визуализации. В то же время объяснение причин их реализации возможно только по результатам численного моделирования с учетом всех основных процессов тепломассопереноса и фазовых превращений.

При анализе режимов коагуляции капель воды в области высокотемпературных газов установлены характерные особенности столкновения капель. Так, например, на рис. 12 приведены типичные видеок кадры с иллюстрацией процесса столкновения двух капель с существенно различающимися размерами. Эксперименты показали, что при “касательном” столкновении двух капель (особенно при различии их характерных размеров в несколько раз) происходит их кратковременное слияние и затем дробление на две капли с размерами, близкими к начальным (см. рис. 12). При “лобовом” столкновении капель происходит их слияние и далее движение продолжает “объединенная” капля. В то же время эксперименты показали, что характеристики процессов столкновения капель существенно изменяются при варьировании размеров и скоростей перемещения капель, а также углов пересечения их траекторий движения. Анализ результатов проведенных экспериментов, а также заключений, данных в [36–39],

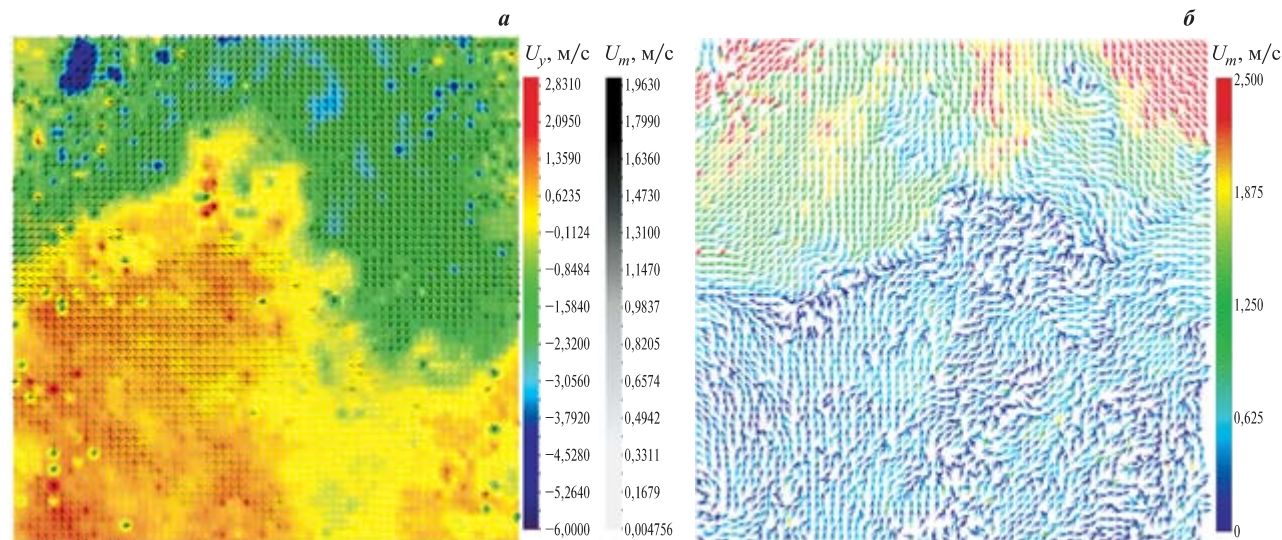


Рис. 11. Поле (а) и изолинии (б) скоростей “трассеров” при $U_m = 1,5$ м/с и $U_g = 1$ м/с (U_y — продольная составляющая скорости “трассеров”; U_m — абсолютная скорость “трассеров”)

