

И. С. ВОЙТКОВ, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: i.voytkov@ges.tomsk.ru)

Р. С. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

О. В. ВЫСОКОМОРНАЯ, канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь (постдок) кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: vysokomornaja@tpu.ru)

Г. А. ЧЕРНОВА, магистрант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: gac2@tpu.ru)

А. В. ФАДЕЕВ, магистрант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: andrey.fadeev.ne@mail.ru)

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЛЕДОВ КАПЕЛЬ ВОДЫ, ВОДНЫХ МАССИВОВ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ

Проведены экспериментальные исследования изменения температуры в следе капель воды, водных массивов и аэрозольных потоков, движущихся через высокотемпературные продукты сгорания. Для регистрации основных характеристик исследованных процессов применены средства высокоскоростной регистрации температуры (малоинерционные термодатчики), а также диагностическая система на базе панорамных оптических методов диагностики потоков (PIV, PTV, IPI, SP). Исследования проводились для аэрозольных потоков, а также одиночных крупных капель и больших массивов воды. Установлены диапазоны снижения температуры в следе тушащей жидкости (от 15 до 140 К). Определены времена сохранения пониженной температуры газовой среды в следе капель относительно начальной температуры газов: для одиночных капель и массивов воды — 5–10 с, для распыленного потока — более 20 с. Выделены масштабы влияния большой группы факторов на интегральные характеристики температурных следов капель.

Ключевые слова: капля воды; аэрозоль; водный массив; испарение; высокотемпературные продукты сгорания; температурный след; тушение пожаров.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.17-26

Введение

Исследование процессов распыления жидкостей в условиях высоких температур (более 800 К), в частности при пожарах, представляет интерес для широкого круга специалистов [1–5]. За последние десятилетия технологии тушения пожаров получили интенсивное развитие [6–9]. В настоящее время совершенствуются существующие технологии, разра-

батываются и внедряются новые способы тушения (водяная завеса, водяной туман и др.). Из анализа [6–9] можно сделать заключение о том, что одной из наиболее распространенных тушащих сред по-прежнему является вода, а также составы на ее основе. Это можно объяснить практически повсеместной доступностью воды, а также ее специфическими теплофизическими свойствами (в частности, высокой теплотой парообразования — около 2 МДж/кг).

При использовании воды одновременно реализуется несколько механизмов тушения:

- во-первых, охлаждение горячей поверхности посредством воды в жидкой фазе и за счет формирования на поверхности водяной пленки (что важно при тушении пожаров класса А) [1–9];
- во-вторых, снижение температуры в зоне пожара за счет испарения воды и затрат большого количества тепла на фазовый переход;
- в-третьих, вытеснение окислителя из зоны горения образующимся водяным паром.

Последние два механизма особенно важны при локализации и тушении пожаров классов В и С [1–9].

Опыт тушения пожаров дает основание утверждать, что охлаждение горячей поверхности не всегда бывает осуществимо в силу специфики процесса [2–4], в частности из-за отсутствия прямого доступа к очагу возгорания. При тушении крупных лесных пожаров (особенно верховых) большая часть жидкости не всегда расходуется оптимально и, как следствие, не удастся достичь необходимого охлаждения горящего лесного материала. В связи с этим в качестве оптимальных механизмов тушения можно выделить испарение жидкости и последующее вытеснение окислителя из зоны горения. При этом следует учитывать, что испарение воды также может протекать с разной степенью интенсивности в зависимости от ряда факторов, и прежде всего от способа подачи воды (тонкораспыленная вода, крупные капли, большие водные агломераты). Последнее обстоятельство позволяет говорить о необходимости комплексного анализа условий протекания пожара и способа распыления воды с точки зрения их влияния на процесс тушения, в частности на динамику изменения температуры газовой фазы в следе водной массы. Результаты такого анализа позволяют делать прогнозы относительно оптимальных способов подачи тушащего состава в зону пожара, обеспечивающих максимальное снижение температуры пламени и продуктов сгорания в окрестностях очага.

Несмотря на известные данные (например, [10–13]), обосновывающие влияние группы факторов (размеры и дисперсность водной массы, скорость ее движения, начальная температура воды и ее компонентный состав) на интенсивность парообразования воды и составов на ее основе, до настоящего времени практически отсутствуют достоверные экспериментальные результаты изучения динамики изменения температуры в следе больших водных массивов, крупных капель и распыленных потоков. Аналогичные явления исследованы [12–14] с использованием математических моделей, в результате чего выдвинуты гипотезы о существенном снижении температуры продуктов сгорания вследствие интенсивного испарения капель тушащей жидкости. Достоверность

результатов численных исследований, полученных с использованием разработанных моделей [12–14], необходимо подтвердить их сопоставлением с экспериментальными данными. В связи с этим представляет интерес экспериментальное определение снижения температуры продуктов сгорания в результате тушения очагов пламени с использованием разных способов подачи воды, а также выявление длительности указанного эффекта снижения температуры в следе жидкости.

Цель работы — экспериментальное исследование температурных следов капель воды, водных массивов и аэрозольных потоков, движущихся через высокотемпературные продукты сгорания.

