

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)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ, ДВИЖУЩИХСЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Проведено экспериментальное исследование основных закономерностей испарения группы (двух, трех и четырех) капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные (около 1100 К) газы. Характерные размеры (радиусы) капель (1–3 мм), начальные расстояния между ними (4–36 мм), исходные скорости движения (0,5–2 м/с), а также скорости встречного перемещения высокотемпературных газов (1,5 м/с) варьировались в типичных для перспективных высокотемпературных газопарокапельных приложений диапазонах. С использованием средств высокоскоростной (до $6 \cdot 10^5$ кадров в секунду) видеорегистрации “Phantom”, программных комплексов “Tema Automotive” и “Phantom Camera Control” установлены характерные скорости движения и уменьшение характерных размеров каждой из капель при изменении расстояний между ними в широком диапазоне (от сопоставимых с размерами капель дократно превышающих их). Определены условия коагуляции капель, их торможения и ускорения в высокотемпературном газовом потоке. Выявлено влияние на интенсивность этих процессов начальных размеров капель, расстояния между ними, начальной температуры жидкости, а также числа капель и траектории их движения во встречном потоке высокотемпературных (около 1000 К) газов. Экспериментально обоснован один из наиболее типичных механизмов коагуляции капель в высокотемпературных газовых средах.

Ключевые слова: высокотемпературные газы; капли воды; последовательное движение; коагуляция; испарение.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.6-15

Введение

Пожаротушение с применением капельных потоков, тонкораспыленной воды, водяных завес, различного рода аэрозолей является на сегодняшний день одним из самых распространенных способов борьбы с огнем [1–7]. Развитие перечисленных технологий невозможно без фундаментальных исследований тепломассопереноса при взаимодействии потоков, струй и капель воды с высокотемпературными (более 1000 К) продуктами сгорания. Для экс-

периментальных исследований таких быстропротекающих процессов требуется современное оборудование: системы высокоскоростной фото- и видеорегистрации, комплексы на базе панорамных оптических методов диагностики гетерогенных сред и потоков. Использование такого оборудования при проведении экспериментов дает возможность исследовать процессы движения и испарения капельных потоков в продуктах сгорания с высокой степенью точности. Особо следует отметить бесконтактные

оптические методы “Particle Image Velocimetry” (PIV), “Particle Tracking Velocimetry” (PTV), “Stereo Particle Image Velocimetry” (Stereo PIV), “Interferometric Particle Imaging” (IPI) и “Shadow Photography” (SP) [8–13], использование которых позволило установить основные закономерности сложных процессов смешения газопарокапельных потоков в условиях интенсивных фазовых превращений и химического реагирования [14–16]. В исследованиях установлены интегральные характеристики испарения воды, а также эмульсий и суспензий на ее основе; определены условия полного испарения капль распыленной воды в зоне высокотемпературных продуктов сгорания; выявлены масштабы влияния начальной скорости и температуры капль на интенсивность испарения последних [14]. Кроме того, проанализированы траектории движения и деформации капль во встречном потоке высокотемпературных продуктов сгорания; установлены предельные расстояния, которые проходят капли в высокотемпературных газах до полного торможения и последующего разворота [15]. Определены типичные механизмы коагуляции элементов жидкостного потока, а также выполнен статистический анализ указанного процесса [16]. В работе [17] показано, что для высокотемпературных (более 1000 К) газопарокапельных потоков вследствие интенсификации теплообмена значительную роль играет процесс коагуляции капль. На базе экспериментальных результатов, представленных в [17], выдвинута гипотеза о том, что движущиеся в потоке капли оказывают влияние друг на друга. При этом влияние впереди идущих капль на скорости движения и испарения последующих зависит от размеров капль и расстояний между ними. Аналогичные выводы сформулированы и по результатам численного моделирования движения нескольких капль через высокотемпературные (около 1100 К) газы на основе температурных полей и распределений концентрации газов и паров вокруг капль, а также в их следе [18]. Однако экспериментального обоснования выдвинутой гипотезы [17, 18] пока не получено. Кроме того, не установлено, для каких размеров капль, их концентрации в газовой среде (или расстояний между ними) и температур выявленные эффекты могут быть определяющими или оказывать довольно умеренное влияние на процессы тепломассопереноса. Особенно интересны эффекты коагуляции капль, последовательно перемещающихся через газы с очень высокими (более 1000 К) температурами, соответствующими условиям типичных пожаров. Целесообразным представляется проведение экспериментов для установления взаимного влияния на интенсивность процессов тепломассопереноса малых

групп капль (например, двух, трех или четырех) при движении в высокотемпературных газах.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование закономерностей последовательного движения и испарения нескольких капль воды через продукты сгорания с высокой (около 1100 К) температурой, соответствующей типичным пожарам.

