

УДК 536.4

Движение капель мелкодисперсной жидкости в потоке высокотемпературных газов*

Г.В. Кузнецов¹, П.А. Куйбин², П.А. Стрижак¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: pavelspa@tpu.ru

Проведено экспериментальное исследование движения капель мелкодисперсной жидкости (воды) в потоке высокотемпературных (более 1000 К) газов. Установлены три режима перемещения капель в газовой среде в условиях интенсивного парообразования. Определены диапазоны изменения скоростей газов, а также скоростей и размеров капель, соответствующие выделенным режимам перемещения последних.

Ключевые слова: испарение, теплоперенос, высокотемпературные газы, капли, вода, режимы перемещения, оптические методы диагностики двухфазных потоков.

Введение

Процессы смешения газовых и парокапельных сред характеризуются достаточно сложными механизмами тепло- и массопереноса [1–7]. Так, например, в работах [2–5] представлены результаты численных и экспериментальных исследований закономерностей перемещения капель различных по теплофизическим характеристикам жидкостей в ламинарных и турбулентных газожидкостных потоках. Особую роль нередко уделяют пристенным газокапельным струям при температурах до 450 К (например, [2]). На протяжении последних десятилетий довольно часто подчеркивается (в частности, в [2, 5, 7]), что использование двухфазных газо- и парожидкостных смесей в различных технических системах сдерживается отсутствием достаточно полной экспериментальной информации, на основе которой можно было бы разработать модели и методики расчета эффективных параметров этих смесей. При высоких (более 1000 К) температурах рассматриваемые процессы сопровождаются интенсивными фазовыми превращениями [5]. Экспериментальных и теоретических результатов исследований таких процессов очень мало, если судить по обзорной работе [5]. В частности, в области «двухфазных потоков с каплями» [5] наиболее изученными считаются закономерности возбуждения акустических колебаний при горении капель жидких топлив в условиях сверхкритических давлений газовой смеси [8], течения и теплообмена импактной струи с преградой [9–12], интенсификации теплообмена при испарении капель жидких топлив в газовой среде [13–15], охлаждения теплонагруженных поверхностей аэрозолями и спреями [16–18]. Из анализа работ [5–18]

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00057).

можно сделать вывод о том, что результатов экспериментальных исследований существенно меньше по сравнению с теоретическими. Также можно заключить, что наименее изученными остаются газопарокапельные смеси и эмульсии воды, нагреваемые при температурах более 1000 К.

В то же время потребность в высокотемпературных газопарокапельных средах с использованием воды и эмульсий на ее основе в различных отраслях промышленности (например, при создании теплоносителей на базе дымовых газов и водяного пара [19], смесей для размораживания сыпучих сред [20], «тонкораспыленных» флегматизаторов горения [21]) ежегодно возрастает. Поэтому актуальна задача установления основных процессов и факторов, влияющих на состав типичных газопарокапельных смесей в условиях интенсивного испарения воды. Решение этой задачи сводится к анализу закономерностей процессов тепломассопереноса в системе «газ–пар–капля жидкости».

В последние годы выполнены теоретические [22–24] и экспериментальные [25, 26] исследования процессов тепломассопереноса при движении капель воды через продукты сгорания с температурой более 1000 К. При этом эксперименты [25, 26] проведены для одиночных и малых по числу групп капель воды с размерами от 0,1 мм до 5 мм. Установлены интегральные характеристики испарения капель этой жидкости и влияние на них группы факторов (начальные размеры, концентрация, температура и форма капель, температура газов и другие). Незученными остаются возможные режимы перемещения капель жидкости в потоке газов, особенно при противоположных начальных направлениях движения газов и капель, а также высокой относительной концентрации последних. Анализ содержания обзорной работы [5], отражающей современное состояние теории и эксперимента в области гидродинамики и теплофизики двухфазных потоков, показывает, что проблема тепломассопереноса в условиях высокотемпературных фазовых превращений является одной из наименее изученных. Диапазоны изменения параметров, соответствующих возможным режимам перемещения капель жидкости в высокотемпературном потоке газа, представляют интерес для развития современных представлений о процессах смешения парокапельных и газовых потоков.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение диапазонов изменения параметров, соответствующих характерным режимам перемещения капель жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов.