Экспериментальный стенд и методика исследований

При проведении исследований использовался экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 1. По основным элементам стенд аналогичен использованному при проведении исследований, описанных в [10, 11]. Стенд оснащен высокоскоростным видеорегистрационным (камеры “Phantom V411” и “Phantom Miro M310”, частота съемки до $6 \cdot 10^5$ fps, максимальное разрешение съемки 1280×1280 pix) и кросскорреляционным (двойной импульсный твердотельный Nd:YAG лазер “Quintel EverGreen 70”) программно-аппаратным комплексом. Оборудование стенда (см. рис. 1) позволяло регистрировать параметры газопарокапельных смесей с применением панорамных оптических методов диагностики многофазных сред “Particle Image Velocimetry” (PIV), “Stereo Particle Image Velocimetry” (Stereo PIV), “Particle Tracking Velocimetry” (PTV), “Interferometric Particle Imaging” (IPI) and “Shadow Photography” (SP) [15–19]. В отличие от работ [10, 11] данный стенд дополнительно был оснащен техническими средствами для проведения высокоскоростных температурных измерений. Кроме того, помимо форсуночных устройств, в верхней части стенда дополнительно устанавливалось оборудование для генерации одиночных капель воды, а также технические средства для закрепления и последующего сброса в цилиндрический канал 12 (область высокотемпературных продуктов сгорания) “водяных снарядов”. Условная схема проведения температурных измерений с указанием мест расположения термпар (а также устройств для генерации капельного потока, одиночных капель и больших массивов) приведена на рис. 2.

Генерация продуктов сгорания проводилась по аналогии с методикой, описанной в [10, 11]. Использовалась горелка 13, стеклянный кварцевый цилиндр 12, во внутренней полости которого формировался восходящий поток продуктов сгорания керосина.

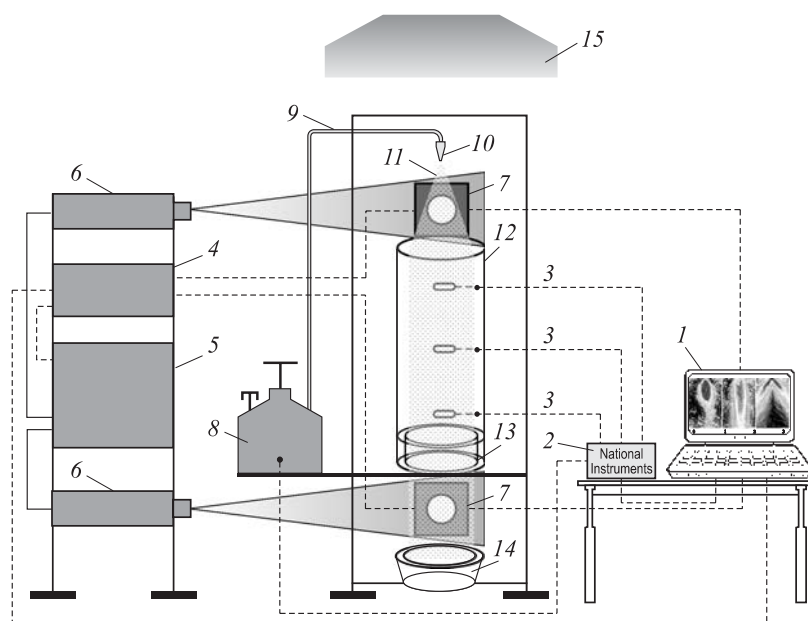


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — персональный компьютер (ПК); 2 — высокоскоростная плата аналогового ввода; 3 — термопары; 4 — синхронизатор сигналов; 5 — силовой блок лазера (генератор излучения); 6 — двойной импульсный Nd:YAG лазер; 7 — кросскорреляционная CCD-видеокамера; 8 — емкость с водой; 9 — канал подачи воды; 10 — распылительная форсунка; 11 — капельный поток; 12 — цилиндр из кварцевого стекла; 13 — полый цилиндр с горючей жидкостью; 14 — уловитель капель; 15 — вытяжная система

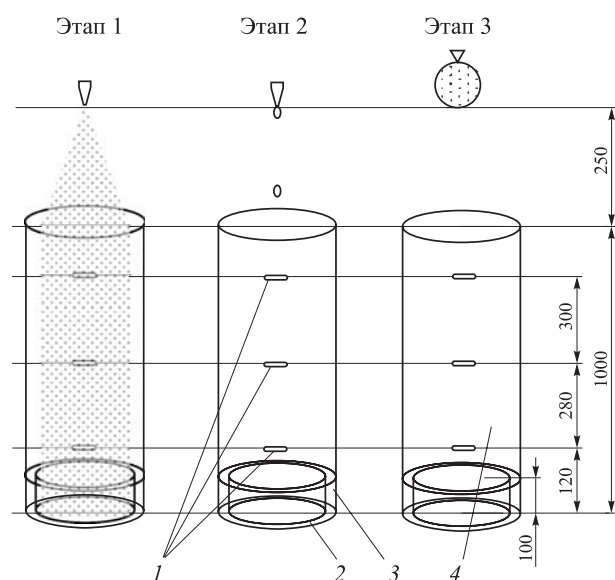


Рис. 2. Условная схема проведения измерений температуры: 1 — термопара; 2 — горелка (полый цилиндр); 3 — керосин; 4 — цилиндр из кварцевого стекла

Скорость движения продуктов сгорания U_g в цилиндрическом канале 12 варьировалась в диапазоне 0,5–3,0 м/с путем изменения мощности вытяжной системы 15. Для измерения значений U_g по аналогии с [10, 11] применялся метод PIV [15, 16]. Для регистрации температуры продуктов сгорания T_g в следе капельного потока, одиночных капель и больших водных массивов использовался измерительный комплекс, состоящий из высокоскоростной платы аналогового ввода National Instruments 2 и трех хромель-алюмелевых малоинерционных термопар 3 (диапазон измеряемых температур 223–1473 К, систематическая погрешность ± 3 К; время теплового запаздывания менее 0,1 с).