Методика экспериментальных исследований

При проведении исследований использовался стенд, схема которого приведена на рис. 1. Стенд представлял собой регистрационный комплекс на базе высокоскоростных видеокамер 1 “Phantom V411” и “Phantom Miro M310” (частота съемки — до 10^6 кадров в секунду). Для обработки и анализа полученных при фото- и видеорегистрации данных использовалось программное обеспечение “Phantom Camera Control”, а также программный комплекс с функцией непрерывного слежения “Tema Automotive” [19, 20]. Исследовались процессы последовательного перемещения нескольких (двух, трех и четырех) капль воды. Для этого разработано специализированное дозирующее устройство для последовательного сброса капль 10 (см. рис. 1).

Каждый эксперимент включал следующие этапы:

- во внутреннюю область полого цилиндра 13 заливалась горючая жидкость (керосин) в количестве 200 мл, инициировалось ее зажигание, после чего на подложку 13 устанавливался цилиндр из кварцевого стекла 12;
- по истечении 200 с (время, необходимое для прогрева внутренней полости цилиндра 12 до контролируемых температур) вода, находящаяся в емкости 8, поступала в специализированное дозирующее устройство, при помощи которого производилась генерация капль фиксированного объема и их перемещение в устройство последовательной подачи капль 10;
- устройством 10 осуществлялась последовательная подача капль воды в высокотемпературную газовую среду (внутренняя область канала 12). Одновременно с этим выполнялась процедура видеорегистрации последовательного перемещения капль (по оси симметрии канала сверху вниз) в высокотемпературной газовой среде видеокамерами 1 на разных по высоте точках;
- снятые видеозаписи с камер 1 передавались в ПК 6, где выполнялись процедуры их анализа и обработки (определялись изменения расстояний между каплями L_d , их размера (радиуса) R_d , скорости U_d).

В экспериментах использовалась дистиллированная вода. Перед началом каждой серии экспериментов проводился контрольный замер массы генери-

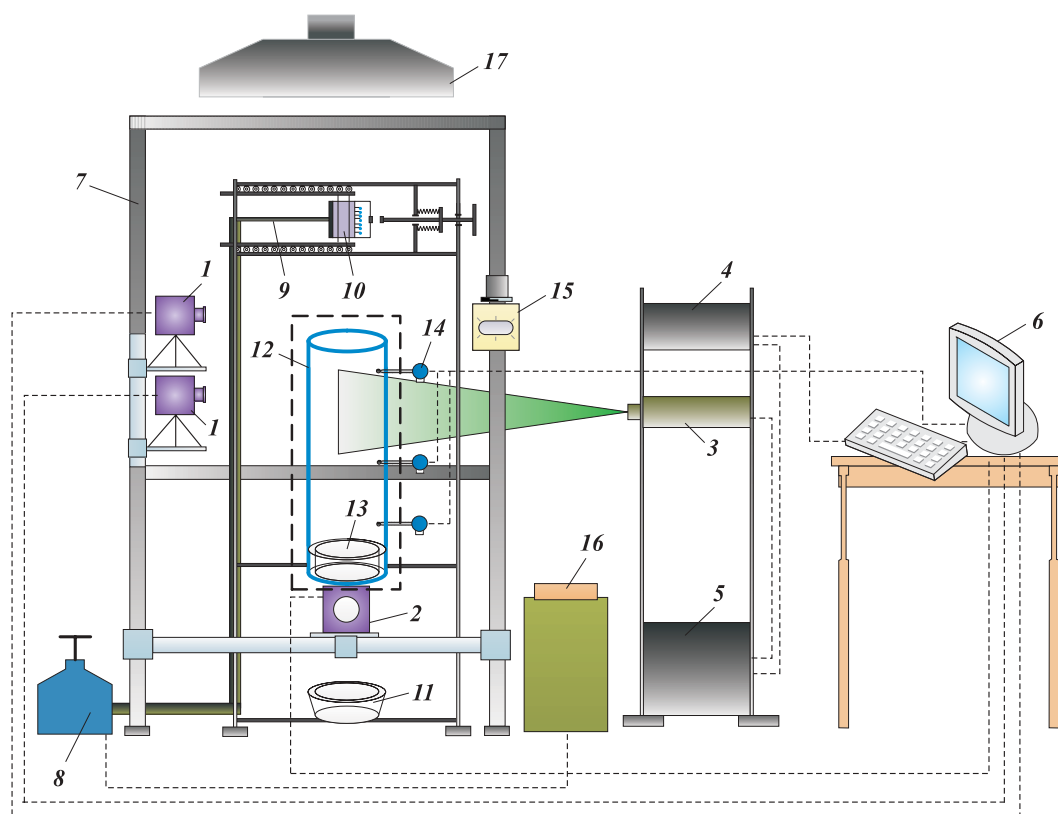


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — высокоскоростные видеокамеры; 2 — кросскорреляционная видеокамера; 3 — двойной твердотельный импульсный лазер; 4 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 — генератор лазерного излучения; 6 — ПК; 7 — штатив; 8 — емкость с водой; 9 — канал подачи воды; 10 — дозирующее устройство; 11 — уловитель; 12 — цилиндр из кварцевого стекла; 13 — полый цилиндр с горючей жидкостью; 14 — термопары; 15 — прожектор; 16 — нагревательная установка; 17 — нагнетательная система

руемых капель воды M_d микровесами “ViBRA НТ 84RCE” (дискретность 10^{-5} г). Проводился контрольный расчет объема капли V_d по формуле $V_d = \rho_w / M_d$ (где ρ_w — плотность дистиллированной воды при температуре 300 К; $\rho_w = 996,5$ кг/м³).

