

УДК 536.4

## ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ПРОЦЕСС ИХ ИСПАРЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ

Р. С. Волков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
E-mails: romanvolkov@tpu.ru, elf@tpu.ru, pavelspa@tpu.ru

Выполнено экспериментальное исследование влияния основных начальных параметров (характерных размеров, температуры, скорости перемещения) капель распыленной жидкости (воды) на процесс их испарения в газах при температуре более 1000 К. Определены предельные значения начальных параметров капель жидкости, при которых реализуются условия достижения максимальной и минимальной скоростей парообразования.

**Ключевые слова:** теплоперенос, испарение, высокотемпературные газы, распыленная вода, капли, оптические методы диагностики газопарожидкостных смесей.

**Введение.** Процессы смешения газовых и парок капельных сред характеризуются достаточно сложными механизмами тепло- и массопереноса и фазовыми превращениями, поэтому прогнозирование состава формирующихся неоднородных газопарокапельных смесей существенно затруднено [1–8]. В то же время в ряде промышленных технологий используются такие газопарокапельные среды с контролируруемыми параметрами (см., например, [9–12]). Таким образом, актуальна задача исследования основных процессов и факторов, влияющих на состав типичных газопарокапельных смесей в условиях интенсивного испарения жидкости. Особый интерес представляет изучение процессов, происходящих при высоких температурах (более 1000 К) [13–15].

Теоретические [13, 14] и экспериментальные [15] исследования, проведенные для капель воды и газов при температуре более 1000 К, показали, что при формировании газопарокапельных сред определяющую роль играют взаимосвязанные процессы теплопереноса. Выявлено влияние характерных размеров капель жидкости, температуры газов, теплофизических характеристик жидкости, паров и газов на интегральные характеристики процесса испарения [13–15]. Среди параметров, влияние которых пока остается неизученным, следует выделить начальный дисперсный состав жидкости и ее температуру. В частности, эти параметры не определены для случая мелкодисперсного распыления жидкости (размеры капель в потоке составляют от нескольких десятков до сотен микрометров) в высокотемпературной газовой среде. Исследовать такие процессы с использованием моделей [13, 14] достаточно сложно (необходимы координатные сетки с большим числом узлов и вычислительные комплексы с высокой производительностью). Существенные

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-08-00057).

© Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А., 2015

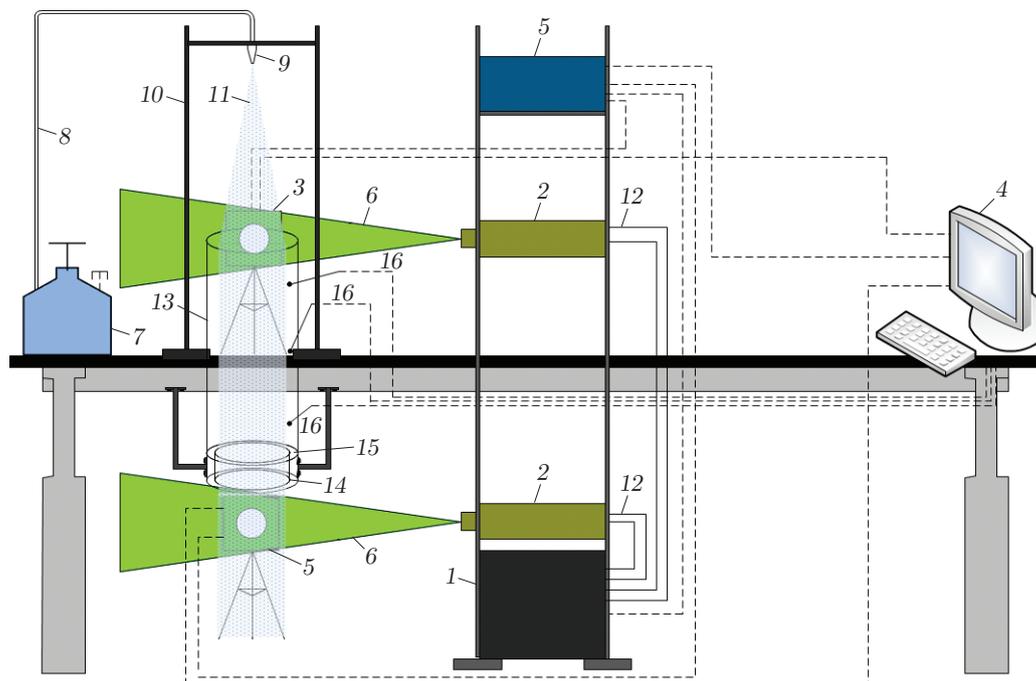


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

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 — емкость с рабочей жидкостью; 8 — канал подачи рабочей жидкости; 9 — распылитель; 10 — штатив; 11 — капли рабочей жидкости; 12 — канал, по которому движется жидкость, охлаждающая лазер; 13 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 14 — полый цилиндр; 15 — пространство между цилиндрами 13 и 14, в которое залита горячая жидкость; 16 — термопары

