

03

## **Движение совокупности капель мелкодисперсной жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов**

© Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 30 января 2014 г.

Выполнено экспериментальное исследование движения совокупности капель жидкости во встречном потоке высокотемпературных (более 1000 К) газов при варьировании начальных размеров (0.01–0.5 mm) и скоростей (0.1–5 m/s) капель, а также скоростей (0.1–2 m/s) газов. Используются оптические методы диагностики газопарокапельных смесей. Установлены условия, при которых происходит существенное изменение траекторий и скоростей перемещения капель в области высокотемпературных газов.

Процессы формирования газопарокапельных смесей характеризуются [1–4] сложными механизмами тепломассопереноса. Области применения таких смесей расширяются [5–7]. Однако до настоящего времени не разработаны теоретические положения, позволяющие прогнозировать состав таких смесей. Особый интерес представляют выделенные процессы для высокотемпературных (более 1000 К) смесей. Анализ [8–10] позволяет сделать вывод о том, что выполнить исследование рассматриваемых процессов с использованием вычислительных программных комплексов достаточно сложно. Скорее всего, установить основные характеристики таких процессов можно только с применением оптических методов диагностики двухфазных потоков (например, Particle Image Velocimetry (PIV) и Interferometric Particle Imaging (IPI)) [10].

При проведении экспериментов использовалась установка [9], включающая: синхронизирующий процессор (максимальная дискретизация сигналов 10 ns), двойной импульсный твердотельный лазер (длина волны 532 nm, минимальная энергия в импульсе 70 mJ, максимальная длительность импульса 12 ns, частота повторений 15 Hz), кросскорреляционную видеокамеру (формат изображения 2048 × 2048 пикселей,

кадровая частота 1.5 Hz, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами 5  $\mu$ s).

В качестве распыляемой жидкости применялась вода со специальными включениями — „трассерами“, представляющими примесь (0.5 mass.%) нанопорошка диоксида титана. Последние вводились для повышения контрастности видеogramм.

В качестве функций цели экспериментов приняты: скорость перемещения ( $U_m$ ), размеры ( $R_m$ ) и относительная объемная концентрация ( $\alpha_m$ ) капель жидкости в регистрационной области видеogramм. Введен в рассмотрение параметр  $\Delta R$ , характеризующий изменение размеров капель при движении через высокотемпературную газовую среду относительно их начального радиуса  $R_m$ .

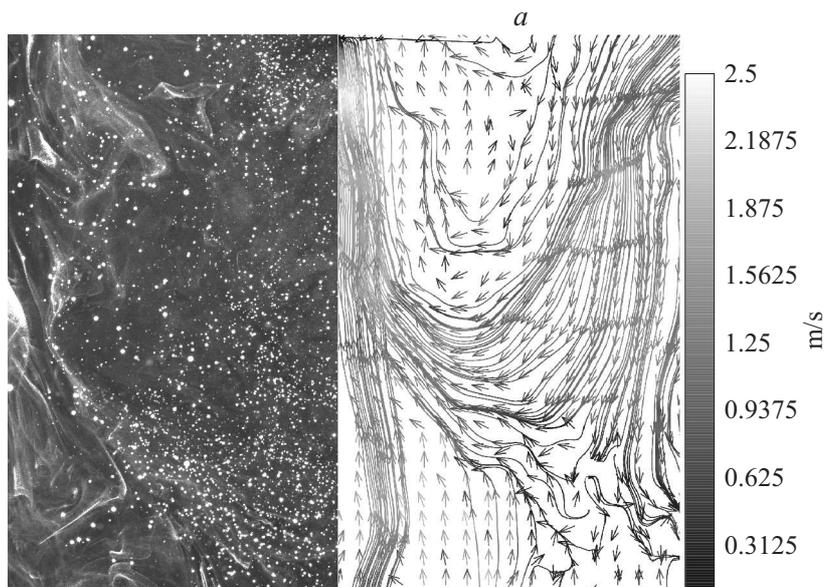
$$\Delta R = (R_m - R_m^*)/R_m,$$

где  $R_m^*$  — значение среднего условного радиуса капли на выходе из канала с газами, mm.