Начальная температура воды T_w в емкости 8 изменялась в диапазоне 275–350 К при помощи установки 16 и контролировалась хромель-копелевой термопарой (диапазон измеряемых температур 273–473 К, систематическая погрешность $\pm 1,5$ К). Максимальная случайная погрешность измерения T_w составляла 3 К.

Температура газовой среды T_g регистрировалась хромель-алюмелевыми термопарами 14 (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, систематическая погрешность ± 3 К) в нескольких по высоте точках цилиндра 12 (см. рис. 1) и составляла около 1100 К. Максимальная случайная погрешность измерения T_g — 30 К.

Скорость продуктов сгорания U_g в цилиндре 12 измерялась (в качестве предварительной оценки) лопастным анемометром типа “UnionTest AN110” (максимальная погрешность 0,1 м/с) и составляла около 1,5 м/с. Изменение скорости продуктов сгорания осуществлялось при помощи нагнетательной

системы 17. Для более точных измерений U_g использовался кросскорреляционный регистрационный комплекс в составе двойного импульсного лазера 3 с генератором излучения 5, синхронизатора сигналов 4 и кросскорреляционной видеокамеры 2. Измерения проводились перед началом каждой экспериментальной серии. В нижнюю часть цилиндрического канала 12 вводились “трассирующие” частицы, которые впоследствии продолжали свое движение в потоке продуктов сгорания. Образы частиц подсвечивались лучом лазера 3, регистрировались видеокамерой 2 и передавались на персональный компьютер 6, где осуществлялась обработка данных. Строились регулярные двухкомпонентные поля скоростей газового потока. Систематические погрешности определения U_g в экспериментах составляли 0,01 м/с.

Характерные расстояния между каплями L_d , размеры R_d , а также скорости их перемещения U_d в газовом потоке контролировались с применением методов и алгоритмов программного обеспечения “Тема Automotive” [19, 20]. Для определения траекторий движения капель в каждой серии экспериментов проводился контрольный опыт, в результате которого капли, движущиеся в канале 12, синхронно регистрировались (с частотой $5 \cdot 10^3$ кадров в секунду)

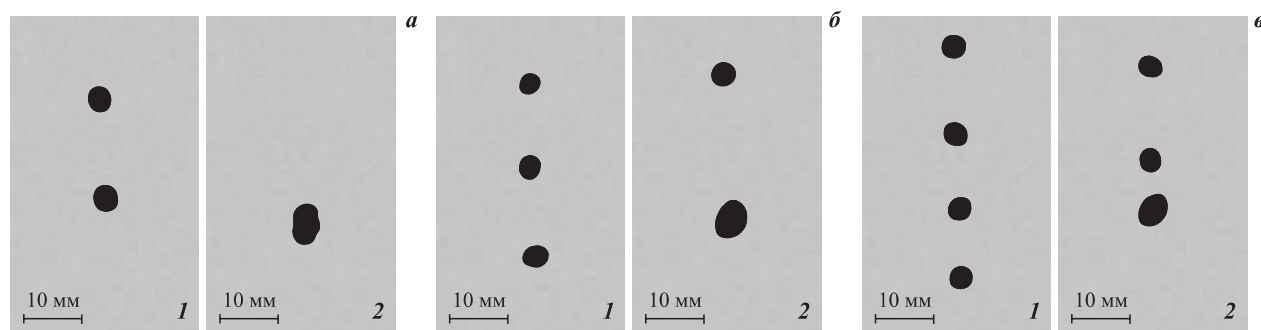


Рис. 2. Кадры видеополос с изображениями последовательно движущихся двух (а), трех (б) и четырех (в) капель воды на входе (1) и выходе (2) из зоны высокотемпературных газов

двумя высокоскоростными видеокамерами 1, оптические оси которых располагались перпендикулярно друг к другу. Такой подход позволял оценить взаимное расположение капель во всех трех плоскостях. Если центры масс капель на каком-либо участке траекторий их движения отклонялись на расстояние более чем $0,05R_d$ друг от друга по горизонтали относительно направления своего движения, то эти эксперименты исключались из рассмотрения и дальнейшего анализа. С использованием алгоритмов “Correlation” и “Circular Symmetry” программного комплекса “Tema Automotive” [19, 20] определялись характерные расстояния между каплями L_d (в течение интервала времени движения через канал 12), их траектории движения и скорости U_d в регистрационной области. Систематические погрешности определения L_d не превышали 10^{-5} м, U_d — 0,02 м/с. С помощью специализированных координатных сеток с шагом до 10^{-6} мм вычислялись три характерных диаметра капли и определялось их среднее значение, по которому устанавливался радиус капли R_d . Начальные значения R_d изменялись в проведенных экспериментах в диапазоне 1–3 мм. Максимальные погрешности определения R_d достигали 0,004 мм.