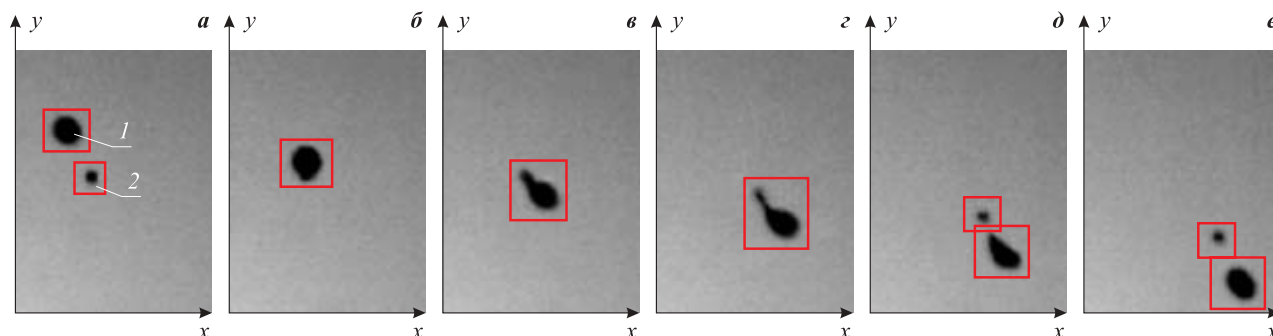


Рис. 12. Последовательные кадры видеogramм столкновения каплеи воды в потоке высокотемпературных газов: а — $t = 0$; б — $t = 0,1$ мс; в — $t = 0,2$ мс; г — $t = 0,3$ мс; д — $t = 0,4$ мс; е — $t = 0,5$ мс

позволяет сделать вывод о том, что определение возможных режимов столкновений каплеи представляет собой перспективную задачу, которую можно решить с использованием экспериментальных методик, разработанных на базе панорамных оптических методов “трассерной” визуализации.

Из анализа условий снижения температуры и концентрации продуктов сгорания с учетом различных режимов коагуляции каплеи воды в рассматриваемых условиях установлено, что действие эффектов эндотермических фазовых превращений на подавление пламени и реакции окисления можно максимизировать только при распределенном во времени и пространстве полидисперсном распылении жидкости. В таком случае возможно существенное снижение затрачиваемых ресурсов жидкостных тушащих составов и повышение эффективности их использования.

Заключение

Установленные в экспериментах особенности перемещения и испарения каплеи воды в зоне пламени иллюстрируют определяющее влияние на них процессов коагуляции. При этом выявлено несколько режимов реализации упомянутых процессов. Разработанные модели тепломассопереноса позволяют прогнозировать режим и характеристики коагуляции каплеи в пламени при различной дисперсности и размерах последних. Как следствие, при их применении возможно вычисление параметров распыления воды (размеры, дисперсность, скорости движения) в зоне пламени, обеспечивающих ее полное испарение и требуемое снижение температуры, а также концентрации продуктов сгорания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wighus R.* Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge // *Proceedings of the International Water Mist Conference.* — Vienna, 2001. — P. 1–26.
2. *Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K.* Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // *Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium.* — 2005. — Vol. 27. — P. 753–764.
3. *Соковиков В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н.* Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // *Энергетик.* — 2008. — № 6. — С. 37–38.
4. *Сегаль М. Д.* Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.* — 2011. — № 4. — С. 61–64.
5. *Корольченко Д. А., Громоной В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // *Пожаровзрывобезопасность.* — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 54–57.
6. *Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T.* On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires // *Suppression and Detection Research and Applications Conference.* Orlando, USA, 2007.
7. *Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A.* Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station // *42nd International Conference on Environmental Systems.* California, USA, 2012.