затруднения вызывает моделирование одновременного движения большой группы капель жидкости (более 100) через высокотемпературную газовую среду в условиях интенсивных фазовых превращений. Представляет интерес анализ влияния основных параметров, характеризующих начальное состояние капель распыленной жидкости, на интенсивность их испарения в области высокотемпературных газов с использованием оптических методов диагностики гетерогенных газопарожидкостных смесей.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния основных начальных параметров (характерных размеров, температуры, скорости перемещения) капель жидкости на интегральные характеристики процесса их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду.

**Экспериментальный стенд и методы исследований.** Использовался стенд, аналогичный стенду, использованному в экспериментах [15] (рис. 1). Основными элементами стенда являются кросскорреляционная видеокамера (формат изображения  $2048 \times 2048$  пикселей, кадровая частота 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами 5 мкс), двойной импульсный твердотельный лазер (длина волны 532 нм, минимальная энергия импульса 70 мДж, максимальная длительность импульса 12 нс, частота повторений 15 Гц), синхронизирующий процессор (максимальная дискретизация сигналов 10 нс).

В качестве рабочей жидкости применялась вода со специальными включениями — “трассерами”, представляющими собой примесь (массовая доля 0,5 %) нанопорошка диок-

сида титана (выбор  $\text{TiO}_2$  обусловлен его нерастворимостью в воде [15, 16]). Включения вводились для повышения контрастности видеogramм экспериментов.

С помощью системы нагревательных камер начальная температура используемой в экспериментах жидкости  $T_w$  изменялась в диапазоне  $290 \div 330$  К [17]. Нагретая жидкость заливалась в емкость 7, в которой устанавливалась хромель-копелевая термопара для контроля температуры  $T_w$ . Поскольку опыты проводились в течение небольших интервалов времени, возможность остывания жидкости до момента ее ввода в канал 13 не учитывалась (предварительные оценки показали, что изменение  $T_w$  не превышает 2 К).

Для генерации капель жидкости с заданными начальными размерами, концентрацией и скоростью использовался распылитель 9. Скорости капель жидкости варьировались в диапазоне  $0,5 \text{ м/с} < U_m < 1,5 \text{ м/с}$  при регулировании давления в емкости 7. В качестве характерного размера капель, так же как в [15], выбран средний условный (эквивалентный) радиус  $R_m$ . Это обусловлено тем, что при падении капли жидкости принимают формы эллипсоидов [15, 18, 19]. Начальные значения  $R_m$  варьировались в диапазоне  $0,01 \div 0,40$  мм при изменении соответствующих настроек распылителя 9. При выборе диапазонов размеров и скоростей движения капель жидкости учитывалось условие сохранения их “монолитности” [20, 21] в процессе движения в газовой среде. В экспериментах значения числа Вебера  $We$  для капель не превышали пяти. Согласно [20, 21] при таких значениях  $We$  не реализуются условия дробления капель. Объемная концентрация капель в высокотемпературной газовой среде задавалась в достаточно узком диапазоне  $0,0010 \div 0,0012$  (см. [15]) вследствие ограниченной применимости оптических методов “трассерной” визуализации (particle image velocimetry (PIV) [22–27] и interferometric particle imaging (IPI) [28, 29]), используемых при обработке результатов экспериментов.

Для формирования потока высокотемпературных газов использовался цилиндрический канал 13 (высота 1 м, диаметр 0,3 м). На основание канала устанавливался полый цилиндр 14 (высота 0,1 м, внутренний и внешний диаметры 0,26 и 0,30 м соответственно). В пространство между стенками цилиндров 13 и 14 заливалось жидкое топливо со стабильными свойствами (керосин) объемом приблизительно 250 мл, поджигавшееся перед проведением опытов. По истечении 5 мин в канале 13 формировался поток продуктов сгорания с температурой  $(1070 \pm 30)$  К. Температура газов в канале контролировалась хромель-алюмелевыми термопарами 16 (диапазон измеряемых температур  $273 \div 1373$  К, погрешность измерения  $\pm 3,3$  К). Измерения проводились в трех точках на оси симметрии канала с координатами 0,15; 0,50; 0,85 м. В отличие от экспериментов [15] в рассматриваемых опытах (см. рис. 1) не использовалась специальная нагнетательная система для изменения скорости газов, движущихся навстречу каплям. Эксперименты проводились при скоростях движения продуктов сгорания керосина в канале 13 менее  $0,5 \text{ м/с}$  (ламинарный режим течения газов) в условиях естественной конвекции. Для оценки значений скоростей газов в канал вдувались частицы нанопорошка диоксида титана (приблизительно 5000 частиц), что обеспечивало минимальное число “трассеров” в расчетных областях видеокладов [22–29]. Регистрировались поля скоростей “трассеров”, их распределения по радиусу канала, а также вычислялись соответствующие скорости газового потока.