Для оценки взаимного влияния капель на характеристики их перемещения в области высокотемпературных продуктов сгорания в рассмотрение был введен параметр ΔL_d , отражающий уменьшение расстояния между двумя последовательно перемещающимися каплями после прохождения ими расстояния 1 м в потоке высокотемпературных продуктов сгорания: $\Delta L_d = (L_{d0} - L_d)/L_{d0} \cdot 100\%$ (где L_{d0} , L_d — расстояние между последовательно перемещающимися каплями соответственно на входе и выходе из зоны высокотемпературных продуктов сгорания).

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены типичные кадры с изображениями последовательно движущихся капель на разных начальных расстояниях друг от друга и

в разные моменты времени (на входе и выходе из зоны высокотемпературных газов).

Следует отметить несколько установленных в эксперименте особенностей процесса последовательного движения капель через высокотемпературные газы. Измерения скоростей перемещения капель показали (рис. 3), что они изменяются существенно нелинейно не только для капель разных размеров R_d и с разными начальными значениями скорости U_d . Впереди идущие капли оказывают значительное влияние на скорости перемещения последующих (последние двигаются с большей скоростью, чем впереди идущие). При этом нелинейное изменение скоростей перемещения капель, очевидно, вызвано не только действием массовых и инерционных сил.

Установлено, что чем меньше начальное расстояние между двумя последовательно движущимися каплями L_d , тем значительнее возрастает разница между скоростями этих капель (ускоряется процесс коагуляции). На рис. 3 эту разницу нельзя назвать значительной, тем не менее приведенные кривые хорошо иллюстрируют ускорение второй капли в следе тормозящейся первой. В частности, видно, что

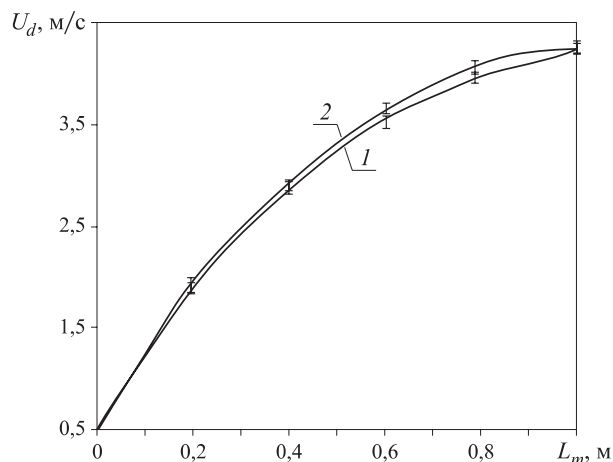


Рис. 3. Изменение скоростей движения двух капель в проведенных экспериментах при начальном расстоянии между ними $L_{d0} \approx 8$ мм и размерах $R_d \approx 1,5$ мм: 1, 2 — первая и вторая капли; L_m — расстояние, пройденное каплями в газовой среде, м

на начальном участке (пройденное каплями расстояние не более 0,3 м) скорости всех капель идентичны, что связано с инерционностью прогрева капель. Ускорения движения капель снижаются (кривые изменяют наклон) после их прогрева и интенсификации процесса испарения. При этом скорость второй капли относительно первой возрастает. Дальнейшее сближение кривых означает, что последующая капля настигла впереди идущую и слилась с ней. Установленные закономерности подтверждают гипотезу [17] о различии характеристик движения и испарения впереди идущих и последующих капель в высокотемпературной газовой среде. При этом аналогичные особенности установлены и для капель, траектории движения которых смещены относительно друг друга в пределах одного характерного радиуса. Интенсивный вдув паров воды с более низкой по сравнению с газами температурой и формирование “холодного” парового потока в следе первой капли создают условия для коагуляции со второй, даже если траектория ее движения незначительно смещена относительно траектории движения первой капли (проводились дополнительные серии опытов). В этом случае масштаб влияния впереди идущих капель уменьшается, но процессы их коагуляции с каплями, идущими в следе, все же реализуются. Полученный результат иллюстрирует, что влияние первых капель распространяется не только на последующие, движущиеся по той же траектории. При проведении теоретических исследований [18] установлено, что такое влияние может быть значительным лишь при расхождении траекторий последовательно движущихся капель не более чем на 1,5–2,0 характерных радиуса этих капель. В экспериментах зафиксированы меньшие предельные отклонения траекторий (не более одного характерного радиуса капель).

