

03

Критериальные выражения для условий торможения и последующего уноса капель воды высокотемпературными газами

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: pavelspa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 29 декабря 2014 г.)

На основе результатов экспериментальных исследований процессов перемещения через высокотемпературные (около 1100 К) газы капель воды (размеры от 50 до 500 μm) определены условия (в виде критериальных выражений) торможения последних и уноса движущимися в противоположном направлении газами. Введены в рассмотрение числа Рейнольдса дисперсной и несущей фаз как характеристики рассматриваемого процесса. Применены оптические методы Particle Image Velocimetry (PIV) и Interferometric Particle Imaging (IPI), кросскорреляционный видеокомплекс с импульсным лазером, а также высокоскоростная (10^5 кадров в секунду) видеокамера. Начальные скорости встречного движения капель воды и газов варьировали в достаточно типичных для многих приложений диапазонах 0.5–5 и 0.5–2.5 м/с соответственно. Показана возможность прогностического моделирования условий торможения капель с использованием относительно простой модели взаимодействия одиночных элементов дисперсной фазы и высокотемпературных газов. Ключевые слова: капля, вода, высокотемпературные газы, торможение, унос, критериальные выражения.

Введение

В экспериментах [1–5] установлены основные закономерности фазовых превращений и процессов деформации капель полидисперсного водяного потока при движении через высокотемпературные (около 1100 К) газы (в условиях, соответствующих типичным технологиям с использованием газопарокапельных сред, например [6–10]). Результаты этих экспериментов (в частности, [1]) можно использовать при прогнозировании характерных условий торможения капель во встречном потоке газов и последующего уноса в противоположном начальном направлении. Выделенные процессы важны для различных технологий с использованием газов при высоких, умеренных и даже низких температурах (в частности, [11–17]). Однако данные экспериментов [1–3] не обобщены в виде критериальных выражений, характеризующих условия торможения и возможного последующего уноса капель высокотемпературным газовым потоком. Важно оценить силы, действующие на капли в процессе перемещения, в частности, выделить доминирующие. Это необходимо для достоверного моделирования соответствующих процессов с использованием современной теории тепло-массопереноса и гидродинамики.

Цель настоящей работы — получение по результатам экспериментальных исследований критериальных выражений, описывающих условия торможения и последующего уноса капель воды высокотемпературными газами.

Экспериментальный стенд и методы исследований

Применяемые экспериментальные методика и стенд (рис. 1) аналогичны используемым в опытах [1–3].

В отличие от экспериментов [1–3] помимо кросскорреляционного видеокомплекса дополнительно применялась высокоскоростная (10^5 кадров в секунду) видеокамера (рис. 1) для уменьшения погрешностей регистрации параметров движения капель жидкости во встречном потоке газов. Использование такого средства регистрации позволило снизить систематические ошибки определения скоростей перемещения капель, а также их характерных размеров на 11 и 7% соответственно по сравнению с методиками [1–3].

Исследовалось движение капель полидисперсного водяного потока в канале полого прозрачного вертикального цилиндра $I3$ (высота 1 м и диаметр 0.3 м) [1–3] во встречном потоке высокотемпературных (около 1100 К) газов. Начальные характерные размеры капель варьировали в диапазоне $0.05 \leq R_m \leq 0.5$ мм. Этот диапазон можно считать наиболее перспективным и достаточно типичным, например, для технологий термической очистки воды [18,19] от твердых и жидких загрязнителей. Для оценки влияния размеров капель на интегральные характеристики их торможения газами все капли разделялись на пять групп: $0.05 \leq R_m \leq 0.09$, $0.09 < R_m \leq 0.16$, $0.16 < R_m \leq 0.23$, $0.23 < R_m \leq 0.35$, $0.35 < R_m \leq 0.5$ мм. Относительная объемная концентрация капель в соответствии с условиями применения методов PIV и IPI [20–25] поддерживалась в экспериментах в диапазоне $0.001 - 0.0012$ м³ капель жидкости на м³ газа.