Экспериментальный стенд и методы исследований

При проведении экспериментов использовался стенд (аналогично [25, 26]), условная схема которого представлена на рис. 1. Для формирования высокотемпературной газовой среды с контролируемыми параметрами применялся вертикальный цилиндрический канал 9 (высотой 1 м, диаметром 0,3 м) из огнеупорного жаростойкого стекла. В основании канала устанавливался полый цилиндр 10 (высотой 0,1 м, с внутренним и внешним диаметрами 0,26 м и 0,3 м соответственно), в межстеночное пространство которого заливалось типичное жидкое топливо со стабильными свойствами — керосин — и поджигалось перед проведением опытов. С применением нагнетательной системы 12 изменялась скорость движения продуктов сгорания в канале 9 в диапазоне $0,1 < U_g < 2$ м/с, что соответствует ламинарному режиму течения газов. Температура газов (продуктов сгорания) в канале 9 контролировалась хромель-алюмелевыми термопарами 11 в диапазоне измеряемых температур $-273-1373$ К с погрешностью измерения $\pm 3,3$ К (измерения проводились в трех точках по высоте канала — 0,15, 0,5, 0,85 м на оси его симметрии) и составила 1070 ± 30 К. Для генерации капель жидкости с заданными начальными размерами ($0,01 < R_m < 0,5$ мм), скоростью ($0,1 < U_m < 5$ м/с) и относительной объемной концентрацией ($0,001-0,0012$ м³ каплей жидкости / м³ газа) использовался распылитель 7. Диапазоны изменения размеров и скоростей движения капель жидкости выбирались

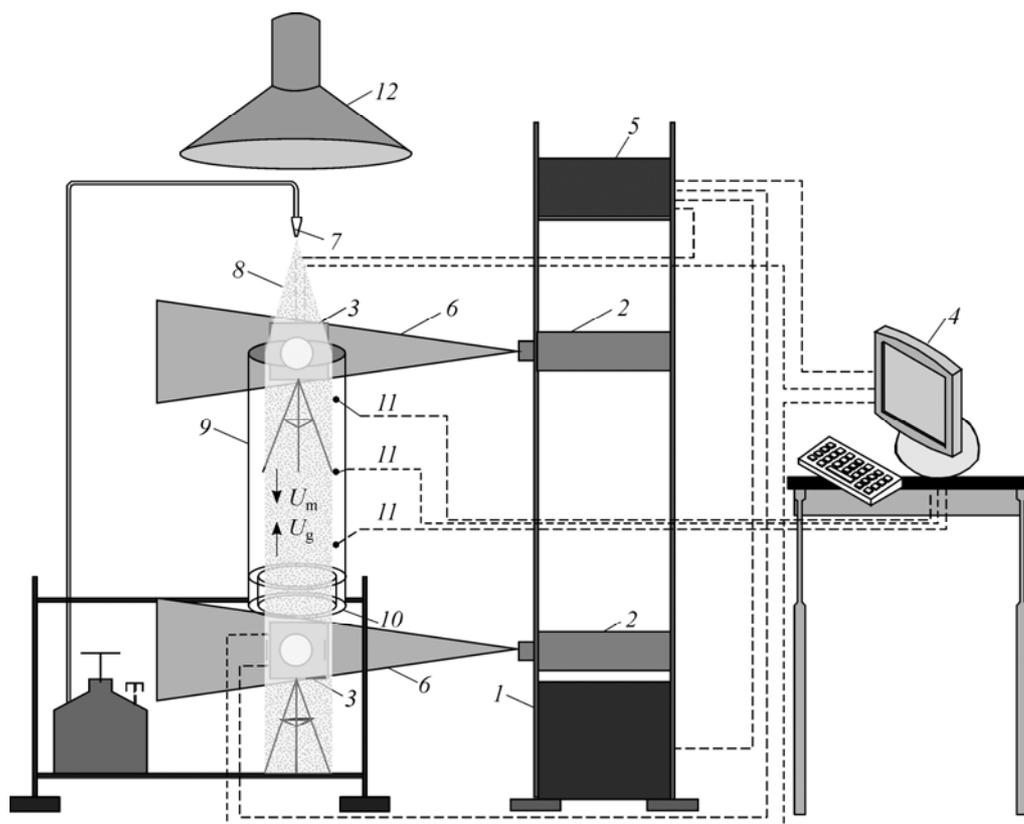


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

1 — генератор лазерного излучения, 2 — двойной твердотельный импульсный лазер, 3 — кросскорреляционная камера, 4 — персональный компьютер (ПК), 5 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера, 6 — световой нож, 7 — распылитель, 8 — капли рабочей жидкости, 9 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала, 10 — полый цилиндр, в межстеночное пространство которого залита горячая жидкость, 11 — термопары, 12 — нагнетательная система.