В отличие от экспериментов с распыленной водой [14–17] в проведенных опытах процессы столкновения последовательно движущихся капель завершались только коагуляцией (ни в одном из экспериментов не зарегистрированы столкновения с последующим разлетом капель или дроблением на более мелкие). Эта особенность обусловлена сонаправленным движением капель и существенно меньшими характерными числами Вебера (не более 7) после слияния даже трех капель в проведенных экспериментах по сравнению с опытами [14–17]. Значения чисел Вебера в экспериментах [14–17] после столкновения капель составляли $We > 15 \div 20$.

На рис. 4 представлена зависимость параметра ΔL_d от начального расстояния между двумя последовательно движущимися каплями L_{d0} при разных начальных значениях скорости V_d .

Из рис. 4 видно, что чем меньше начальное расстояние между каплями L_{d0} , тем устойчивее реализуется процесс их сближения и последующего слияния. Хорошо прослеживается механизм, соответствующий гипотезе [17], сформулированной на основе результатов численного моделирования. “Первая” капля интенсивно испаряется в высокотемпературных газах, и в ее следе формируется область водяных паров с существенно более низкой относительно внешней газовой среды температурой. Следующая капля, проходя через область, заполненную парогазовой смесью со сниженной температурой, прогревается менее интенсивно. В результате размеры “первой” капли достаточно быстро уменьшаются, масса же второй капли изменяется существенно медленнее. За счет указанных эффектов и массовых сил последующая капля настигает “первую”, и происходит коагуляция.

В результате экспериментальных оценок установлено, что уменьшение начальных размеров капель приводит к усилению эффекта торможения первой и ускорения последующей. В частности, на рис. 4 видно, что при меньших значениях начальных объемов V_d капли сближаются быстрее. Влияние выявленного эффекта не является определяющим, однако прослеживается во всех экспериментах, особенно при начальном объеме $V_d < 15$ мкл. Уменьшение объема V_d приводит к нелинейному снижению характерных времен прогрева капель и, как следствие, к росту скорости испарения. Это, в свою очередь, усиливает торможение интенсивно испаряющейся первой капли. Температура в малой окрестности траектории движения последующей капли снижается, и она прогревается медленнее. В таких условиях относительно “холодная” вторая капля догоняет первую быстрее.

Из анализа видеogramм проведенных экспериментов также установлено, что уменьшение начальных скоростей (от 2 до 0,2 м/с) последовательно дви-

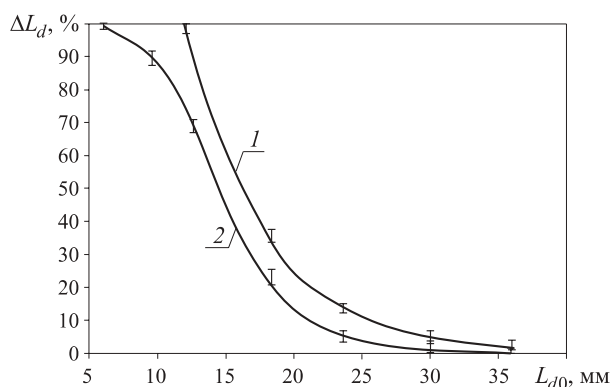


Рис. 4. Зависимость параметра ΔL_d от начального расстояния между двумя каплями после прохождения зоны с высокотемпературными газами при различных начальных значениях V_d : 1 — $V_d = 15$ мкл; 2 — $V_d = 30$ мкл

жущихся капель приводит к снижению времени их слияния. Это можно объяснить, в первую очередь, увеличением времени существования капель в высокотемпературной среде (при росте скорости движения капли проходят через цилиндрический канал с газами за меньшие времена). Вследствие роста этих времен капли более интенсивно прогреваются, ускоряются фазовые превращения, и возрастают действующие на капли силы сопротивления.

На рис. 5 представлены характерные значения интегрального параметра ΔR (характеризующего уменьшение радиуса капли относительно начального значения за счет испарения в высокотемпературных газах и рассчитанного по аналогии с работой [14]) для нескольких последовательно перемещающихся капель при их прохождении в высокотемпературной газовой среде дистанции протяженностью около 1 м. Можно отметить существенно нелинейные зависимости для выделенных характерных размеров капель. Значения ΔR существенно ниже по сравнению с полученными в экспериментах [14–16] для капель с начальными размерами менее 0,5 мм. Несмотря на довольно умеренное уменьшение размеров капель при движении в рассматриваемой газовой среде, рис. 5 иллюстрирует отличие значений ΔR для первой и последующих капель. После прохождения расстояния 1 м в газовой среде с температурой, превышающей 1000 К, характерные размеры второй и третьей капель еще очень близки. Результаты моделирования [18] показали, что они могут измениться на 10–15 % только после прохождения 2–3 м в соответствующей газовой среде. Тем не менее эксперименты, проведенные с целью анализа отличий размеров первой и второй капель, довольно хорошо иллюстрируют правомерность гипотезы [17].