Для генерации совокупности капель жидкости с заданными начальными размерами использовался распылитель [9]. В качестве характерного размера капель выбран средний условный радиус  $R_m$  (аналогично экспериментам [9]), так как капли жидкости при движении в потоке газов принимают форму эллипсоидов (после обработки видеogramм рассчитывались от 6 до 10 максимальных диаметров и определялись значения  $R_m$ ). Начальные размеры капель и их скорости задавались в диапазонах  $0.01 < R_m < 0.5$  mm,  $0.1 < U_m < 5$  m/s.

Методика проведения экспериментов аналогична представленной в [9]. В отличие от опытов [9] для варьирования начальных скоростей вдува капель жидкости в выделенном диапазоне применялась специализированная нагнетательная система.

Аналогично экспериментам [9] для формирования высокотемпературной газовой среды с контролируемыми параметрами использовался вертикальный цилиндрический канал (высота 1 m, внутренний диаметр 0.3 m). В основании этого канала устанавливалась горелка с варьируемой скоростью вдува ( $0.1 < U_g < 2$  m/s) высокотемпературных ( $1070 \pm 30$  K) продуктов сгорания (газов). Распределения скоростей газов и капель вводимой мелкодисперсной жидкости в цилиндрическом канале определялись по скоростям перемещения „трассеров“ с применением метода PIV [10], размеры капель в регистрационных областях



**Рис. 1.** Видеogramмы совокупности капель жидкости и поля скоростей „трассирующих“ частиц на входе (a) и выходе (b) из высокотемпературного канала при  $U_g = 1 \text{ m/s}$  и  $U_m = 1.5 \text{ m/s}$ .

видеogramм (до и после высокотемпературной газовой среды) — с использованием метода IPI [10].

При обработке видеogramм капли условно разделялись (по начальным размерам) на несколько групп: 1 —  $0.01 \leq R_m < 0.08$ , 2 —  $0.08 \leq R_m < 0.16 \text{ mm}$ , 3 — при  $0.16 \leq R_m < 0.23 \text{ mm}$ , 4 — при  $0.23 \leq R_m < 0.3 \text{ mm}$ , 5 — при  $0.3 \leq R_m < 0.4 \text{ mm}$ . Выбор диапазонов изменения  $R_m$  для соответствующих групп капель обусловлен спецификой кросскорреляционных преобразований, применяемых в оптических методах PIV и IPI [10].

Систематические погрешности измерения температуры газов не превысили 2.5%, размеров капель — 1.5%, скоростей „трассеров“ — 2%.

В процессе проведения экспериментов регистрировались видеоизображения совокупности капель распыленной жидкости на входе и выходе из высокотемпературного канала (рис. 1). Видно, что при движении