исходя из выполнения условия сохранения их монолитности [27–29] в процессе движения в канале ограниченной длины. Для этого вычислялись значения определяющего интегрального параметра — числа Вебера. Использовалось следующее выражение [27–29]:

$$We = 2\rho_g U_m^2 R_m / \sigma,$$

где ρ_g — плотность внешней, по отношению к каплям, газовой среды, кг/м^3 , σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м .

При сопоставлении результатов экспериментов [25, 26] и численных исследований [22–24] установлено, что плотность внешней, по отношению к каплям, газовой среды ρ_g может быть в несколько раз выше значений, соответствующих парам воды и газам, вследствие оттока с поверхности капель трассирующих частиц. Поэтому при вычислении максимальных значений We можно использовать принимаемые в [22–24] плотности смеси паров воды и высокотемпературных газов с учетом их увеличения за счет трассирующих частиц. Коэффициент поверхностного натяжения воды с ростом температуры несколько снижается [27, 28] относительно 70 мН/м. При вычислении We этот фактор не учитывался.

Установлено, что числа Вебера для капель в экспериментах не превышали 8. При таких значениях We , согласно [27, 28], не реализуются условия дробления капель (при $We > 10$ происходит их раздвоение, $We > 15$ — дробление). В работе [29] выделен

интервал $We \leq 9$, который соответствует условиям сохранения монолитности капель жидкостей в газовых потоках. Аналогичные выводы сделаны и при обработке результатов экспериментов [27, 28].

Объемная концентрация капель жидкости в газовой среде выбиралась исходя из ограничений по минимальному числу капель и трассирующих частиц в регистрационных областях видеокadres для оптических методов «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [30, 31] и «Particle Image Velocimetry» (PIV) [32–36], используемых при обработке результатов экспериментов.

Стенд был оснащен регистрирующей аппаратурой системы «Полис» [31, 35, 36], основными элементами которой являются: двойной импульсный твердотельный лазер 2 с длиной волны 532 нм, минимальной энергией в импульсе 70 мДж, максимальной длительностью импульса 12 нс, частотой повторений 15 Гц; кросскорреляционная видеокамера 3 с форматом изображения 2048×2048 пикселей, кадровой частотой 1,5 Гц, минимальной задержкой между кадрами 5 мкс; синхронизирующий процессор 5 с максимальной дискретизацией сигналов 10 нс.

Исследовалось движение капель воды со специальными включениями — «трассерами», представляющими примесь (0,5 % по массе) нанопорошка диоксида титана. Последние вводились для повышения контрастности видеogramм с изображениями капель. В работах [25, 26] показано, что ввод трассирующих частиц диоксида титана с указанной концентрацией несущественно влияет на характеристики испарения капель воды.

Характерным размером капель принят условный радиус R_m , так как капли жидкости при движении в потоке газов принимают, как правило, форму эллипсоидов [25, 26]. Для определения размеров капель жидкости с $R_m < 0,3$ мм и конфигурацией, несущественно отличающейся от сферической, использовался метод IPI [30] с алгоритмами [31]. Капли жидкости в регистрационной области многократно освещались «световым ножом» 6. Наблюдалась интерференция между отраженным и преломленным каплями светом. Выполнялась процедура видеофиксации изображений с использованием камеры 3. По числу наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос [30, 31] определялись размеры капель. При $R_m > 0,3$ мм и существенном отклонении конфигурации капель от сферы вследствие ограничений метода IPI [30, 31] вычислялись их максимальные диаметры в пикселях (от 6 до 10 значений в зависимости от конфигурации) и усреднялись по числу измерений. Далее с учетом масштабного коэффициента S , изменяющегося в диапазоне 1–5 мкм/пикс в зависимости от размеров регистрационных областей, рассчитывались условные (так как форма капель отличается от сферы) радиусы R_m .