В экспериментах оценивались изменения скоростей перемещения, характерных размеров и объемной доли капель жидкости в области высокотемпературных газов. Также рассчитывался интегральный безразмерный параметр  $\Delta R$ , характеризующий изменение размеров капель при их движении через высокотемпературную газовую среду по сравнению с их начальным условным радиусом  $R_m$ :

$$\Delta R = (R_m - R_m^*)/R_m$$

( $R_m^*$  — значение условного радиуса капли на выходе из канала 13).

При  $R_m < 0,3$  мм для определения размеров капель жидкости, форма которых несущественно отличалась от сферической, использовался метод IPI [28, 29]. Капли жидкости в области регистрации многократно (до 100 раз/с) освещались “ножом” 6. При этом наблюдалась интерференция отраженного и преломленного каплями света. Затем выполнялась процедура видеофиксации изображений с использованием камеры 3. По количеству наблюдаемых на видеogramмах интерференционных полос определялись размеры капель [28, 29]. При  $R_m > 0,3$  мм для определения размеров капель, форма которых существенно отличалась от сферической (вследствие ограничений метода IPI [28, 29]), вычислялось от 6 до 10 значений их максимальных диаметров в пикселях в зависимости от формы капли. Эти значения осреднялись по числу измерений. Далее с учетом масштабного коэффициента  $S$ , значения которого изменялись в диапазоне  $1 \div 5$  мкм/пиксель в зависимости от размеров областей регистрации, рассчитывались условные (так как форма капель отличалась от сферической) радиусы  $R_m$ . Согласно [28, 29] систематические погрешности измерения размеров капель не превышали 1,5 %. Случайные погрешности вычисления  $R_m$  достигали 2 %.

Измерительной областью камеры 3 являлась плоскость светового “ножа” 6 (см. рис. 1). Положение камеры и лазера 2 выбиралось таким образом, чтобы оптическая ось камеры и плоскость светового “ножа” лазера пересекались под углом, равным  $90^\circ$  (точка их пересечения находилась в области регистрации кадра). Ширина кадра соответствует диаметру канала 13. Продольный и поперечный размеры кадра равны. Толщина “ножа” лазера составляет 0,01 м.

Скорости капель жидкости определялись по перемещениям “трассеров” в них с помощью метода PIV [22–27]. Эксперименты показали, что малые относительные перемещения “трассеров” в капле оказывают незначительное влияние на скорость ее движения [15]. “Трассирующие” частицы в измерительной плоскости потока многократно освещались лазером. Изображения частиц регистрировались кросскорреляционной камерой. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещение частиц в интервале времени между вспышками источника света и построить поля скоростей “трассеров”. Использовался кросскорреляционный алгоритм, основой которого является метод быстрого преобразования Фурье, учитывающий условия выполнения корреляционной теоремы [22–27]. Следует отметить, что значения скоростей капель  $U_m$  представляют собой скорости, осредненные по времени между вспышками лазера согласно [22–27].

В процессе обработки каждая видеogramма эксперимента разбивалась на расчетные элементарные области ( $32 \times 32$  пикселей). Для каждой области рассчитывалась корреляционная функция [22–27]. Максимум корреляционной функции соответствовал наиболее вероятному сдвигу частиц в регистрационной области. Согласно основным положениям метода PIV скорость потока в элементарной области не меняется и все частицы совершают одинаковые перемещения (т. е. корреляционная функция имеет один четко выраженный максимум). Для увеличения ширины корреляционных пиков за счет отсекаания небольшого диапазона низких и значительного диапазона высоких частот из спектра корреляционной функции, а также отсева некоторых полученных векторов “трассеров” по критерию “сигнал/шум” использовались алгоритмы [26, 27]. Систематические погрешности измерения скоростей “трассеров” не превышали 2 %, случайные погрешности вычисления этих скоростей достигали 3 %.