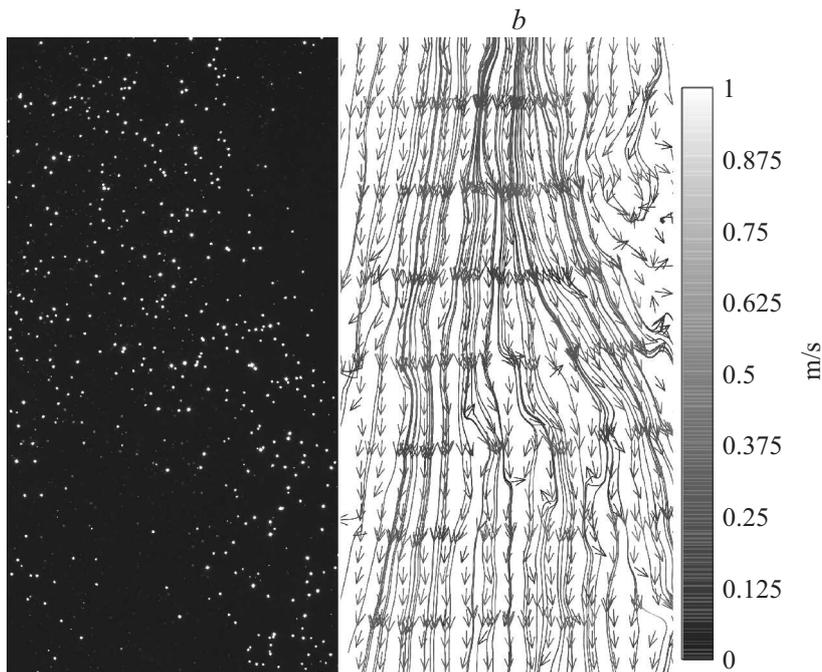


Рис. 1 (продолжение).

через газы существенно изменяются траектории перемещения капель жидкости (рис. 1). Чем меньше значения  $U_m$ , тем более существенно изменяются траектории рассматриваемых капель. Следует отметить, что на входе в высокотемпературную область (рис. 1, *a*) реализуются более интенсивные завихрения по сравнению с выходом (рис. 1, *b*). Полученный результат обусловлен тем, что на входе в высокотемпературную газовую среду в потоке распыленной жидкости движутся капли с радиусами от 10 до 500  $\mu\text{m}$ . Траектории движения малых по размерам капель ( $R_m < 150 \mu\text{m}$ ) меняются (рис. 1) существенно. На выходе из высокотемпературного канала вследствие интенсивного испарения жидкости движется значительно меньшее число капель (относительно крупные по начальным размерам). Так как действие высокотемпературных газов на эти капли минимально на выходе из канала, то последние

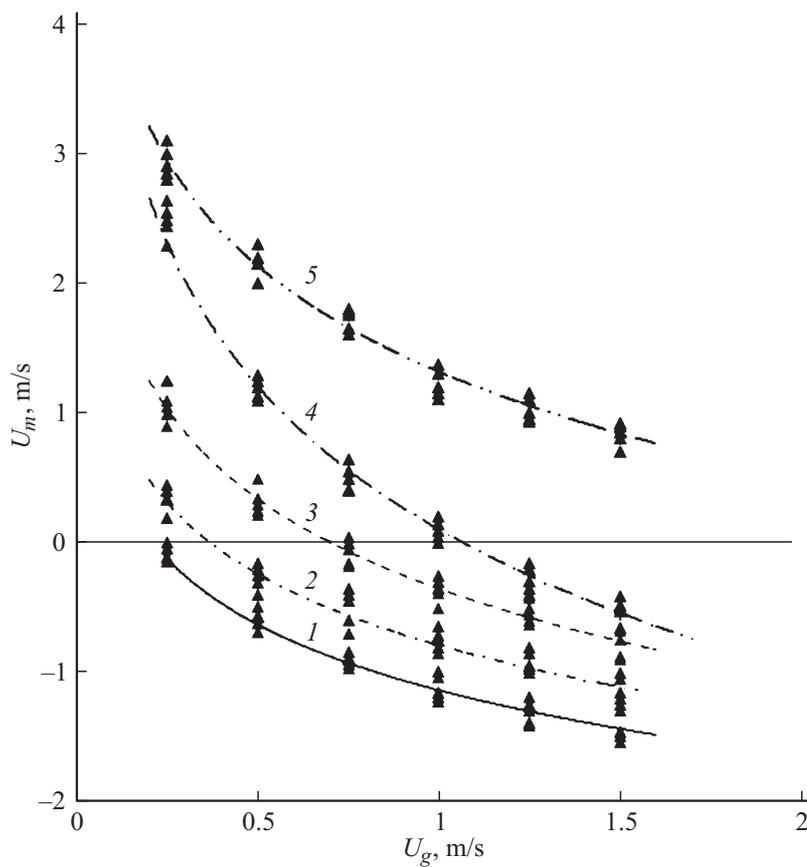
движутся по траекториям, совпадающим с вектором массовых сил (рис. 1, *b*).