Исследования выполнялись в три этапа: на первом определялись характеристики изменения температуры T_g в следе распыленного капельного потока, на втором — в следе одиночных капель, на третьем — в следе больших водных массивов. В качестве тушающей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Для генерации капельного потока распыленной воды применялась система, состоящая из баллона с водой 8 (находящейся под давлением 100–300 кПа в зависимости от условий проведения эксперимента), канала подачи воды 9 и набора распылительных форсунок 10 [10, 11]. Использовались три типа распылительных форсунок, генерирующих различные (по дисперсности) капельные потоки. Размеры (радиус) капель распыленной воды варьировались в диапазоне $R_d \approx 0,04 \div 0,35$ мм. Начальная объемная концентрация капель в потоке γ_d изменялась в интервале $3,8 \cdot 10^{-5} - 10,3 \cdot 10^{-5}$ м³ капель/м³ газа. Начальная температура воды T_w поддерживалась на уровне (300 ± 3) К. Для определения начальных скоростей движения U_d капельного потока, так же как и в работах [10, 11], применялись методы PIV [15, 16] и PTV [17]. Для оценки начальных размеров капель воды в распыленном потоке использовался метод SP [18, 19]. Регистрация капельного потока осуществлялась на входе в цилиндрический канал 12 и выходе из него (см. рис. 1).

Погрешность определения скоростей U_d и U_g с использованием метода PIV не превышала 2 %, определения размеров капель R_d методом SP — 2,5 %.

Для генерации одиночных капель воды использовался электронный одноканальный дозатор Finn-pipette Novus (минимальный и максимальный забираемые объемы 10 и 100 мкл соответственно, шаг

варьирования 0,1 мкл) в комплекте со специализированным наконечником. Размер генерируемых в экспериментах капель воды варьировался в диапазоне 1,5–2,5 мм. Непосредственно перед каждой серией экспериментов проводился контрольный замер массы генерируемых капель воды M_d микровесами ViBRA HT 84RCE 6 (дискретность 10^{-5} г). Выполнялся контрольный расчет объема капли V_d по формуле $V_d = \rho_w / M_d$ (где ρ_w — плотность дистиллированной воды при температуре 300 К; $\rho_w \approx 996,5$ кг/м³). Максимальные случайные погрешности определения V_d не превышали 1 %.

Генерация больших массивов воды осуществлялась по аналогии с методикой, описанной в работе [20]. В верхней части экспериментального стенда устанавливался стальной стержень, на котором закреплялось заранее подготовленное водяное ядро. Для создания ядра сферической формы использовалась тонкостенная (толщиной менее 0,5 мм) резиновая оболочка, которая заполнялась водой. Исходный объем варьировался в диапазоне $V_0 \approx 0,05 \div 0,10$ л.

Для регистрации процесса движения одиночных капель воды и больших водных массивов использовались высокоскоростные CMOS-видеокамеры, которые размещались в двух точках по высоте экспериментального стенда таким образом, чтобы обеспечивалась видеорегистрация области от основания горелки 13 до верхней кромки цилиндра 12. Для наилучшего качества видеозаписей траектория движения капель и массивов в регистрационной области видеокамер подсвечивалась с помощью светодиодных осветительных прожекторов. Полученные видеозаписи обрабатывались программным комплексом непрерывного слежения Tema Automotive [21]. Определялись размеры и скорости движения одиночных капель и больших водных массивов.

При проведении экспериментов с использованием распыленного капельного потока осуществлялся импульсный распыл воды во внутреннюю полость цилиндра 12 (область высокотемпературных продуктов сгорания). Время импульса t_{imp} изменялось в диапазоне 1–5 с, частота повторения импульсов для капельных потоков в зависимости от типа эксперимента варьировалась от 30 до 45 с. Время контролировалось с помощью электронного секундомера (дискретность 0,1 с), при этом погрешность определения не превышала 1 с. Эксперимент включал от 15 до 20 импульсов. Для каждого начального значения параметров γ_d , t_{imp} , R_d , U_d и U_g проводилось не менее 10 экспериментов. В каждом эксперименте соблюдался следующий порядок действий:

- создавался поток высокотемпературных продуктов сгорания;

- по истечении 250 с начиналась импульсная циклическая подача капельного потока во внутреннюю область цилиндрического канала 12;
- одновременно (в момент подачи первого импульса) запускалась процедура непрерывной регистрации температуры продуктов сгорания внутри цилиндра 12 с применением термопар 3 и высокоскоростной платы аналогового ввода 2 (шаг опроса термопар по времени — 0,1 с).