8. *Rodriquez B., Young G.* Development of International Space Station fine water mist portable fire extinguisher // 43rd International Conference on Environmental Systems. Vail, CO, 2013.
9. *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. — Т. 21, № 5. — С. 74–78.
10. *Стрижак П. А.* Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
11. *Стрижак П. А.* Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 9. — С. 17–22.
12. *Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Численное исследование тепломассопереноса при движении “тандема” капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. — 2012. — № 12. — С. 531–538.
13. *Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 1. — С. 59–65.
14. *Стрижак П. А.* Влияние распределения капель в “водяном снаряде” на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 4. — С. 839–848.
15. *Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 6. — С. 1327–1332.
16. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 10. — С. 15–24.
17. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 16–23.
18. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 2. — С. 269–272.
19. *Keane R. D., Adrian R. J.* Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. — 1992. — Vol. 49. — P. 191–215.
20. *Westerweel J.* Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. — 1997. — Vol. 8. — P. 1379–1392.
21. *Foucaut J. M., Stanislas M.* Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13. — P. 1058–1071.
22. *Ахметбеков Е. К., Маркович Д. М., Токарев М. П.* Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках // Вычислительные технологии. — 2010. — Т. 15, № 4. — С. 57–72.
23. *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experiments in Fluids. — 2002. — Vol. 32, No. 2. — P. 143–152.
24. *Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М.* Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. — 2011. — Т. 18, № 1. — С. 1–13.
25. *Франк-Каменецкий Д. А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 490 с.
26. *Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 277 с.
27. *Терехов В. И., Пахомов М. А.* Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. — 284 с.
28. *Муратова Т. М., Лабунцов Д. А.* Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. — 1969. — Т. 7, № 5. — С. 959–967.
29. *Кнаке О., Странский И. Н.* Механизм испарения // Успехи физических наук. — 1959. — Т. 68, № 2. — С. 261–305.

30. Авдеев А. А., Зудин Ю. Б. Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) // Теплофизика высоких температур. — 2012. — Т. 50, № 4. — С. 565–574.
31. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М. : Атомиздат, 1979. — 416 с.
32. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Особенности зажигания парогазовой смеси нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. — 2008. — Т. 17, № 3. — С. 26–32.
33. Захаревич А. В., Стрижак П. А. Пожарная опасность взаимодействия источников ограниченного теплосодержания с легковоспламеняющимися жидкостями // Пожарная безопасность. — 2011. — № 4. — С. 70–75.
34. Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Химическая физика. — 2011. — № 12. — С. 35–42.
35. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние распределения капель воды в “водяном снаряде” на температуру в его следе // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 2. — С. 9–17.
36. Aggarwal S. K., Peng F. A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations // J. Eng. for Gas Turbines and Power. — 1995. — Vol. 117. — P. 453–461.
37. Shreiber A. A., Podvisotski A. M., Dubrovski V. V. Deformation and breakup of drops by aerodynamic loads // Atomization and Sprays. — 1996. — Vol. 6, No. 6. — P. 667–692.
38. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. — 2008. — Vol. 71, 036601.
39. Sprittles J. E., Shikhmurzaev Y. D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment // Phys. Fluids. — 2012. — Vol. 24, 122105.

Материал поступил в редакцию 15 октября 2014 г.

English

DROPLETS DISPERSION INFLUENCE IN THE VAPOR-AND-WATER FLOW ON CHARACTERISTICS OF THEIR MOVEMENT AND EVAPORATION IN THE COMBUSTION FLAME ZONE

VOLKOV R. S., Low Researcher of Automation Thermal and Power Processes Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: romanvolkov@tpu.ru)

KUZNETSOV G. V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Theoretical and Industrial Heat Engineering Department, Institute of Power Engineering of National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: elf@tpu.ru)

KURILENKO E. Yu., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Construction Mechanics Department, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering (Lunacharskogo St., 2, Tyumen, 625001, Russian Federation; e-mail: ksmeh@tgasu.ru)

STRIZHAK P. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Automation Thermal and Power Processes Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: pavelspa@tpu.ru)

ABSTRACT

The article presents experimental and numerical investigation results of droplets dispersion influence in the vapor-and-water flow on characteristics of their movement and evaporation in the combustion flame zone. High-performance computer systems, methods of high-speed video registration and also modern technical means on the basis of panoramic optical methods of multiphase flows diagnostic were used for the experimental researches. It is established that the systematic measurement errors of droplets sizes and velocities are no more than 1.5 and 2.1 %.