При проведении экспериментов регистрировались изображения капель воды с трассерами на входе и выходе из канала 9 (рис. 1). Положение кросскорреляционной камеры 3 и лазера 2 выбиралось таким образом, чтобы оптическая ось камеры и плоскость «светового ножа» лазера пересекались под углом 90° и точка их пересечения находилась в регистрационной области видеокadres. Ширина видеокadres соответствует диаметру канала 9. Продольный и поперечный размеры видеокadres равны. Толщина «светового ножа» составляет 0,01 м.

Скорости капель жидкости и газов определялись по перемещениям трассеров с применением метода PIV [32–34] и алгоритмов [35, 36]. При обработке видеокadres строились двухкомпонентные поля скоростей трассеров. Измерение мгновенного поля скорости в заданном сечении основано на регистрации перемещения трассеров, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени (согласно рекомендациям [32–36] выставлялось значение 100 мкс). Применялся кросскорреляционный алгоритм, предполагающий использование метода быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения корреляционной теоремы [32–34].

Для контроля скоростей газов в канал 9 перед вводом капель жидкости вдувались частицы нанопорошка диоксида титана от 5000 до 7000 частиц для выполнения требований по минимальному числу трассеров в расчетных областях видеокадров [32–36]. Регистрировались поля скоростей трассеров и распределения последних по радиусу канала. При достижении условий относительно равномерного движения газов с заданной скоростью (с отклонением значений скоростей трассеров по радиусу, не превышающем 7 %) в канал вводились капли жидкости. Скорость каждой капли определялась по скоростям трассирующих частиц, входящих в ее объем (малые перемещения трассеров в капле незначительно влияют на скорость ее движения [25, 26]). Значения скоростей капель U_m представляют скорости, осредненные за время между вспышками лазера согласно [32–36], их можно считать средними аксиальными скоростями капель.

При проведении экспериментов определялись скорость (U_m), размеры (R_m) и относительная объемная концентрация (α_m) капель, а также скорость газов (U_g) в регистрационной области видеограмм. Также вычислялся безразмерный параметр ΔR , характеризующий изменение размеров капель при движении через канал 9 относительно начального радиуса R_m : $\Delta R = (R_m - R_m^*) / R_m$, где R_m^* (мм) — значение радиуса капли на выходе из канала 9.

При обработке видеограмм для оценки изменения интегральных характеристик испарения капель (R_m и α_m) последние условно разделялись по начальным размерам на следующие группы: $0,01 \leq R_m < 0,08$, $0,08 \leq R_m < 0,16$, $0,16 \leq R_m < 0,23$, $0,23 \leq R_m < 0,3$, $0,3 \leq R_m \leq 0,5$ мм. Параметр α_m представляет относительную объемную долю каждой из выделенных групп капель в кадре видеограмм (считалось, что в каждом кадре для общего числа капель $\alpha_m = 1$). Выбор диапазонов изменения R_m для соответствующих групп капель обусловлен спецификой кросскорреляционных преобразований (по минимальному числу трассеров в видеокадре), применяемых в методах PIV и PPI [30–36]. Систематические погрешности определения размеров капель и скоростей трассеров, в соответствии с методиками [30–36], составили 1,5 и 2 % соответственно.

Результаты и обсуждение

Для оценки изменения размеров и относительной концентрации капель воды в высокотемпературном газовом потоке в настоящей работе, как и в работах [25, 26], в процессе проведения экспериментов регистрировались изображения капель распыленной жидкости на входе и выходе из канала 9 (рис. 1). Для исследования возможных режимов перемещения капель в высокотемпературной газовой среде анализировались видеограммы, соответствующие участку на входе в канал 9, так как он характеризует непосредственно область смешения паракапельного и газового потоков (при противоположных направлениях их движения). Важно отметить, что скорости перемещения капель жидкости U_m в потоке газов определялись по скоростям перемещения соответствующим им трассирующих частиц (до введения капель жидкости в канал 9 трассеры в нем отсутствовали).