При проведении экспериментов с использованием одиночных капель воды и больших водных массивов производился их сброс во внутреннюю полость цилиндра 12. Генерация одиночных капель и больших водяных снарядов осуществлялась с частотой 30 с. Реализовывались две схемы. В первой термопары размещались так же, как и при проведении экспериментов с распыленным водным потоком, на вертикальной оси симметрии канала 12. При этом одиночная капля либо водный массив проходили “сквозь” термоэлектрический преобразователь. Вторая схема предусматривала расположение термопар с некоторым смещением относительно вертикальной оси симметрии канала 12 (чтобы при прохождении потока высокотемпературных продуктов сгорания боковая поверхность одиночной капли и водного массива находилась на расстоянии 2–3 мм от спая термопары). При таком подходе реализовывалось измерение температуры в окрестностях поверхности пролетающих массивов и капель. В остальном методика проведения исследований аналогична методике, применявшейся в экспериментах с распыленным водным потоком.

Результатом проведения каждой серии экспериментов служили зависимости, отражающие динамику изменения температуры газов в цилиндре 12. По завершении каждой серии осуществлялась обработка данных по температуре. При этом определялись следующие параметры:

1) ΔT_g — снижение температуры продуктов сгорания в следе капельного потока, одиночной капли либо водного массива относительно ее начальных значений (до момента прохождения каплями сечений, в которых устанавливались термопары), К; $\Delta T_g = T_g - T'_g$; T_g — начальная температура продуктов сгорания, К; T'_g — минимальная температура продуктов сгорания после воздействия на них капельным потоком, одиночной каплей либо большим массивом, К;

2) τ — время сохранения пониженных (относительно начальных) температур продуктов сгорания в следе капельного потока, одиночной капли либо водного массива, с; $\tau = \tau_2 - \tau_1$; τ_1 — время, соответствующее началу снижения температуры продуктов сгорания (момент подачи импульса), с; τ_2 — время, соответствующее моменту полного восстановления

температуры продуктов сгорания до ее первоначального значения.

Кроме того, при анализе полученных результатов (по аналогии с работами [10, 11]) вычислялся параметр ΔR , отражающий уменьшение размера капли после прохождения ими расстояния 1 м в потоке продуктов сгорания: $\Delta R = (R_d - R_d^*)/R_d \cdot 100\%$ (где R_d, R_d^* — радиус капель соответственно на входе в цилиндрический канал и на выходе из него, мм).

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены полученные в экспериментах с одиночными каплями и массивами воды значения времени восстановления температуры продуктов сгорания в следе τ . Исследования показали, что при варьировании температуры T_g в интервале 350–950 К времена восстановления температуры продуктов сгорания в следе одиночных капель и больших массивов не превышают, как правило, 5–10 с. При этом эксперименты проводились с расположением спая термопар на линии траектории перемещения капли (последняя соприкасалась со спаем) и в непосредственной близости от нее (в нескольких миллиметрах). Аналогичные условия обеспечива-

лись в экспериментах с массивами воды. Установлено, что времена τ на границе капли и на оси ее движения различаются не более чем на 1–2 с, для водного массива — на 2–3 с. Выявленные особенности иллюстрируют, что в первом приближении в опытах с одиночными крупными каплями можно использовать любую из двух предложенных схем контроля температуры в следе.

Наиболее интенсивное снижение температуры продуктов сгорания в следе тушащей среды зафиксировано в экспериментах с аэрозольным потоком. Так, на рис. 4 и 5 приведены установленные в экспериментах значения времени сохранения температурных следов аэрозолей воды при варьировании размеров капель R_d , их концентрации в потоке γ_d и температуры продуктов сгорания T_g .

Полученные в экспериментах значения τ иллюстрируют достаточно существенный рост длительности сохранения более низких (относительно начальных) значений температур газов в следе капель воды при увеличении размеров и концентрации последних (см. рис. 4 и 5). Установленный эффект обусловлен влиянием нескольких факторов.

Во-первых, рост концентрации и размеров капель приводит к существенному увеличению площади поверхности испарения жидкости и, как следствие, к достаточно интенсивному росту концентрации паров воды в зоне горения и снижению температуры парогазовой смеси за счет эндотермического фазового превращения (вследствие высокой теплоты парообразования воды — более 2 МДж/кг). Этот фактор обуславливает вытеснение окислителя и продуктов сгорания из пламени. При этом существенно замедляются химические превращения, что приводит к выделению энергии. Капли прогреваются на большую глубину, и процесс вдува паров с их поверхности дополнительно интенсифицируется.