Установлено значительное изменение концентрации ( $\alpha_m$ ) рассматриваемых групп капель относительно начальных ( $\alpha_m = 1$  для всей совокупности капель в регистрационной области видеокadra). Так, концентрация  $\alpha_m$  капель групп 3–5 на выходе из канала с высокотемпературными газами составляет около 0.85, для групп 1 и 2 соответственно  $\alpha_m \approx 0.15$ . На входе же в канал концентрация  $\alpha_m$  капель групп 1 и 2 составляет около 0.5.

В результате анализа значений  $\alpha_m$ , полученных в серии экспериментов, установлено, что объемная концентрация капель на выходе из высокотемпературной области незначительно (менее 0.05) изменяется с ростом их начальных скоростей в диапазоне от 0.5 до 2 м/с. При  $U_m < 0.5$  м/с концентрация  $\alpha_m$  меняется существенно (в несколько раз). Однако это вызвано не только интенсификацией парообразования, но и „торможением“, а также последующим „уносом“ доли капель газами. При  $U_m > 2$  м/с значительно уменьшается время движения капель жидкости через высокотемпературную область. При ее ограниченных размерах существенно снижается время испарения. Как следствие, уменьшается массопереход паров жидкости в газовую фазу (с ростом  $U_m$  концентрация паров в канале нелинейно снижается (рис. 1, *b*)). Это приводит к небольшому изменению  $\alpha_m$  и малым (менее 0.1) значениям  $\Delta R$ .

На рис. 2 приведены зависимости скоростей движения капель жидкости  $U_m$  от скоростей газов  $U_g$  при различных  $R_m$ . Значения скорости капель  $U_m < 0$  м/с соответствуют изменению направления их движения в высокотемпературной области на противоположное (совпадающее с вектором скорости  $U_g$ ).

С использованием полученных видеogramм и полей скоростей (в частности, приведенных на рис. 1) установлено, что при разномаштабных вихреобразованиях на входе в высокотемпературную газовую среду малые ( $R_m < 0.16$  мм) капли уносятся газами и сливаются с другими, поступающими сверху каплями (рис. 1). Вследствие этого происходит изменение направления их движения, и объединенные капли частично (как правило, 15–20% от общего числа капель при начальных характерных размерах  $0.2 \leq R_m < 0.5$  мм) проходят через высокотемпературный канал. Эксперименты показали, что эти процессы реализуются циклически.



**Рис. 2.** Зависимости скоростей каплей жидкости  $U_m$  от значений  $U_g$ : 1 — при  $0.04 \leq R_m \leq 0.09$  mm, 2 — при  $0.09 < R_m \leq 0.16$  mm, 3 — при  $0.16 < R_m \leq 0.23$  mm, 4 — при  $0.23 < R_m \leq 0.3$  mm, 5 — при  $0.3 < R_m \leq 0.4$  mm.

Выявленные эффекты показывают, что определяющую роль при смешении газо- и парожидкостных потоков играет явление коагуляции каплей жидкости. Этот процесс зарегистрирован для каплей, имеющих, как правило, различные размеры и скорости, но достаточно близкие траектории перемещения. Полученные в экспериментах поля скоростей

„трассеров“ (рис. 1) позволили выделить два основных механизма возникновения явления коагуляции капель жидкости в потоке высокотемпературных газов: поток газов способствует „торможению“ идущих во фронте парожидкостной смеси водяных капель, их „развороту“ и последующему слиянию с идущими навстречу каплями жидкости; капли, попадая в завихрения газов, сливаются между собой (одна „догоняет“ другую при интенсивном испарении первой и достаточно медленном — последующих).