Результаты экспериментов (см. рис. 3–5) позволяют сделать выводы о существенном влиянии начального расстояния между каплями на характеристики испарения капель воды в области высокотемпературных продуктов сгорания. Так, с ростом объемной концентрации капель в потоке уменьшается среднее расстояние между ними, поэтому капли испаряются менее интенсивно и значительно чаще коагулируют, что, в свою очередь, также приводит к снижению интенсивности их испарения. Выявленные особенности движения и испарения капель в высокотемпературных газовых потоках снижают эффективность соответствующих технологий. Например, в полидисперсном пожаротушении при параметрах распыления $R_d < 0,15$ мм (водяной “туман”) часто наблюдается полное испарение капель [14] на начальном участке их движения в области пламени, а зачастую и полный унос капельного потока высокотемпературными продуктами сгорания пожара [15]. В таком случае можно рекомендовать увеличение

объемной концентрации капель в потоке, что приведет к интенсификации процесса коагуляции капель в потоке и, как следствие, к уменьшению значений параметра ΔR . Тем самым при тех же начальных размерах капель распыленной воды можно обеспечить условия, при которых последние проникают в область пламени значительно глубже, интенсивнее снижая его температуру. При достаточно крупном распыле ($R_d > 0,3$ мм), напротив, можно рекомендовать увеличение расстояния между каплями в потоке (снижение концентрации капель).

На рис. 6 представлены результаты экспериментов по анализу влияния начальной температуры капель воды T_w на условия их последовательного перемещения в высокотемпературной газовой среде.

Можно отметить довольно умеренное влияние T_w на характеристики исследуемых процессов. Однако анализ теоретических исследований [18] показывает, что при увеличении протяженности области, за-

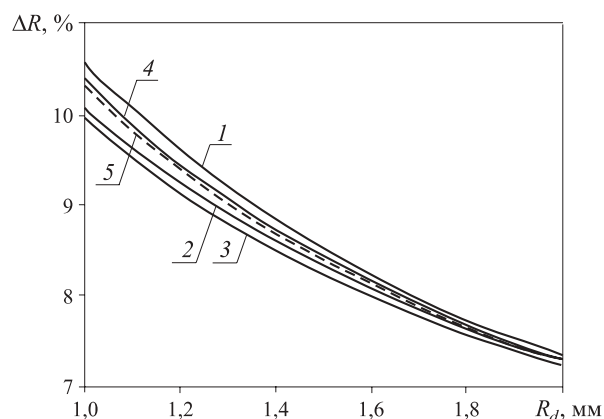


Рис. 5. Аппроксимационные зависимости, отображающие значения параметра ΔR для первой (1), второй (2, 4) и третьей (3, 5) капель после прохождения ими в высокотемпературной газовой среде дистанции протяженностью 1 м при различных начальных расстояниях между каплями: 2, 3 — $L_{d0} = 8$ мм; 4, 5 — $L_{d0} = 20$ мм

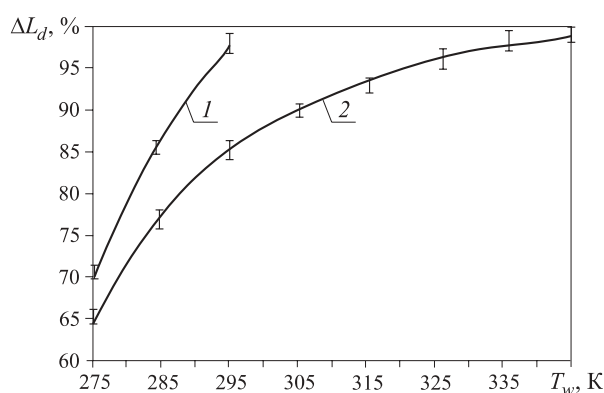


Рис. 6. Зависимость параметра ΔL_d от начальной температуры воды T_w после прохождения зоны высокотемпературных газов при различных начальных расстояниях между каплями: 1 — $L_{d0} = 8$ мм; 2 — $L_{d0} = 20$ мм

полненной высокотемпературными газами до 2–3 м по высоте (что характерно для типичных пожаров), влияние этого эффекта будет усиливаться и можно прогнозировать его определяющее влияние вследствие интенсификации фазовых превращений (особенно при уменьшении начальных размеров капель). Выявленная особенность хорошо коррелирует с результатами экспериментальных исследований механизмов перемещения и испарения капель нагретой воды в зоне продуктов горения [14]. Такой подход нередко используется при тушении возгораний, например, с применением термоактивированной воды.

Дополнительно проведены эксперименты с последовательно-параллельным движением капель через рассматриваемые высокотемпературные газы. Так, при расстояниях между характерными траекториями параллельно движущихся капель более $3R_d$ влияние впереди идущих капель на условия движения последующих минимально (последующие капли перемещаются с характеристиками, соответствующими впереди идущим). При уменьшении расстояний между последовательно и параллельно перемещающимися каплями выявленные эффекты торможения, ускорения и коагуляции зарегистрированы во всех опытах. Полученные в проведенных экспериментах зависимости и обсуждаемые эффекты соответствуют современным представлениям о тепломассопереносе, гидродинамике и механике для газопарокапельных смесей [21, 22].