При обработке видеogramм экспериментов для оценки изменения интегральных характеристик процесса испарения капель последние разделены (по начальным размерам) на несколько групп: 1)  $0,01 \text{ мм} \leq R_m < 0,08 \text{ мм}$ ; 2)  $0,08 \text{ мм} \leq R_m < 0,16 \text{ мм}$ ; 3)  $0,16 \text{ мм} \leq R_m < 0,23 \text{ мм}$ ; 4)  $0,23 \text{ мм} \leq R_m < 0,30 \text{ мм}$ ; 5)  $0,3 \text{ мм} \leq R_m \leq 0,4 \text{ мм}$ . Выбор диапазонов значений  $R_m$  для соответствующих групп капель обусловлен спецификой

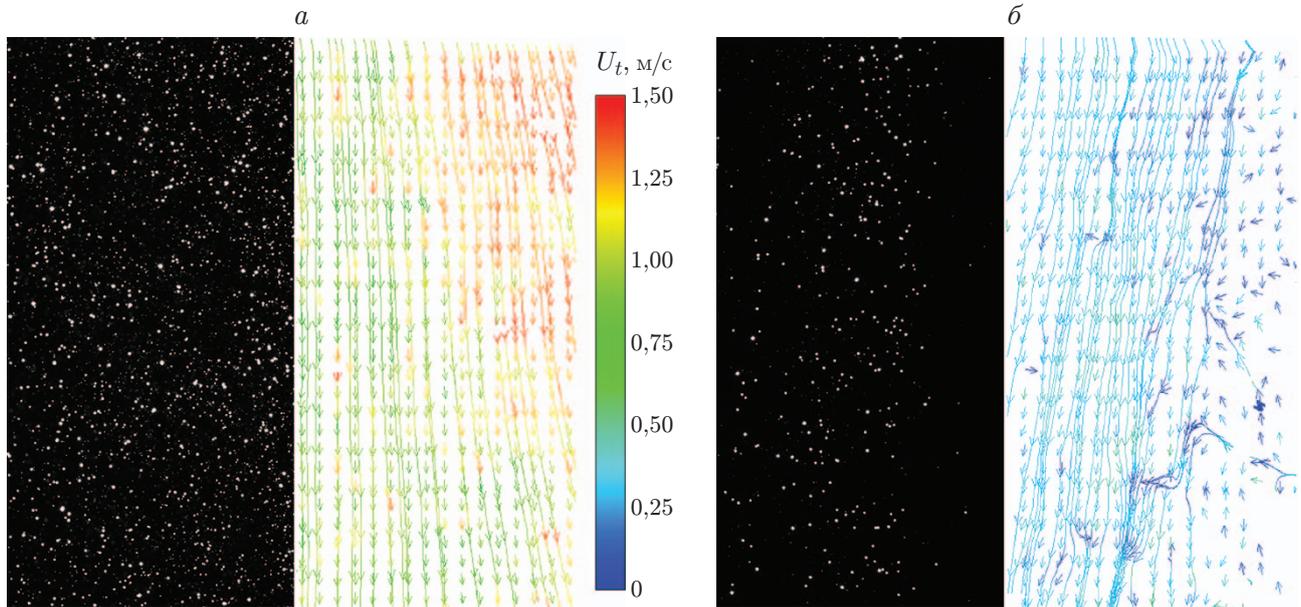


Рис. 2. Видеogramмы капель распыленной жидкости (слева) и поля скоростей “трассирующих” частиц (справа) в канале с высокотемпературными газами ( $T_w = 293$  К,  $U_m = 1$  м/с):

$a$  — на входе в канал,  $b$  — на выходе из канала

кросскорреляционных преобразований [22–29] при указанных выше размерах расчетных областей и значениях масштабного коэффициента  $S$ .

**Результаты исследования и их обсуждение.** При проведении экспериментов регистрировались изображения капель распыленной жидкости на входе и выходе из высокотемпературной ( $T = T_f$ ) газовой среды (цилиндрического канала 13). На рис. 2 приведены полученные видеogramмы и соответствующие им поля скоростей “трассеров”  $U_t$ .

С использованием видеogramм и полей скоростей “трассеров”, подобных представленным на рис. 2, проводился анализ изменения интегральных характеристик движения капель жидкости (размера  $R_m$ , объемной доли  $\alpha_m$ , скорости  $U_m$ ) через поток высокотемпературных газов, а также траекторий их перемещения. Параметр  $\alpha_m$  представляет собой долю капель каждой из указанных выше пяти групп на одном кадре видеogramмы (считалось, что на каждом кадре общему числу капель соответствует значение  $\alpha_m = 1$ ).