Во-вторых, из анализа видеogramм проведенных экспериментов можно сделать заключение, что рост размеров и концентрации капель в газовой среде приводит к минимизации доли капель, уносимых встречным потоком продуктов сгорания. В экспериментах [10, 11] установлены масштабы влияния скоростей встречного движения газов на направление и скорости перемещения капель. Выделены группы капель по размерам (радиусам) [10, 11], которые испаряются за короткий интервал времени и практически в полном объеме уносятся газами. Например, при размере капель менее 100 мкм практически 80–90 % от их начального количества испарялось еще на входе в высокотемпературный канал (цилиндр 12) и уносилось продуктами сгорания. Вследствие этого их влияние на время сохранения температурного следа минимально для данных условий эксперимента. Капли размером от 100 до 250 мкм в

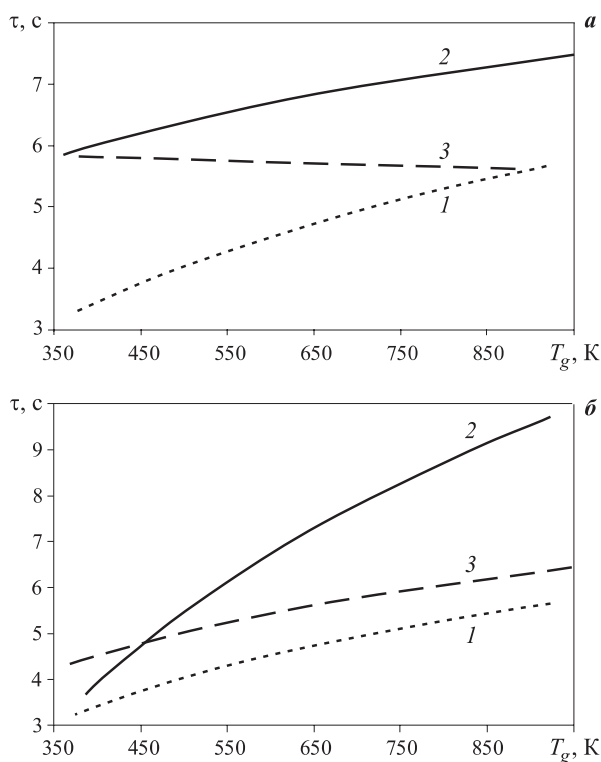


Рис. 3. Зависимость времен τ сохранения пониженной температуры в следе одиночных крупных капель (а) и водных массивов (б): 1 — при собственных колебаниях температуры продуктов сгорания (при отсутствии внешнего воздействия); 2 — при нахождении термопары на расстоянии 1–3 мм от боковой поверхности пролетающей капли/массива; 3 — при нахождении термопары на оси движения пролетающей капли (массива)

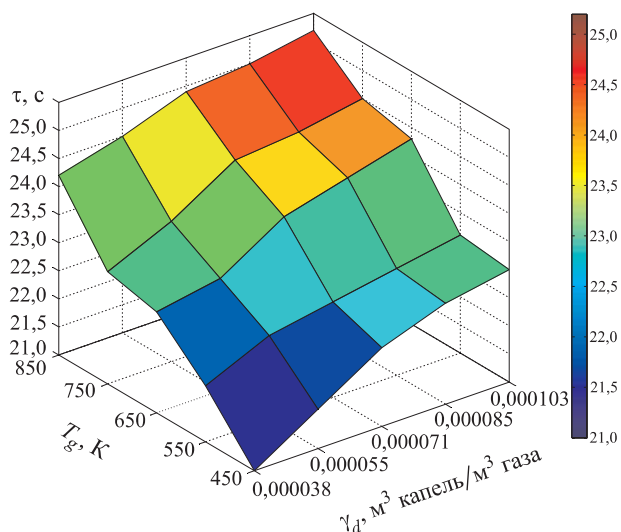


Рис. 4. 3D-зависимость времен сохранения пониженной температуры в следе капельного облака при разных температурах продуктов сгорания и концентрациях капель в аэрозоле ($U_g \approx 0,8$ м/с; $T_w \approx 300$ К; $R_d \approx 0,15 \div 0,30$ мм)

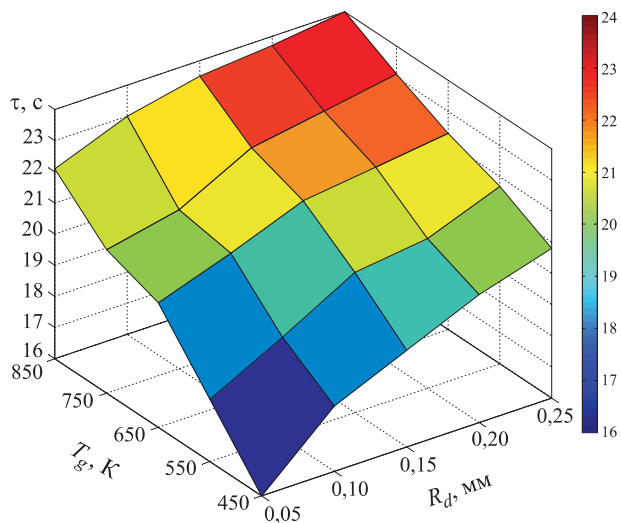


Рис. 5. 3D-зависимость времен сохранения пониженной температуры в следе капельного облака при разных размерах капель в аэрозольном потоке и температурах продуктов сгорания ($\gamma \approx 7,1 \cdot 10^{-5}$ м³ капель/м³ газа; $U_g \approx 0,8$ м/с; $T_w \approx 300$ К)

условиях проведенных экспериментов испарялись на 60–70 % [10, 11]. Для капель размером от 250 до 400 мкм установлены существенно меньшие скорости испарения [10, 11]: характерный размер капель уменьшался вследствие испарения всего лишь на 30–50 %. Именно поэтому такие достаточно крупные капли продолжали движение во встречном потоке продуктов сгорания, несмотря на интенсивное испарение и торможение.