Выявленные эффекты взаимного влияния капель в газовом потоке при высоких температурах на характеристики движения и тепломассопереноса очень важны для технологии полидисперсного пожаротушения в условиях интенсивного теплообмена с газовой средой, соответствующих типичным пожарам. В частности, полученные результаты позволяют прогнозировать требуемые расстояния между каплями для интенсификации их прогрева газами (за счет этого можно значительно повысить коэффициент полезного использования жидкости при тушении возгораний). Можно также прогнозировать максимальные и минимальные скорости движения капель

(соответственно, параметры работы форсуночных устройств при распыле тушащих составов) для снижения вероятности их коагуляции и усиления эффектов их прогрева.

Выводы

Проведенные эксперименты позволили обосновать гипотезу [17] о значительном взаимном влиянии капель воды в потоке на характеристики движения и испарения в высокотемпературной газовой среде. Показано, что идущие первыми капли испаряются интенсивнее по сравнению с последующими и, как следствие, быстрее тормозятся высокотемпературным встречным потоком газов. Образовавшиеся при этом пары создают условия для уменьшения скоростей прогрева и испарения последующих капель, а также снижения тормозящих их сил. Вследствие этого каждая последующая капля испаряется медленнее и движется быстрее по сравнению с впереди идущими. Проведенные эксперименты показали, что в условиях высоких (более 1000 К) температур газов этот эффект проявляется особенно наглядно. Практически во всех экспериментах зарегистрированы условия коагуляции последовательно перемещающихся капель (последующие капли настигают впереди идущие и сливаются с ними).

Выявленные закономерности последовательного перемещения нескольких капель в потоке высокотемпературных газов позволяют сделать вывод о том, что при температурах продуктов сгорания, характерных для типичных пожаров (около 1000 К), высока вероятность слияния большой группы капель, движущихся друг за другом. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных параметров распыления, а также начальных характеристик капельного жидкостного потока при движении и испарении в высокотемпературных газовых средах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 331–335.
2. 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.
3. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
4. Виноградов А. Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 45–56.

5. *Виноградов А. Г.* Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 76–87.
6. *Саламов А. А.* Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.
7. *Терпигорьев В.* Водяной туман как средство защиты объектов культуры // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 5. — С. 18–20.
8. *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.
9. *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. — P. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.
10. *Khalighi B., Lee Y. H.* Particle tracking velocimetry: an automatic image processing algorithm // Applied Optics. — 1989. — Vol. 28, No. 20. — P. 4328–4332. DOI: 10.1364/AO.28.004328.
11. *Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K.* Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows // Measurement Science and Technology. — 2000. — Vol. 11, No. 12. — P. L13–L18. DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/101.
12. *Glover A. R., Skippon S. M., Boyle R. D.* Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34, No. 36. — P. 8409–8421. DOI: 10.1364/AO.34.008409.
13. *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, No. 2. — P. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
14. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 7. — С. 15–23.
15. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Критериальные выражения для условий торможения и последующего уноса капель воды высокотемпературными газами // Журнал технической физики. — 2015. — Т. 85, № 9. — С. 50–55.
16. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Статистический анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении в высокотемпературном газовом потоке // Письма в Журнал технической физики. — 2015. — Т. 41, № 17. — С. 53–60.
17. *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.
18. *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, No. 4. — P. 895–904. DOI: 10.1007/s10891-013-0909-9.
19. *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. 2. — P. 797–804.
20. *Janiszewski J.* Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions // International Journal of Solids and Structures. — 2012. — Vol. 49, No. 7–8. — P. 1001–1008. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.01.005.
21. *Reyssat É., Chevy F., Biance A.-L., Petitjean L., Quéré D.* Shape and instability of free-falling liquid globules // Europhysics Letters. — 2007. — Vol. 80, No. 3. — P. 34005. DOI: 10.1209/0295-5075/80/34005.
22. *Flock A. K., Gueldenbecher D. R., Chen J., Sojka P. E., Bauer H. J.* Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops // International Journal of Multiphase Flow. — 2012. — Vol. 47. — P. 37–49. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.06.008.

Материал поступил в редакцию 23 февраля 2016 г.

Для цитирования: *Войтков И. С., Волков Р. С., Высокоморная О. В., Стрижак П. А.* Экспериментальное исследование закономерностей испарения капель воды, движущихся последовательно в области высокотемпературных продуктов сгорания // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 7. — С. 6–15. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.6-15.

EXPERIMENTAL STUDY OF FEATURES OF WATER DROPLETS EVAPORATION AT THE MOVING CONSISTENTLY 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.tomsk.ru)

VOLKOV R. S., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Heat and Power Process Automation Department, 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)

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of experimental investigation of cross impact of water droplets in a flow while moving and evaporation in a medium of high-temperature gases, which correspond in temperature to the typical combustion products due to a fire. We considered the sequential schemes of droplet movement and the schemes when the trajectories of droplet movement diverged relative to each other.