В таблице приведены результаты обработки видеogramм экспериментов. Установлено, что объемная доля  $\alpha_m$  рассматриваемых групп капель существенно изменяется по сравнению с начальными значениями. Так, на выходе из канала для капель групп 3–5  $\alpha_m \approx 0,85$ , для капель групп 1, 2  $\alpha_m \approx 0,15$ . На входе в канал для капель групп 1, 2  $\alpha_m \lesssim 0,5$ . Таким образом, дисперсность распыленной жидкости (и как следствие состава газопарокапельной смеси), движущейся через высокотемпературный канал, существенно изменяется. Также можно сделать вывод о значительном уменьшении скорости движения капель распыленной жидкости. При  $0,2 \text{ мм} \leq R_m < 0,3 \text{ мм}$  значения  $U_m$  уменьшаются на  $40 \div 70$  % по сравнению с начальными. Для капель группы 5 значения  $U_m$  уменьшаются на 25 % по сравнению с начальными. Капли группы 1 практически полностью испаряются ( $\alpha_m \approx 0$ ), поэтому  $U_m \approx 0$ . Следовательно, значение  $R_m \approx 0,05$  мм можно считать предельным значением, при котором обеспечивается максимальное уменьшение массы жидкости при парообразовании в рассматриваемых условиях. Различие полученных значений скоростей капель с разными характерными размерами обусловлено существенным различием влияния на

Значения интегральных параметров движения капель распыленной жидкости (группы 1–5) через канал с высокотемпературной газовой средой

Номер группы	На входе в канал			На выходе из канала				
	$R_m$ , мм	$\alpha_m$	$U_m$ , м/с	$T_w$ , К	$\Delta R$	$R_m$ , мм	$\alpha_m$	$U_m$ , м/с
1	0,078	0,063	0,95	293	—	—	—	—
				303	—	—	—	—
				313	—	—	—	—
				323	—	—	—	—
2	0,139	0,381	0,95	293	0,489	0,071	0,134	0,29
				303	—	—	—	—
				313	—	—	—	—
				323	—	—	—	—
3	0,205	0,323	0,95	293	0,341	0,135	0,297	0,35
				303	0,639	0,074	0,119	0,13
				313	—	—	—	—
				323	—	—	—	—
4	0,272	0,188	0,95	293	0,276	0,197	0,424	0,58
				303	0,529	0,128	0,439	0,33
				313	0,761	0,065	0,456	0,10
				323	—	—	—	—
5	0,333	0,045	0,95	293	0,246	0,251	0,145	0,71
				303	0,453	0,182	0,442	0,62
				313	0,622	0,126	0,544	0,52
				323	0,819	0,060	1,000	0,26

рассматриваемые капли сил тяжести, сопротивления и трения, а также парообразования и деформации поверхности (см. [13, 14]).

В [15] установлено, что при движении капель жидкости с размерами более 1 мм через канал с высокотемпературными газами, имеющий длину, приблизительно равную 1 м (использовался экспериментальный стенд, аналогичный представленному на рис. 1), значение параметра  $\Delta R$  уменьшается менее чем на 0,08. В таблице показано, что при  $R_m < 0,5$  мм даже для капель группы 5 значения  $\Delta R$  не могут составлять менее 0,25. Следовательно, значение  $R_m = 0,5$  мм можно считать верхней границей диапазона размеров капель, в котором происходит интенсивное парообразование в высокотемпературной системе (см. рис. 1).

Следует отметить, что в экспериментах при умеренных значениях  $U_m$  (менее 2 м/с) и размерах капель  $R_m$  от 0,01 до 0,40 мм не зарегистрировано дробления (разрушения) последних. Этот результат хорошо согласуется с основными теоретическими положениями [20, 21] и результатами экспериментов [30–34]. Например, в [20, 21] показано, что для капель воды, ртути, спирта и керосина размером менее 1,5 мм, движущихся в потоке газов при скоростях менее 20 м/с, дробление отсутствует. Для капель воды и эмульсий на ее основе при  $We < 9$  возможна некоторая деформация поверхности, но процессы дробления капель маловероятны [30–34].

С использованием результатов анализа видеogramм экспериментов, аналогичных приведенным в таблице, выявлено влияние основных начальных параметров (размеров, температуры, скорости перемещения) капель распыленной жидкости на процесс их испарения в газах при температуре более 1000 К. На рис. 3, 4 приведены зависимости интегрального безразмерного параметра  $\Delta R$  от средних начальных размеров (условных радиусов) капель  $R_m$  при различных начальных значениях температуры  $T_w$  и начальной скорости перемещения капель  $U_m$ .