На рис. 2 приведены типичный кадр видеограммы и соответствующее ему поле скоростей трассирующих частиц при начальном соотношении $U_m < U_g$. С ростом начальных значений U_m поля скоростей трассеров существенно отличаются от приведенных на рис. 2. Так, установлено, что при $U_m \approx U_g$ в рассматриваемой области смешения потоков существенно меньшая доля капель жидкости изменяет направление своего движения относительно начального. Отличия значений скоростей капель обусловлены разными размерами последних. При начальном соотношении $U_m > U_g$ от 70 до 95 % капель сохраняют направления движения, соответствующие их вводу в высокотемпературную газовую среду. При этом с ростом размеров R_m число таких капель нелинейно увеличивается.

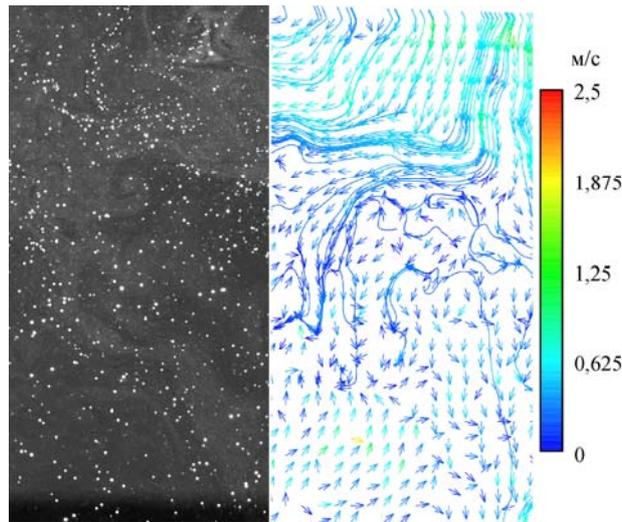


Рис. 2. Кадр видеогаммы капель жидкости в высокотемпературной газовой среде и в поле скоростей трассирующих частиц при начальных значениях $U_g = 1$ м/с и $U_m = 0,5$ м/с.

При обработке видеogramм экспериментов и полей скоростей трассирующих частиц, аналогичных приведенным на рис. 2, определены значения скоростей капель жидкости, которые имеют последние при смешении с высокотемпературным газовым потоком (рис. 3). Значения скоростей капель $U_m < 0$ на рис. 3 соответствуют изменению направления их движения в высокотемпературной области на противоположное (совпадающее с вектором скорости газов U_g) в процессе смешения.

В результате анализа полей скоростей трассеров и зависимостей $U_m = f(U_g)$, аналогичных приведенным на рис. 2 и 3, при варьировании величин U_m , U_g и R_m в указанных выше диапазонах выделены три режима перемещения капель распыленной жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов. Используются следующие безразмерные параметры:

$$Re_d = \frac{2U_m R_m}{\nu_g}, \quad Re_g = \frac{2U_g R_c}{\nu_g},$$

где ν_g — кинематическая вязкость газов ($\nu_g = 1,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с), R_c — характерный поперечный размер (радиус) цилиндрического канала \varnothing с высокотемпературными газами ($R_c = 0,15$ м). При вычислении значений Re_d и Re_g использовались начальные (до смешения) значения U_m и U_g соответственно. Числа Рейнольдса в экспериментах находились в диапазонах $0,15 < Re_d < 400$, $2300 < Re_g < 46000$.

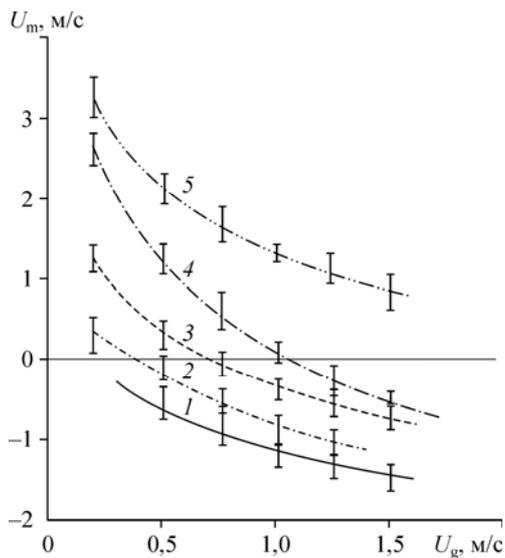
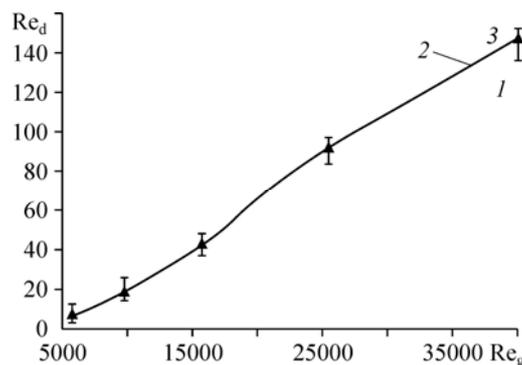


Рис. 3. Значения скоростей капель жидкости U_m при смешении с газовым потоком (при заданной скорости U_g).