В-третьих, экспериментально обоснована [22] теоретическая гипотеза [14] о существенном влиянии на снижение температуры газов первых капель во фронте движения последующих. Показано [22], что при расположении капель друг от друга на расстоя-

нии, равном нескольким их характерным диаметрам (особенно до 5–7), температуры в следе первой, второй и третьей капель могут отличаться более чем на несколько сотен градусов. Учитывая обоснованный в опытах [10, 11] экспоненциальный характер зависимости скорости испарения капель жидкостей, растворов, эмульсий и суспензий от температуры их поверхности и внешней газовой среды, можно сделать вывод о существенно различающихся скоростях испарения первой, второй и всех последующих капель. Экспериментальное подтверждение данных выводов представлено в работе [22]. Рост концентрации капель γ_d в потоке газов приводит к уменьшению расстояния между последними и, как следствие, к усилению указанных выше эффектов.

На рис. 4 и 5 видно, что чем выше начальная температура газов (продуктов сгорания), тем более существенно растет время сохранения температурных следов τ . Этот результат можно отнести к неочевидному. До проведения экспериментов можно было предположить, что на температуру в следе газов с меньшими начальными значениями T_g аэрозольный поток должен оказывать большее влияние и времена τ будут соответствующими. Однако полученные экспериментальные данные свидетельствуют об обратном эффекте, который можно объяснить определяющей ролью процесса испарения в снижении температуры газов в зоне горения. Чем выше температура газов, тем больше скорость парообразования, которая увеличивается экспоненциально [10, 11]. Вследствие этого нелинейно растет расходуемая на эндотермические фазовые превращения доля энергии газов и существенно снижается температура в зоне горения.

Следует отметить общую для рис. 4 и 5 закономерность. Она заключается в том, что время τ с ростом размеров и концентрации капель выходит по температуре в следе T'_g на некоторые практически стационарные значения, т. е. изменяется в довольно узком диапазоне. Такая особенность позволяет прогнозировать, что дальнейший рост γ_d и R_d не приведет к существенному изменению параметра τ . Следовательно, подача больших масс воды в зону горения будет избыточной, т. е. практически не будет влиять на снижение температуры T'_g . Этим отчасти объясняется низкая эффективность при тушении лесных пожаров посредством сброса больших объемов воды [2–4]. Полученные результаты обусловлены, скорее всего, высокой концентрацией жидкой и паровой фаз по сравнению с газами, что приводит к некоторому замедлению парообразования, т. е. стабилизации процесса вследствие ограниченной диффузии паров воды.

При сопоставлении рис. 3 с рис. 4 и 5 можно отметить, что время существования температурных

следов больших фрагментов жидкости (крупные капли или массивы) в несколько раз меньше по сравнению с аэрозолем. Полученные результаты обусловлены, главным образом, тем, что площади испарения жидкости для массивов меньше, чем при использовании аэрозоля. Выполненные оценки показали, что эти параметры для рассмотренных массивов и аэрозолей различаются в десятки раз. Кроме того, распыление воды приводит к интенсификации ее прогрева и росту скоростей парообразования по сравнению с массивом. Этим можно объяснить установленные в настоящей работе более низкие температуры в следе массивов по сравнению с аэрозолями. Однако нераспыленные массивы характеризуются и довольно ограниченными по поперечной координате температурными следами, что можно объяснить малыми временами восстановления температуры в следе до ее первоначальных значений.

Полученные результаты позволяют утверждать, что наиболее эффективный способ снижения температуры пламени — это воздействие на него аэрозольным потоком тушащего состава. При прогнозировании же значений τ и ΔT_g необходимо учитывать параметры распыления тушащей среды (размеры генерируемых капель, концентрация капель в потоке) и характеристики пожара (температура продуктов сгорания). Причем для снижения температуры T_g необязательно использовать непрерывный распыл, достаточно обеспечить импульсную подачу аэрозоля

в область очага пожара с задержкой между импульсами менее установленных значений τ .

Заключение

Выполненные эксперименты показали существенное (от 15 до 140 К) снижение температуры продуктов сгорания в следе капель воды даже при использовании аэрозольного потока с малыми размерами капель. Установлено, что времена сохранения пониженных температур в следе капель воды могут достигать нескольких десятков секунд. Показано, что в случае применения малых капель снижение температуры в их следе обусловлено интенсивными эндотермическими фазовыми превращениями. Для больших массивов воды, напротив, снижение температуры в следе вызвано главным образом интенсивным теплообменом газов с относительно холодной жидкостью. Полученные экспериментальные данные могут послужить основой для разработки способа эффективного снижения температуры пожара (пламени и продуктов сгорания) в технологиях полидисперсного аэрозольного пожаротушения.