Начальные скорости газов U_g изменялись в диапазоне от 0.5 до 2.5 м/с с использованием нагнетательной системы (аналогично методикам [1–3]). Начальные скорости движения капель воды U_m в экспериментах варьировались в диапазоне от 0.5 до 5 м/с. Скорость каждой капли определялась по скоростям

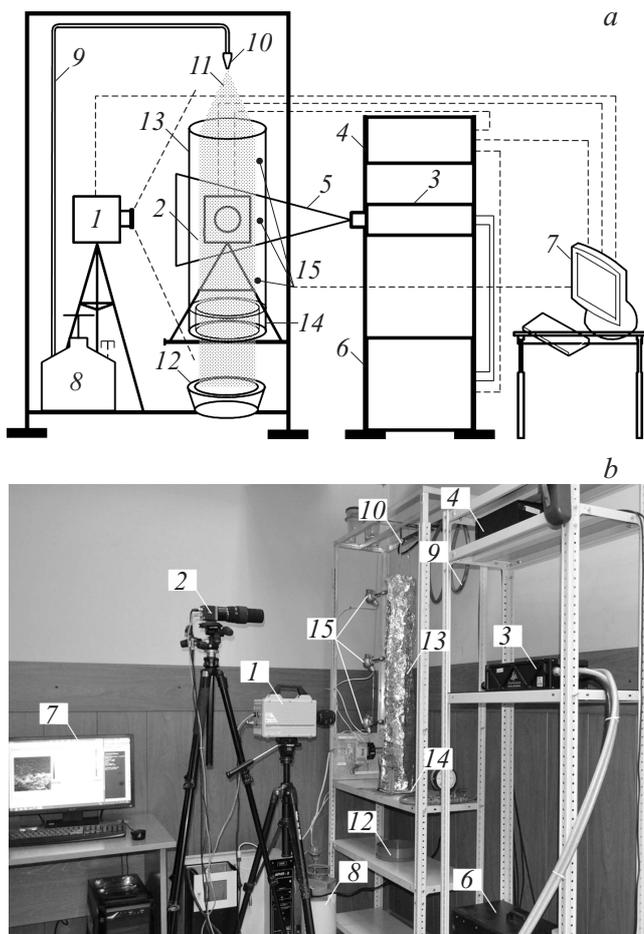


Рис. 1. Схема (а) и фото (б) экспериментального стенда: 1 — видеокамера, 2 — кросскорреляционная камера, 3 — двойной твердотельный импульсный лазер, 4 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера, 5 — световой „нож“, 6 — генератор лазерного излучения, 7 — ПК, 8 — емкость с водой, 9 — канал подачи воды, 10 — распылитель, 11 — капли воды, 12 — уловитель, 13 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала, 14 — полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горячая жидкость, 15 — термопары.

входящих в ее состав „трассеров“ (накладывались видеозображения капель и поля скоростей „трассеров“ [1–3]).

Систематические погрешности определения R_m , U_g и U_m с применением панорамных оптических методов PIV и IPI, а также соответствующего видеорегистрирующего комплекса экспериментального стенда (рис. 1) не превышали 1.6 и 2.1% соответственно. Максимальные случайные погрешности составили: R_m — 2.1, U_g и U_m — 3.4%.

Температура газов в канале 13 аналогично экспериментам [1–5] поддерживалась в пределах 1070 ± 30 К. Ее регистрация выполнялась хромель-копелевыми термопарами на разных по высоте отметках (в цилиндре 13) — 0.15, 0.5 и 0.85 м с погрешностью измерения ± 3.3 К.

Результаты и обсуждение

Аналогично экспериментам [1–3] видеogramмы процессов смешения газового и капельного потоков регистрировались на входе в канал 13 (рис. 1) с высокотемпературными газами. На рис. 2 представлено типичное поле скоростей „трассеров“ в области смешения рассматриваемых потоков.

Методами PIV и IPI определялись характерные значения скоростей капель и их размеров в соответствующих сечениях видеogramм. Так, например, на рис. 2 представлено несколько поперечных и продольных (относительно начального направления движения капель и газов) сечений для типичного поля скорости „трассеров“. Начальное направление движения капель на видеogramмах соответствовало перемещению сверху вниз, а газов соответственно снизу вверх. С применением метода PIV определялись значения компонент скоростей „трассеров“ в поперечном (U_x) и продольном (U_y) направлениях (на рис. 3 и 4 приведены типичные профили скоростей U_x и U_y) и вычислялись мгновенные скорости „трассеров“ $U_t = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$. По ним рассчитывались значения U_m . Скорости газов U_g (аналогично экспериментам [1–3]) определялись методом PIV [20–22] за счет ввода „трассирующих“ частиц. Для этих целей проводились дополнительные эксперименты перед основными опытами с вводом капель жидкости в высокотемпературные газы.