Появление эффекта коагуляции существенно зависит от концентрации капель в потоке распыленной жидкости ( $\alpha_m$ ). Так, при достаточно малых (до 10 капель с размерами  $0.2 < R_m \leq 0.5$  mm в объеме более  $1000$  mm<sup>3</sup>) концентрациях слияние капель носит практически единичный характер. С увеличением концентрации реализация этих процессов уже закономерна. При этом зарегистрированы оба описанных выше механизма коагуляции. Выявленные особенности коагуляции капель жидкости в газовой среде хорошо соответствуют заключениям [8], сделанным с использованием модели тепломассопереноса в системе с двумя перемещающимися последовательно в потоке газов каплями.

В экспериментах установлено, что при относительно небольших временах (до 2 s) движения капель жидкости через высокотемпературные газы и  $U_m \approx U_g$  влияние начальной скорости перемещения капель на параметр  $\Delta R$  достаточно умеренное. При размерах высокотемпературного канала около 1 m изменение  $\Delta R$  происходит менее чем на 0.05 при варьировании  $U_m$  в диапазоне  $0.5 < U_m < 1.5$  m/s. С ростом длины высокотемпературного канала до 2–3 m происходит усиление влияния  $U_m$  на параметр  $\Delta R$  (но не более чем на 0.1).

Результаты выполненных экспериментов иллюстрируют более существенное влияние начальных размеров капель жидкости на интегральные характеристики их испарения и движения в области высокотемпературных газов по сравнению с начальной скоростью. Полученный результат можно объяснить выявленными в экспериментах специфическими особенностями действия силы сопротивления капель жидкости в высокотемпературном газовом потоке. Известно [4], что с ростом размеров перемещаемого тела возрастет сила сопротивления на него (несмотря на рост силы тяжести). Так как капли жидкости перемещаются в высокотемпературной газовой среде, то на их поверхности реализуются условия интенсивного парообразования. Это приводит к росту силы сопротивления на 15–20% [8]. С увеличением размеров

капель влияние фазовых превращений на силу сопротивления возрастает также существенно нелинейно [8]. Кроме того, повышается [4] вклад большой группы факторов в изменение условий протекания и, как следствие, характеристики теплопереноса в малой окрестности капле (например, конфигурации поверхности тела, его положения относительно направления движения обтекающего потока, конвективных течений внутри капле и нестационарности их перемещения). При повышении начальной скорости перемещения капле в газовой среде и адекватных значениях  $R_m$  сила сопротивления изменяется нелинейно [4]. Однако при  $0.1 < U_m < 2$  м/с это изменение достаточно мало [8]. Вклад фазовых превращений в изменение условий теплообмена на границе „газ–жидкость“ сопоставим для диапазона  $0.1 < U_m < 2$  м/с (так как температура на этой границе практически постоянна и равна температуре кипения жидкости [8] при  $T_f = 1070 \pm 30$  К вне зависимости от  $U_m$ ). Как следствие, влияние скоростей  $U_m$  на характеристики испарения жидкости более умеренное по сравнению с  $R_m$ .

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

## Список литературы

- [1] Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. // ТИА. 1999. Т. 6. В. 3. С. 331–341.
- [2] Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Невмержицкий Н.Н. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 3. С. 9–14.
- [3] Алеханов Ю.В., Близнецов М.В., Власов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 1–6.
- [4] Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2013. Т. 51. В. 3. С. 421–455.
- [5] Никитин М.Н. // Промышленная энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.
- [6] Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J.T. // Suppression and Detection Research and Applications Conference. Orlando, USA, 2007.
- [7] Сокоиков В.В., Тугов А.Н., Гришин В.В., Камышев В.Н. // Энергетик. 2008. № 6. С. 37–38.
- [8] Strizhak P.A. // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V. 86. P. 895–904.
- [9] Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V. 86. P. 1313–1418.
- [10] Westerweel J. // Measurement Science and Technology. 1997. V. 8. P. 1379–1392.