Исследование проведено за счет средств Российского научного фонда (проект 14-39-00003). Анализ характеристик аэрозольных потоков выполнен при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для молодых ученых (СП-2290.2015.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доррер Г. А., Якимов С. П., Васильев С. А. Прогнозирование динамики распространения лесных пожаров в России // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2010. — № 4. — С. 65–67.
2. Москвиллин Е. А. Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. — 2009. — № 1. — С. 82–92.
3. Коршунов Н. Авиационное тушение лесных пожаров: эффективность репортажей и эффективность технологий // Авиапанорама. — 2011. — № 4. — С. 10–13.
4. Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е., Федоткин Д. В., Москвиллин Е. А., Стрижак П. А., Карпов В. Н. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // Пожарная безопасность. — 2015. — № 2. — С. 49–55.
5. Konishi T., Kikugawa H., Iwata Y., Koseki H., Sagae K., Ito A., Kato K. Aerial firefighting against urban fire: Mock-up house experiments of fire suppression by helicopters // Fire Safety Journal. — 2008. — Vol. 43, Issue 5. — P. 363–375. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.10.005.
6. 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.
7. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
8. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
9. Терпигорьев В. Водяной туман как средство защиты объектов культуры // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 5. — С. 18–20.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases // Technical Physics. — 2014. — Vol. 59, Issue 7. — P. 959–967. DOI: 10.1134/s1063784214070263.

11. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения пресной и соленой воды при движении через пламя // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2014. — № 2. — С. 18–23.
12. Стрижак П. А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
13. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние структуры распыленной воды на температуру и концентрацию продуктов горения // Пожарная безопасность. — 2013. — № 4. — С. 47–53.
14. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2013. — Vol. 86, Issue 4. — P. 895–904. DOI: 10.1007/s10891-013-0909-9.
15. Keane R. D., Adrian R. J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. — 1992. — Vol. 49, Issue 3. — P. 191–215. DOI: 10.1007/BF00384623.
16. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. — 1997. — Vol. 8, No. 12. — P. 1379–1392. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
17. Hagiwara Y., Sakamoto S., Tanaka M., Yoshimura K. PTV measurement on interaction between two immiscible droplets and turbulent uniform shear flow of carrier fluid // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2002. — Vol. 26, Issue 2–4. — P. 245–252. DOI: 10.1016/s0894-1777(02)00133-4.
18. Dehaeck S., Van Parys H., Hubin A., Van Beeck J. P. A. J. Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets // Experiments in Fluids. — 2009. — Vol. 47, Issue 2. — P. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
19. Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // Experiments in Fluids. — 2010. — Vol. 48, Issue 4. — P. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.
20. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Kuibin P. A., Strizhak P. A. Weber numbers at various stages of water projectile transformation during free fall in air // Technical Physics Letters. — 2015. — Vol. 41, Issue 10. — P. 1019–1022. DOI: 10.1134/s1063785015100314.
21. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion // Metrology and Measurement Systems. — 2012. — Vol. 19, No. 4. — P. 797–804. DOI: 10.2478/v10178-012-0071-2.
22. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Legros J. C., Strizhak P. A. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 95. — P. 184–197. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.001.

Материал поступил в редакцию 14 апреля 2016 г.

Для цитирования: Войтков И. С., Волков Р. С., Высокоморная О. В., Чернова Г. А., Фадеев А. В. Экспериментальное исследование температурных следов капель воды, водных массивов и аэрозольных потоков, движущихся через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 8. — С. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.17-26.

English

EXPERIMENTAL STUDY OF TEMPERATURE TRACES OF WATER DROPLETS, WATER FLOW MASSES AND AEROSOL FLOWS MOVING THROUGH HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION PRODUCTS

VOYTKOV I. S., Postgraduate Student, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: i.voytkov@ges.tomsu.ru)

VOLKOV R. S., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: romanvolkov@tpu.ru)

VYSOKOMORNAYA O. V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Postdoc, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: vysokomornaja@tpu.ru)

CHERNOVA G. A., Graduate Student, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: gac2@tpu.ru)

FADEEV A. V., Graduate Student, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: andrey.fadeev.ne@mail.ru)

ABSTRACT

The experimental investigations of temperature, varying in a trace of water droplets, water flow masses and aerosol flows, moving through high-temperature combustion products, were conducted. The temperature values of vapor-gas mixture in an area, corresponding to the trace of water droplets, moving through high-temperature combustion products (initial temperature values were 450–950 K) were measured by quick-response thermocouples (time of thermal delay was less than 1 sec). The objects of investigations were aerosol flows with droplet sizes, equal to $R_d \approx 0.04 \div 0.40$ mm, and droplet concentration, equal to $\gamma_d \approx 3 \cdot 10^{-5} \div 12 \cdot 10^{-5}$ m³ of droplets/m³ of gas; single droplets with $R_d \approx 1.5 \div 2.5$ mm, and significant water flow masses with characteristic size of 22–30 mm.

Application of the quick-response thermocouples allowed defining the ranges of maximal reduction of gaseous medium temperature T_g in a trace of extinguishing liquid according to a group of factors, such as a method of supplying of water into the combustion zone, characteristic size of the elements of liquid flow R_d , droplet concentration in a water flow γ_d , temperature of the combustion products T_g . The variation of combustion product temperature in a trace of motion of atomized flow, droplets and liquid flow masses was determined in the analysis of temperature trends, ranged from 15 K to 140 K.