Materials and methods. The area full of high-temperature (about 1000 K) combustion products was created using the model of fire source (hollow cylinder of height $h = 1$ m and diameter $d = 0.15$ m). Droplets moved in the opposite direction of the gas medium. In experiments we applied the tools of high-speed video recording (up to 10^6 frames per second) and also the optical diagnostic methods of two-phase gas flows (Particle Image Velocimetry, Particle Tracking Velocimetry, Stereoscopic Particle Image Velocimetry, Shadow Photography).

Results. In experiments the decrease in typical radius ΔR of water droplets and change in distance ΔL_d between neighboring droplets was the main defining characteristics. From the experiments we determined the velocity variation of droplets moving sequentially, distance, at which the subsequent droplet catches the next one in a flow, and there is a coalescence. The influence of initial distance between neighboring droplets in a flow on their approximation while movement in a channel with high-temperature gases at various values of initial speed of droplet was investigated. Also, we determined the impact scale of the vapor trace forming from evaporation of droplets moving ahead on the evaporation intensity of the next droplets. It was revealed that heating and evaporation of the next droplets in a vapor-gas trace of preceding ones are less intense. The influence of initial water temperature on the approach and the coalescence of droplets moving subsequently in a flow of high-temperature gases were determined. It was illustrated that the previous heat-up of water accelerates the droplet coalescence in a flow under conditions of relatively short initial distances between droplets. Also, the extreme distances between droplets were defined, in providing which there is a coalescence of droplets when they pass the area of high-temperature combustion products.

Conclusions. We illustrated the satisfactory correlation of experimental results with the data of numerical simulation carried out previously. The theoretical hypothesis about the significant influence of water droplets moving ahead (through high-temperature gases) on the conditions of evaporation and movement of subsequent ones was proved experimentally.

Keywords: high-temperature gases; water droplets; consecutive movement; coagulation; evaporation.

REFERENCES

1. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems. *Vestnik MGSU (Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering)*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335 (in Russian).

2. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Automatic water-based fire extinguishing with water mist in power plants. *Energetik (Power Engineer)*, 2008, no. 6, pp. 37–38 (in Russian).
3. Segal M. D. Use water mist to increase the fire protection of cable NPP construction. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy (Safety and Emergencies Problems)*, 2011, no. 4, pp. 61–64 (in Russian).
4. Vinogradov A. G. Calculation method of water curtain shielding properties. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45–56 (in Russian).
5. Vinogradov A. G. Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76–87 (in Russian).
6. Salamov A. A. Modern fire-fighting system “water fog” of high pressure. *Energetik (Power Engineer)*, 2012, no. 3, pp. 16–18 (in Russian).
7. Terpigoryev V. Water fog as a means of protection of cultural objects. *Algoritm bezopasnosti (Safety Algorithm)*, 2006, no. 5, pp. 18–20 (in Russian).
8. 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.
9. 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.
10. Khalighi B., Lee Y. H. Particle tracking velocimetry: an automatic image processing algorithm. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, no. 20, pp. 4328–4332. DOI: 10.1364/AO.28.004328.
11. Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K. Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows. *Measurement Science and Technology*, 2000, vol. 11, no. 12, pp. L13–L18. DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/101.
12. Glover A. R., Skippon S. M., Boyle R. D. Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems. *Applied Optics*, 1995, vol. 34, no. 36, pp. 8409–8421. DOI: 10.1364/AO.34.008409.
13. 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, no. 2, pp. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
14. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The influence of initial parameters of atomized water on characteristics of its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Technical Physics Journal)*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 15–23 (in Russian).
15. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Critical expressions for conditions of deceleration and the next taking away of water droplets by high-temperature gases. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Technical Physics)*, 2015, vol. 85, no. 9, pp. 50–55 (in Russian).
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Statistical analysis of the consequences of the collision of two water droplets as they move into the high-temperature gas flow. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Technical Physics Letters)*, 2015, vol. 41, no. 17, pp. 53–60 (in Russian).
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Features of evaporation of two water droplets, moving successively through the high-temperature combustion products. *Teplofizika i aeromekhanika (Thermophysics and Aeromechanics)*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 269–272 (in Russian).
18. 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, no. 4, pp. 895–904. DOI: 10.1007/s10891-013-0909-9.
19. 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. 2, pp. 797–804.
20. Janiszewski J. Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, vol. 49, no. 7–8, pp. 1001–1008. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.01.005.
21. Reyssat É., Chevy F., Biance A.-L., Petitjean L., Quéré D. Shape and instability of free-falling liquid globules. *Europhysics Letters*, 2007, vol. 80, no. 3, p. 34005. DOI: 10.1209/0295-5075/80/34005.
22. Flock A. K., Guildenbecher D. R., Chen J., Sojka P. E., Bauer H. J. Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, vol. 47, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.06.008.

For citation: Voytkov I. S., Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Strizhak P. A. Experimental study of features of water droplets evaporation at the moving consistently through high-temperature combustion products. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 7, pp. 6–15. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.6-15.