1 — $0,01 \leq R_m < 0,08$ мм, 2 — $0,08 \leq R_m < 0,16$ мм,
3 — $0,16 \leq R_m < 0,23$ мм, 4 — $0,23 \leq R_m < 0,3$ мм,
5 — $0,3 \leq R_m \leq 0,5$ мм.

Рис. 4. Области изменения характеристик газов и капель, соответствующие различным режимам перемещения последних во встречном потоке.

1 — изменение направления движения капель на противоположное, 2 — переходный режим, 3 — сохранение начального направления перемещения.



На рис. 4 представлена зависимость $Re_d = f(Re_g)$, иллюстрирующая области изменения характеристик газопарокапельной среды, при которых реализуются выделенные режимы перемещения капель жидкости разных размеров в потоке высокотемпературных газов. При параметрах R_m , U_m , U_g газопарокапельной среды, соответствующих области выше кривой, приведенной на рис. 4, траектории движения капель жидкости изменяются незначительно (относительно начальных) при вхождении в поток высокотемпературных газов. Область под кривой $Re_d = f(Re_g)$ характеризует режим, при котором капли изменяют направление своего движения на противоположное при смешении с газами (чем больше удаление от кривой $Re_d = f(Re_g)$, тем большее число капель устремляется за потоком газов). При параметрах, соответствующих непосредственно полученной зависимости $Re_d = f(Re_g)$, для капель характерен переходный режим, при котором их скорости в потоке газов близки к нулю (происходит кратковременное (менее 0,1 с) «парение» или «зависание» капель). В последующем возможно как продолжение движения капель навстречу газовому потоку, так и изменение направления их перемещения на противоположное.

Вид зависимости $Re_d = f(Re_g)$ можно объяснить нестационарным и нелинейным характером фазовых превращений в области высокотемпературных газов [25, 26], а также значительным влиянием соседних перемещающихся последовательно и параллельно относительно друг друга капель, особенно малых по размерам ($R_m < 0,15$) мм, при их высокой доле в газовом потоке — $\alpha_m > 0,5$, на температуру и концентрацию газов в их окрестности (согласно основным заключениям численных исследований [22–24]).

Эксперименты показали, что режим перемещения капель во встречном потоке высокотемпературных газов существенно зависит не только от соотношения начальных скоростей U_m и U_g , но и от значений R_m . Установлено, что при $R_m < 0,17$ мм интегральный параметр ΔR достигает практически 1, при $0,17 < R_m < 0,3$ мм — $\Delta R = 0,7$, а при $R_m \rightarrow 0,5$ мм — ΔR уменьшается до 0,2. С ростом ΔR существенно снижаются скорости движения капель через высокотемпературные газы. Возрастают характерные размеры паровых слоев в пристенной области каждой капли. Как следствие, увеличивается действие сил сопротивления их движению.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить три режима перемещения капель воды во встречном потоке высокотемпературных газов, характеризующих изменение направления движения капель относительно начального при смешении с газами. При этом определены значения основных параметров капель и газов, при которых реализуются выделенные режимы (рис. 4). Установленные по результатам проведенных экспериментальных исследований закономерности во многом соответствуют области применения широко известных моделей [2–4], но в то же время расширяют границы этой области и являются базой для дальнейшего развития моделей и заключений [2–4].

Обозначения

α_m — относительная объемная концентрация (доля) капель жидкости в кадре видеоработы,	R_m — радиус (характерный размер) капли, мм,
ΔR — параметр, характеризующий изменение размеров (радиусов) капель при движении через канал с высокотемпературными продуктами сгорания,	Re_d — число Рейнольдса для капель жидкости,
ν_g — кинематическая вязкость газов, м ² /с,	Re_g — число Рейнольдса для потока газов,
R_c — характерный поперечный радиус цилиндрического канала с высокотемпературными газами, м,	U_g — скорость высокотемпературных продуктов сгорания, м/с,
	U_m — скорость капель жидкости, м/с,
	We — число Вебера.