В результате обработки экспериментальных данных установлены характерные значения скоростей и размеров капель, при которых последние тормозятся и уносятся газами. Для обобщения результатов исследований в соответствии с принятыми в общей теории тепло-массообмена и гидродинамики в газокapельных потоках

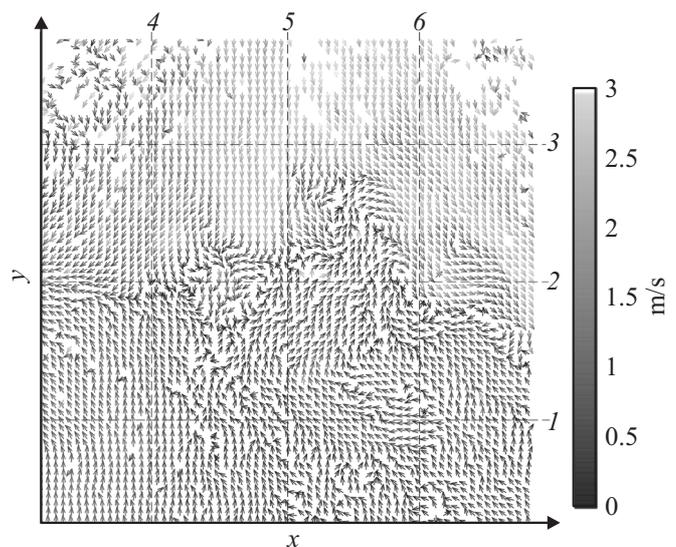


Рис. 2. Поле скоростей „трассеров“ в области смешения капельного и газового потоков при начальных значениях $U_m = 1.5$ м/с и $U_g = 2$ м/с: 1–3 — поперечные сечения, 4–6 — продольные сечения.

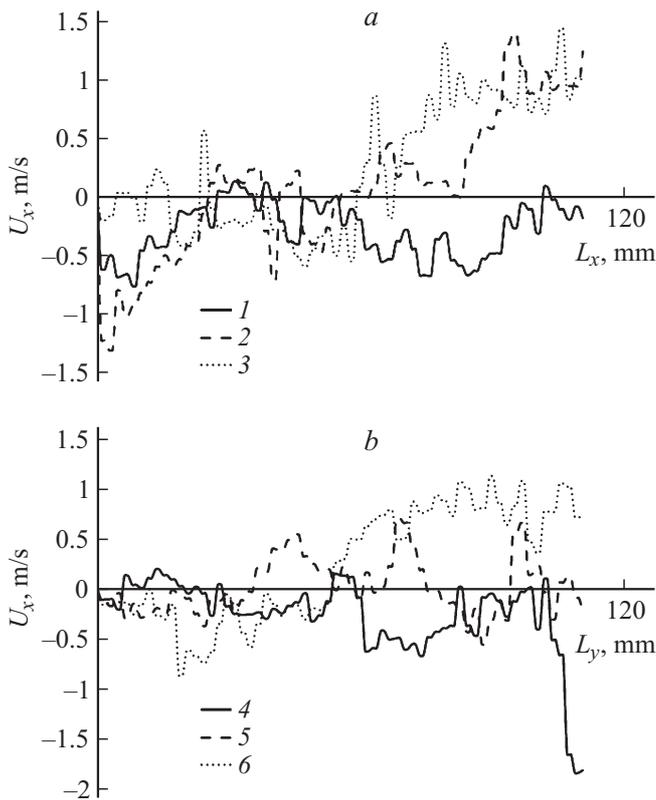


Рис. 3. Скорости U_x капле в поперечных (а) и продольных (б) сечениях видеоролика (1–3 — поперечные сечения, 4–6 — продольные сечения).