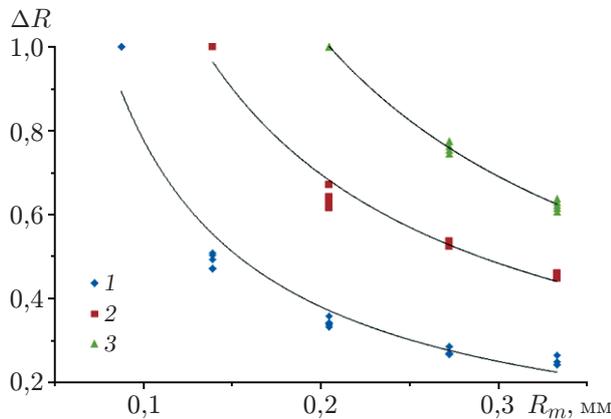


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость параметра  $\Delta R$  от размеров  $R_m$  каплей жидкости при различных начальных значениях температуры ( $U_m = 0,8$  м/с):  
 1 —  $T_w = 293$  К, 2 —  $T_w = 303$  К, 3 —  $T_w = 313$  К

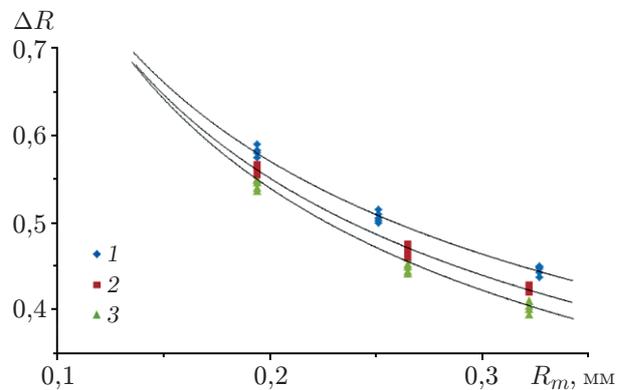


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость параметра  $\Delta R$  от размеров  $R_m$  каплей жидкости при различных начальных скоростях движения ( $T_w = 303$  К):  
 1 —  $U_m = 0,8$  м/с, 2 —  $U_m = 1,1$  м/с, 3 —  $U_m = 1,4$  м/с

Из анализа приведенной на рис. 3 зависимости  $\Delta R(R_m)$  следует, что начальная температура жидкости оказывает существенное влияние на интегральные характеристики фазовых превращений в зоне движения ее каплей через горячие продукты сгорания. Это влияние обусловлено уменьшением интервала времени прогрева жидкости до температуры, при которой выполняются условия интенсивного парообразования. С увеличением  $T_w$  влияние начальной температуры жидкости становится более значительным (зависимость  $\Delta R(R_m)$  приобретает существенно нелинейный характер).

Нелинейность функции  $\Delta R(T_w, R_m)$  можно объяснить, во-первых, наличием нелинейной зависимости скорости парообразования от температуры поверхности капли [35, 36], во-вторых, существованием условий [13–15], при которых влияние каплей распыленной жидкости на интегральные характеристики процесса их испарения является определяющим. В частности, в [14] показано, что с увеличением размеров каплей их совместное влияние становится более существенным, особенно в случае каплей, перемещающихся последовательно в потоке высокотемпературных газов. При интенсивном парообразовании капли, движущиеся первыми, создают условия для существенного понижения температуры (на несколько сотен градусов) в окрестности следующих каплей.

Анализ полученных в экспериментах зависимостей  $\Delta R(T_w, R_m)$  (см. рис. 3) с учетом результатов [35–38] позволяет сделать вывод, что в рассматриваемой системе (см. рис. 1) предельные значения температуры  $T_w$ , при которых возможны максимальные и минимальные скорости парообразования (а следовательно, и скорости уменьшения массы жидкости), равны 373 и 273 К соответственно. При этом установлено, что изменение температуры  $T_w$  в диапазоне от 273 до 373 К на 10 % приводит к увеличению скорости парообразования на 15–25 %.

На рис. 4 приведена зависимость  $\Delta R(R_m)$  в диапазоне значений начальной скорости движения каплей распыленной жидкости  $0,8 \text{ м/с} \leq U_m \leq 1,4 \text{ м/с}$ . Видно, что при начальных размерах каплей  $0,16 \text{ мм} < R_m \leq 0,23 \text{ мм}$  значение параметра  $\Delta R$  изменяется в среднем на 0,025, при  $0,23 \text{ мм} < R_m \leq 0,30 \text{ мм}$  — на 0,03, при  $0,30 \text{ мм} < R_m \leq 0,37 \text{ мм}$  —

на 0,035. Полученный результат можно объяснить тем, что при уменьшении начальной скорости перемещения капле увеличиваются характерные времена присутствия их в высокотемпературной области, а также времена прогрева приповерхностного слоя жидкости, при этом масса жидкости, испарившейся в процессе движения через газовую среду, увеличивается. В то же время следует отметить, что при относительно небольшом времени движения капле жидкости  $\tau_d$  через высокотемпературные газы (от 1 до 3 с) влияние начальной скорости перемещения капле является незначительным (изменение  $\Delta R$  составляет менее 0,05).