Several characteristic modes of droplets coagulation at the movement through a flame are identified. The emergence reasons of each of the revealed modes are established and the corresponding images are presented. The typical videograms and velocity fields illustrating a turn of a vapor-droplet flow by a counter flow of high-temperature gases are shown. With use of numerical simulation methods the distributions of temperatures and concentration of combustion products in the vicinity

of water droplets are received. As a result of experimental and numerical results comparison the parameter characterizing a condition of braking and the subsequent droplets ablation is received.

It is shown that for a choice of water dispersion parameters in a flame zone it is expedient to use the developed theoretical models and experimental results.

Keywords: water vapor; water; droplets; vapor-and-water flow; flame; evaporation; temperature and concentration of combustion products.

REFERENCES

1. Wighus R. Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge. *Proceedings of the International Water Mist Conference*, Vienna, 2001, pp. 1–26.
2. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium*, 2005, vol. 27, pp. 753–764.
3. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniye tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants]. *Energetik — Power Engineer*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
4. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspylennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [The water mist system for cable construction of nuclear power plant fire protection]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
5. Korol'chenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
6. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*, Orlando, USA, 2007.
7. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station. *42nd International Conference on Environmental Systems*, California, USA, 2012.
8. Rodriquez B., Young G. Development of International Space Station fine water mist portable fire extinguisher. *43rd International Conference on Environmental Systems*, Vail, CO, 2013.
9. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennaya otsenka optimalnykh razmerov kapel vody v usloviyakh yeye raspyleniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshcheniyakh [Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at place-ments]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78.
10. Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye usloviy ispareniya sovokupnosti kapel vody pri dvizhenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 26–31.
11. Strizhak P. A. Chislennyy analiz protsessy ispareniya kapli, dvizhushchey v struye vody cherez vysokoskorostnyye produkty sgoraniya [Numerical analysis of evaporation process for droplet moving at the water jet through high temperature combustion products]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 17–22.
12. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii “tandem” kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical research of heat-and-mass transfer at movement of water drops “tandem” in the high temperature gas mixture]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 21, no. 12, pp. 531–538.
13. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Heat-and-mass transfer at water drops movement in the high-temperature gas mixture]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 59–65.
14. Strizhak P. A. Vliyaniye raspredeleniya kapel v “vodyanom snaryade” na temperaturu i kontsentratsiyu produktov sgoraniya v yego slede [Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 839–848.

15. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye izmeneniya massy kapel vody pri ikh dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1327–1332.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye polnoty ispareniya raspylennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 15–24.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Eksperimentalnoye issledovaniye osobennostey dvizheniya kapel raspylennoy tushashchey zhidkosti na vkhode v zonu plameni [Experimental investigation of sprayed extinguishing liquid drops moving features on the entering into the flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 16–23.
18. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Osobennosti ispareniya dvukh kapel vody, dvizhushchikhsya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 269–272.
19. Keane R. D., Adrian R. J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research*, 1992, vol. 49, pp. 191–215.
20. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, pp. 1379–1392.
21. Foucaut J. M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, pp. 1058–1071.
22. Akhmetbekov Ye. K., Markovich D. M., Tokarev M. P. Korrelyatsionnaya korrektsiya v metode slezheniya za chastitsami v potokakh [Correlation correction in a method of tracking particles in streams]. *Vychislitelnyye tekhnologii — Computing Technologies*, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 57–72.
23. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, no. 2, pp. 143–152.
24. Bilskiy A. V., Lozhkin Yu. A., Markovich D. M. Interferometricheskii metod izmereniya diametrov kapel [Interferometric method for measurement of droplets diameters]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 1–13.
25. Frank-Kamenetskiy D. A. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 490 p.
26. Paskonov V. M., Polezhaev V. I., Chudov L. A. *Chislennoye modelirovaniye protsessov teplo- i massoobmena* [Numerical simulation of heat-and mass transfer processes]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 277 p.
27. Terekhov V. I., Pakhomov M. A. *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapelnykh potokakh* [Heat-and-mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet streams]. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2009. 284 p.
28. Muratova T. M., Labuntsov D. A. Kineticheskiy analiz protsessov ispareniya i kondensatsii [Kinetic analysis of evaporation and condensation processes]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 1969, vol. 7, no. 5, pp. 959–967.
29. Knake O., Stranskiy I. N. Mekhanizm ispareniya [The mechanism of evaporation]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Achievements of Physical Sciences*, 1959, vol. 68, no. 2, pp. 261–305.
30. Avdeev A. A., Zudin Yu. B. Kineticheskiy analiz intensivnogo ispareniya (metod obratnykh balansov) [Kinetic analysis of intensive evaporation (the method of inverse balances)]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 4, pp. 565–574.
31. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Bases of the heat exchange theory]. Moscow, Atomizdat, 1979. 416 p.
32. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Osobennosti zazhiganiya parogazovoy smesi nagretoy do vysokikh temperatur metallicheskoj chastitsey [The ignition features of steam-gas mix by the metal particle heated to high temperatures]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 26–32.
33. Zakharevich A. V., Strizhak P. A. Pozharnaya opasnost vzaimodeystviya istochnikov ogranichenogo teplosoderzhaniya s legkovosplamenyayushchimisya zhidkostyami [Fire danger of interaction of limited heat content sources with flammable liquids]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2011, no. 4, pp. 70–75.

34. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye modelirovaniye tverdogfaznogo zazhiganiya metallizirovannogo kondensirovannogo veshchestva nagretoy do vysokikh temperatur chastitsey [Numerical simulation of solid-phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature]. *Khimicheskaya fizika — Physical Chemistry*, 2011, no. 12, pp. 35–42.
35. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye raspredeleniya kapel vody v “vodyanom snaryade” na temperaturu v yego slede [Influence of water droplets distribution in the “water shell” on temperature in follow movement]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 9–17.
36. Aggarwal S. K., Peng F. A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, vol. 117, pp. 453–461.
37. Shreiber A. A., Podvisotski A. M., Dubrovski V. V. Deformation and breakup of drops by aerodynamic loads. *Atomization and Sprays*, 1996, vol. 6, no. 6, pp. 667–692.
38. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets. *Reports on Progress in Physics*, 2008, vol. 71, 036601.
39. Sprittles J. E., Shikhmurzaev Y. D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment. *Physics of Fluids*, 2012, vol. 24, 122105.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

ОГNETУШИТЕЛИ. УСТРОЙСТВО. ВЫБОР. ПРИМЕНЕНИЕ Д. А. Корольченко, В. Ю. Громовой



В учебном пособии приведены классификация огнетушителей и конструкции основных их типов, средства тушения, используемые для зарядки огнетушителей, виды огнетушителей и правила их применения для ликвидации загораний различных веществ, рекомендации по расчету необходимого количества огнетушителей для разных объектов, по их размещению, хранению и техническому обслуживанию.

Рекомендации, содержащиеся в книге, разработаны на основе современных нормативных документов, регламентирующих конструкцию, условия применения, правила эксплуатации и технического обслуживания огнетушителей.

Учебное пособие рассчитано на широкий круг читателей: инженерно-технических работников предприятий и организаций, ответственных за оснащение объектов огнетушителями, поддержание их в работоспособном состоянии и своевременную перезарядку; преподавателей курсов пожарно-технического минимума и дисциплины “Основы безопасности жизнедеятельности” в средних и высших учебных заведениях; частных лиц, выбирающих огнетушитель для обеспечения безопасности квартиры, дачи или автомобиля.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03;
e-mail: mail@firepress.ru; www.firepress.ru