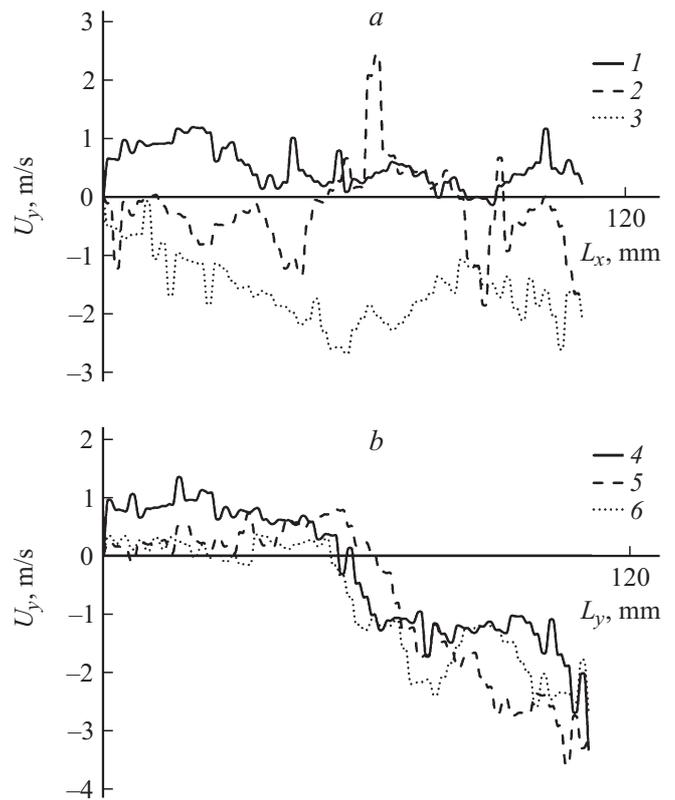


Рис. 4. Скорости U_y капле в поперечных (а) и продольных (б) сечениях видеоролика (1–3 — поперечные сечения, 4–6 — продольные сечения).

подходами [26] введены в рассмотрение безразмерные критерии — числа Рейнольдса капле воды и газов:

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

где ν_g — кинематическая вязкость газов, m^2/s ; R_c — характерный размер (радиус) цилиндрического канала с высокотемпературными газами, m .

На рис. 5 приведена зависимость $Re'_d = f(Re_g)$, характеризующая условия торможения и последующего уноса капле газами. Так, при параметрах, соответствующих области 1 (рис. 5), капли тормозятся и уносятся газами. В области 2 (рис. 5) капли сохраняют начальное направление перемещения.

Для рассмотренных в проведенных экспериментах диапазонов изменения размеров капле ($0.05 \leq R_m \leq 0.5 \text{ mm}$), скоростей их движения ($0.5 \leq U_m \leq 5 \text{ m/s}$), а также газового потока ($0.5 \leq U_g \leq 2.5 \text{ m/s}$) можно выделить соответствующую представленной на рис. 5 аппроксимационную зависимость:

$$Re'_d = 4 \cdot 10^{-8} Re_g^2 - 0.0011 Re_g + 12.028.$$

Эта зависимость представляет критериальное выражение для прогнозирования условий торможения капле во встречном потоке высокотемпературных газов. Получен-

ные результаты показывают, что с использованием разработанной экспериментальной методики можно получить подобные критериальные выражения для довольно широких диапазонов изменения R_m , U_m и U_g .

Из анализа основных возможных механизмов взаимодействия капле с газами в условиях фазовых превращений жидкостей [26] можно сделать вывод о том, что характер зависимости $Re'_d = f(Re_g)$ обусловлен влиянием

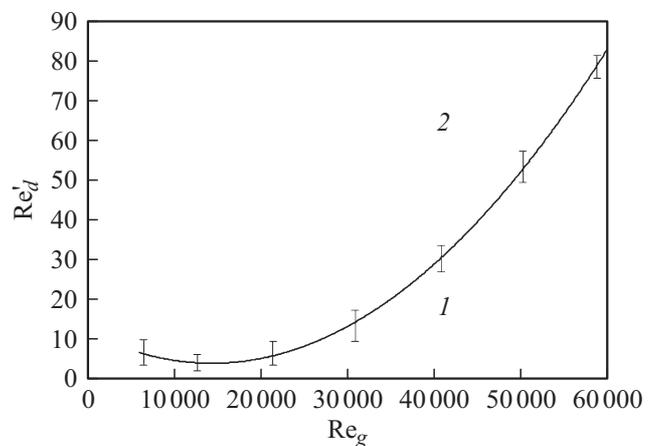


Рис. 5. Характерные области параметров капле и газов: 1 — капли уносятся газами, 2 — капли сохраняют начальное направление движения.