Список литературы

1. Terekhov V.I., Pakhomov M.A., Sharov K.A., Shishkin N.E. Thermal efficiency of near-wall gas-droplet screens II. Experimental study and comparison with numerical results // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48, No. 9. P. 1760–1771.
2. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газокпельной струей // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 3. С. 331–341.
3. Терехов В.И., Пахомов М.А., Чичиндаев А.В. Влияние испарения жидких капель на распределение параметров в двухкомпонентном ламинарном потоке // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 6. С. 68–77.
4. Пахомов М.А., Терехов В.И. Численное моделирование течения и теплопереноса в опусном турбулентном газожидкостном потоке в трубе // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 5. С. 737–744.
5. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.
6. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., Архипов В.А. Использование модельного водного раствора NaCl при исследовании тонкодисперсного распыления жидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 513–521.
7. Shanthanu S., Raghuram S., Raghavan V. Transient evaporation of moving water droplets in steam–hydrogen–air environment // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. P. 536–546.
8. Песочин В.Р. Возбуждение акустических колебаний при горении капель жидкого топлива при сверхкритическом давлении // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 6. С. 937–941.
9. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Enhancement of an impingement heat transfer between turbulent mist jet and flat surface // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, No. 15–16. P. 3156–3165.
10. Пахомов М.А., Терехов В.И. Интенсификация турбулентного теплообмена при взаимодействии туманообразной осесимметричной импактной струи с преградой // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 1. С. 119–131.
11. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. The effect of confinement on the flow and turbulent heat transfer in a mist impinging jet // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54, No. 19–20. P. 4266–4274.
12. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Second-moment closure simulation of flow and heat transfer in a gas-droplets turbulent impinging jet // Intern. J. of Thermal Sci. 2012. Vol. 60. P. 1–12.
13. Терехов В.И., Пахомов М.А. Моделирование турбулентного газодисперсного потока при внезапном расширении в трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 629–642.
14. Терехов В.И., Пахомов М.А. Моделирование турбулентного двухфазного потока после внезапного расширения трубы при наличии испарения капель // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 3. С. 423–430.
15. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. Predictions of turbulent flow and heat transfer in gas–droplets flow downstream of a sudden pipe expansion // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52, No. 21–22. P. 4711–4721.
16. Moreira A.L.N., Carvalho J., Panao M.R.O. An experimental methodology to quantify the spray cooling event at intermittent spray impact // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28, No. 2. P. 191–202.
17. Panao M.R.O., Moreira A.L.N. Intermittent spray cooling: a new technology for controlling surface temperature // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 2009. Vol. 30, No. 1. P. 117–130.
18. Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Структура импульсной распыленной струи при изменении ее частотных характеристик // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 1. С. 116–121.
19. Никитин М.Н. Использование парогазовой смеси при сжигании топлива // Промышленная энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.
20. Першин В.Ф., Однолюк В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.
21. Tang Z., Fang Z., Yuan J.P., Merci B. Experimental study of the downward displacement of fire-induced smoke by water spray // Fire Safety Journal. 2013. Vol. 55. P. 35–49.
22. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандела» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. 2012. № 12. С. 531–538.

23. **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.
24. **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.
25. **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.
26. **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.
27. **Вольнский М.С.** Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.
28. **Гегузин Я.Е.** Капля. М.: Наука, 1973. 161 с.
29. **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 // Intern. J. of Multiphase Flow. 2012. Vol. 47. P. 37–49.
30. **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.
31. **Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М.** Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 1–13.
32. **Willert C.E., Gharib M.** Digital particle image velocimetry // Experiments in Fluids. 1991. Vol. 10. P. 181–193.
33. **Raffel M., Willert C., Kompenhans J.** Particle image velocimetry. Berlin: Springer Verlag, 1998. 253 p.
34. **Westerweel J.** Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Sci. and Technology. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
35. **Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
36. **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.

*Статья поступила в редакцию 23 января 2014 г.,
после переработки — 12 марта 2014 г.*