Анализ рис. 4 позволяет сделать вывод, что с увеличением времени  $\tau_d$  влияние начальных скоростей движения капле  $U_m$  на степень их испарения может стать более существенным. Этот вывод хорошо согласуется с результатами теоретических исследований [13, 14]. Установлено, что при характерных размерах высокотемпературной газовой области от 15 до 25 м (и соответственно при временах движения капле жидкости не менее 10 с) возможно 20 ÷ 30 %-е испарение одиночных капле [13, 14].

Проведенные эксперименты показали, что для канала длиной приблизительно 1 м изменение начальной скорости перемещения капле распыленной жидкости в диапазоне 0,8 ÷ 1,4 м/с не оказывает значительного влияния на степень их испарения (изменение параметра  $\Delta R$  не превышает 0,04). В то же время в результате экспериментов установлено, что при малых скоростях движения капле наблюдается частичный или полный разворот группы капле распыленной жидкости на входе в канал 13 (см. рис. 1), а также их унос высокотемпературными продуктами сгорания (т. е. возможно существенное изменение траектории движения капле и их объемной доли). Обнаружено, что при относительно небольшой начальной скорости (менее 0,5 м/с) распыленной жидкости на входе в высокотемпературную область происходит унос большого количества капле (до 40 %) восходящими продуктами сгорания (при их скоростях 2 ÷ 3 м/с). Экспериментальные исследования показали, что при начальных скоростях газопарокапельного потока более 5 м/с возможна реализация условий, при которых вся жидкость проходит через рассматриваемую газовую среду, практически не испаряясь. Это позволяет сделать вывод, что предельные значения начальных скоростей капле жидкости  $U_m$ , при которых возможно как интенсивное, так и достаточно умеренное ее испарение, существенно зависят от скоростей высокотемпературных газов.

Из результатов анализа зависимостей  $\Delta R(R_m)$ , полученных при различных начальных значениях основных параметров (характерных размеров, температуры, скорости перемещения) капле жидкости (см. рис. 3, 4), следует, что существенное влияние на интенсивность процесса их испарения оказывают дисперсность и температура жидкости, причем дисперсность является определяющим параметром. В сериях выполненных экспериментов установлено, что при варьировании  $\alpha_m$  и  $R_m$  в достаточно широких диапазонах значения интегрального параметра  $\Delta R$  изменяются в несколько раз. Этот результат можно объяснить взаимным влиянием двух соседних капле в потоке распыленной жидкости [13, 14]. В [13] показано, что капли, движущиеся на некотором расстоянии друг от друга, незначительно влияют на интенсивность испарения каждой из них (особенно при удалении на расстояние, равное нескольким характерным размерам  $R_m$ ). В [14] приведены изотермы для системы с двумя каплями жидкости, движущимися последовательно через высокотемпературную газовую среду. Установлено, что при перемещении капли существенно изменяются условия теплообмена в ее следе, т. е. в окрестности движущихся за ней капле, а следовательно, значительно уменьшается скорость их испарения [14].

**Заключение.** С использованием оптических методов диагностики газопарожидкостных сред PIV и PPI исследовано влияние основных параметров (характерных размеров, температуры, скорости перемещения), определяющих начальное состояние капле жид-