The values of preservation time τ of low temperature of vapor-gas mixture in a trace of droplet flow, single droplets and significant liquid flow masses were determined relative to initial gas temperature: $\tau \approx 4 \div 28$ sec. It was experimentally defined that maximum values of time τ correspond to supplying the atomized water, with characteristic sizes of elements, equal to $R_d \approx 0.15 \div 0.30$ mm, and concentration, equal to $\gamma_d \approx 3 \cdot 10^{-5} \div 12 \cdot 10^{-5}$ m³ of droplets/m³ of gas, into the standardized fire.

The conditions when the characteristics of temperature and concentration traces have significant influence on processes of evaporation and heat exchange between gases and moving liquid (with accumulation of liquid energy) were determined. The ascertained experimental data prove the earlier made theoretical hypothesis about sufficiently long periods of preservation the temperature traces of water droplets, even if they are small. The obtained experimental information become the basis for developing the method of the effective reduction of fire temperature (flame and combustion products) in the technologies of polydisperse aerosol fire extinguishing.

Keywords: water droplet; aerosol; water flow mass; evaporation; high-temperature combustion products; temperature trace; fire extinguishing.

REFERENCES

1. Dorrer G. A., Yakimov S. P., Vasilyev S. A. Forecasting of dynamics of distribution of wildfires in Russia. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere (Management Issues of the Risks in Technosphere)*, 2010, no. 4, pp. 65–67 (in Russian).
2. Moskvilin Ye. A. Aviation usage for the suppression of forest fires. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2009, no. 1, pp. 89–92 (in Russian).
3. Korshunov N. Aviation extinguishing forest fires: efficiency reporting and efficiency technologies. *Aviapanorama (Airscape)*, 2011, no. 4, pp. 10–13 (in Russian).
4. Kopylov N. P., Khasanov I. R., Kuznetsov A. Ye., Fedotkin D. V., Moskvilin Ye. A., Strizhak P. A., Karpov V. N. Water dumping parameters at suppression of wildfires by aviation. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2015, no. 2, pp. 49–55 (in Russian).

5. Konishi T., Kikugawa H., Iwata Y., Koseki H., Sagae K., Ito A., Kato K. Aerial firefighting against urban fire: Mock-up house experiments of fire suppression by helicopters. *Fire Safety Journal*, 2008, vol. 43, issue 5, pp. 363–375. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.10.005.
6. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Automated water fire-fighting system with use of water spray at power plants. *Energetik (Power Engineer)*, 2008, no. 6, pp. 37–38 (in Russian).
7. Segal M. D. Applying the water mist for increase the fire protection of cable constructions of APS. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy (Problems of Security and Emergencies)*, 2011, no. 4, pp. 61–64 (in Russian).
8. Salamov A. A. Modern high pressure fire-fighting system “water mist”. *Energetik (Power Engineer)*, 2012, no. 3, pp. 16–18 (in Russian).
9. Terpigoryev V. S. Water mist as a means of cultural objects protection]. *Algoritm bezopasnosti (Security Algorithm)*, 2006, no. 5, pp. 18–20 (in Russian).
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics*, 2014, vol. 59, no. 7, pp. 959–967. DOI: 10.1134/s1063784214070263.
11. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of integrated evaporation characteristics for fresh and salty water at moving through the flame. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya (Fires and Emergency Fields: Prevention, Elimination)*, 2014, no. 2, pp. 18–23 (in Russian).
12. Strizhak P. A. Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture. *Pozharovzryvbezopasnost (Fire and Explosion Safety)*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 26–31 (in Russian).
13. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of water spray structure on the temperature and concentration of combustion products. *Pozharnaya bezopasnost (Fire and Explosion Safety)*, 2013, no. 4, pp. 47–53 (in Russian).
14. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, issue 4, pp. 895–904. DOI: 10.1007/s10891-013-0909-9.
15. Keane R. D., Adrian R. J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research*, 1992, vol. 49, issue 3, pp. 191–215. DOI: 10.1007/BF00384623.
16. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 1997, vol. 8, no. 12, pp. 1379–1392. DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/002.
17. Hagiwara Y., Sakamoto S., Tanaka M., Yoshimura K. PTV measurement on interaction between two immiscible droplets and turbulent uniform shear flow of carrier fluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, vol. 26, issue 2–4, pp. 245–252. DOI: 10.1016/s0894-1777(02)00133-4.
18. Dehaeck S., Van Parys H., Hubin A., Van Beeck J. P. A. J. Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets. *Experiments in Fluids*, 2009, vol. 47, issue 2, pp. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
19. Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet. *Experiments in Fluids*, 2010, vol. 48, no. 4, pp. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.
20. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Kuibin P. A., Strizhak P. A. Weber numbers at various stages of water projectile transformation during free fall in air. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 10, pp. 1019–1022. DOI: 10.1134/s1063785015100314.
21. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion. *Metrology and measurement systems*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 797–804. DOI: 10.2478/v10178-012-0071-2.
22. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Legros J. C., Strizhak P. A. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 95, pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.001.

For citation: Voytkov I. S., Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Chernova G. A., Fadeev A. V. Experimental study of temperature traces of water droplets, water flow masses and aerosol flows moving through high-temperature combustion products. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 8, pp. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.17-26.