кости, на интегральные характеристики процесса их испарения в области высокотемпературных газов. Показано, что начальная температура воды  $T_w$  оказывает существенное влияние на интегральный параметр  $\Delta R$  (особенно при мелкодисперсном ( $R_m < 0,3$  мм) распылении жидкости). Изменение  $T_w$  в диапазоне  $293 \div 313$  К приводит к увеличению значения  $\Delta R$  на  $0,4 \div 0,6$ . Установлено, что увеличение скорости движения капель распыленной жидкости приводит к умеренному (не более чем на 5 %) изменению интегральных характеристик процесса испарения. При этом возможно более существенное изменение этих характеристик с увеличением времени перемещения капель в высокотемпературной газовой среде.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Sirignano W. A.** Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge: Cambridge Univ., 1999.
2. **Терехов В. И., Шаров К. А., Шишкин Н. Е.** Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газочапельной 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. **Zeng Y., Lee C. F.** A model for multicomponent spray vaporization in a high-pressure and high-temperature environment // J. Engng Gas Turbines Power. 2002. V. 124. P. 717–724.
5. **Пахомов М. А., Терехов В. И.** Численное моделирование течения и теплопереноса в опускном турбулентном газожидкостном потоке в трубе // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 5. С. 737–744.
6. **Morales-Ruiz S., Rigola J., Rodriguez I., Oliva A.** Numerical resolution of the liquid-vapour two-phase flow by means of the two-fluid model and a pressure based method // Intern. J. Multiphase Flow. 2012. V. 43. P. 118–130.
7. **Wei Liu, Hidesada Tamai, Kazuyuki Takase.** Pressure drop and void fraction in steam-water two-phase flow at high pressure // J. Heat Transfer. 2013. V. 135, N 8. 081502.
8. **Вараксин А. Ю.** Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.
9. **Никитин М. Н.** Использование парогазовой смеси при сжигании топлива // Пром. энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.
10. **Ибатуллин И. Д.** Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2008.
11. **Першин В. Ф.** Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. М.: Машиностроение, 2009.
12. **Исаев Е. А.** Теория управления окомкованием сыпучих материалов / Е. А. Исаев, И. Е. Чернецкая, Л. Н. Крахт, В. С. Титов. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2012.
13. **Стрижак П. А.** Влияние распределения капель в “водяном снаряде” на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инж.-физ. журн. 2013. Т. 86, № 4. С. 839–848.
14. **Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Численное исследование тепломассопереноса при движении “тандема” капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. 2012. № 12. С. 531–538.
15. **Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания // Инж.-физ. журн. 2013. Т. 86, № 6. С. 1327–1332.

16. **Ильин А. П.** Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов / А. П. Ильин, О. Б. Назаренко, А. В. Коршунов, Л. О. Роот. Томск: Том. политехн. ун-т, 2012.
17. **Кузнецов Г. В.** Зажигание конденсированных веществ при локальном нагреве / Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.
18. **Дубовицкий В. В., Подвысоцкий А. М., Шрайбер А. А.** Измерение периода собственных колебаний капель и двухкомпонентных частиц // Инж.-физ. журн. 1990. Т. 58, № 5. С. 804–808.
19. **Trinh E. H., Holt R. G., Thiessen D. B.** The dynamics of ultrasonically levitated drops in an electric field // Phys. Fluids. 1996. V. 8, N 1. P. 43–61.
20. **Волынский М. С.** Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986.
21. **Гегузин Я. Е.** Капля. М.: Наука, 1973.
22. **Keane R. D., Adrian R. J.** Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Appl. Sci. Res. 1992. V. 49. P. 191–215.
23. **Foucaut J. M., Stanislas M.** Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Sci. Technol. 2002. V. 13. P. 1058–1071.
24. **Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
25. **Ахметбеков Е. К., Маркович Д. М., Токарев М. П.** Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках // Вычисл. технологии. 2010. Т. 15, № 4. С. 57–72.
26. **Saleh W., Bowden R. C., Hassan I. G., Kadem L.** Techniques of PIV in stratified two-phase headers // Exp. Thermal Fluid Sci. 2011. V. 35, N 1. P. 82–95.
27. **Simo Tala J. V., Russeil S., Bougeard D., Harion J. L.** Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements // Exp. Thermal Fluid Sci. 2013. V. 50. P. 45–53.
28. **Damaschke N., Nobach H., Tropea C.** Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Exp. Fluids. 2002. V. 32, N 2. P. 143–152.
29. **Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М.** Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 1–13.
30. **Ibrahim E. A., Yangt H. Q., Przekwas A. J.** Modeling of spray droplets deformation and breakup // J. Propulsion Power. 1993. V. 9. P. 651–654.
31. **Hwang S. S., Liu Z., Reitz R. D.** Breakup mechanisms and drag coefficients of high-speed vaporizing liquid drops // Atomizat. Sprays. 1996. V. 6. P. 353–376.
32. **Guildenbecher D. R., Sojka P. E.** Experimental investigation of aerodynamic fragmentation of liquid drops modified by electrostatic surface charge // Atomizat. Sprays. 2011. V. 21. P. 139–147.
33. **Flock A. K., Guildenbecher D. R., Chen J., et al.** Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops // Intern. J. Multiphase Flow. 2012. V. 47. P. 37–49.
34. **Sprittles J. E., Shikhmurzaev Y. D.** Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment // Phys. Fluids. 2012. V. 24. 122105.
35. **Муратова Т. М., Лабунцов Д. А.** Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7, № 5. С. 959–967.
36. **Кнаке О., Странский И. Н.** Механизм испарения // Успехи физ. наук. 1959. Т. 68, № 2. С. 261–305.

37. **Терехов В. И.** Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках / В. И. Терехов, М. А. Пахомов. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2009.
38. **Авдеев А. А., Зудин Ю. Б.** Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 4. С. 565–574.

*Поступила в редакцию 13/І 2014 г.,  
в окончательном варианте — 28/ІІ 2014 г.*

---