суммы сил, действующих на капли жидкости в потоке высокотемпературных газов. Основными [26] являются силы сопротивления (F_a), тяжести (F_g), Сэффмена (F_s), Магнуса (F_m), турбофореза (F_t) и термофореза (F_h). Их значения в рассматриваемом случае вычисляются с использованием выражений [26]:

$$F_a = C_d \rho_g R_m^2 \frac{|U_g - U_m|(U_g - U_m)}{2}, \quad (1)$$

$$F_g = \rho_w \frac{8\pi R_m^3}{6} g, \quad (2)$$

$$F_s = k_s (\mu_w / \rho_w)^{0.5} 4R_m^2 (U_g - U_m) \left| \frac{\partial U_g}{\partial r} \right|, \quad (3)$$

$$F_m = 0.5 k_m \rho_g R_m^2 |U_g - U_m| \frac{\Omega \times (U_g - U_m)}{\Omega}, \quad (4)$$

$$F_t = -0.5 \rho_w \frac{\pi R_m^3}{6} \frac{\partial V_g^2}{\partial r}, \quad (5)$$

$$F_h = -\frac{4.5 \mu_g^2 \lambda_g R_m}{\rho_g (2\lambda_g + \lambda_w)} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (6)$$

где C_d — коэффициент сопротивления капли, ρ_g и ρ_w — плотность газов и воды, kg/m^3 , g — ускорение свободного падения, m/s^2 , k_s — коэффициент пропорциональности силы Сэффмена, μ_g и μ_w — динамическая вязкость газов и воды, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, r — радиальная координата, m , k_m — коэффициент пропорциональности силы Магнуса, Ω — скорость относительного вращения капли ($\Omega - 0.5 \nabla \times U_g - \omega$), s^{-1} , ω — абсолютная скорость вращения капли, s^{-1} , V_g — флуктуационные скорости газов, m/s , λ_g и λ_w — теплопроводность газов и воды, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, T — температура, K .

Число Рейнольдса капель воды в проведенных экспериментах изменялось в диапазоне $0 < \text{Re}'_d < 100$, соответствующем диапазонам типичных газок капельных технологий, например [6–10]. В соответствии с формулой Шиллера–Неймана при $0 < \text{Re}'_d < 1000$ коэффициент сопротивления C_d составляет [26]

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}'_d} (1 + 0.15 \text{Re}'_d^{0.687}).$$

Для коэффициента пропорциональности силы Сэффмена известно выражение [26]

$$k_s = \frac{4.1126}{\text{Re}_s^{0.5}} f(\text{Re}'_d, \text{Re}_s),$$

где

$$f(\text{Re}'_d, \text{Re}_s) = (1 - 0.3314\beta^{0.5}) \exp(-0.1\text{Re}'_d) + 0.3314\beta^{0.5} \text{ при } 1 < \text{Re}'_d < 40,$$

$$f(\text{Re}'_d, \text{Re}_s) = 0.0524(\beta \text{Re}'_d)^{0.5} \text{ при } 40 < \text{Re}'_d < 100,$$

$$\text{Re}_s = \frac{4\rho_g R_m^2 |\omega|}{\mu_g}, \quad \beta = 0.5 \frac{\text{Re}_s}{\text{Re}'_d}.$$

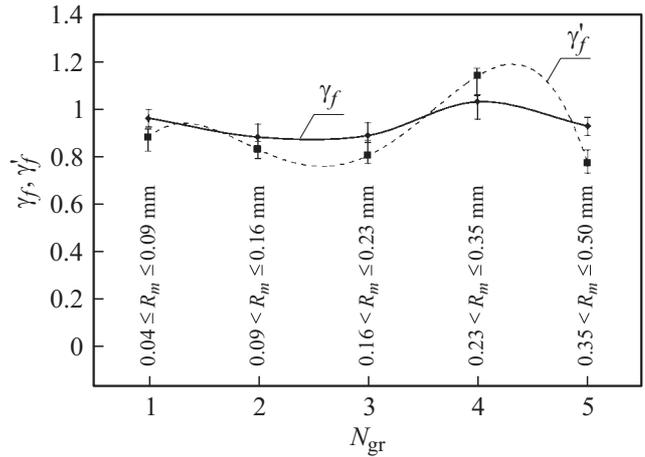


Рис. 6. Значения критериев γ_f и γ'_f для разных по начальным размерам (R_m) групп капель (N_{gr} — номер группы).

Коэффициент пропорциональности силы Магнуса составляет [26]

$$k_m = 0.45 + \left(\frac{\text{Re}_m}{\text{Re}'_d} - 0.45 \right) \exp(0.0568 \text{Re}_m^{0.4} \text{Re}'_d{}^{0.3}),$$

где

$$\text{Re}_m = \frac{4\rho_g R_m^2 |\Omega|}{\mu_g}.$$

Капли могут полностью остановиться в газовом потоке при условии равенства нулю суммы сил (F_a , F_g , F_s , F_m , F_t , F_h), действующих на них. Учитывая физические особенности взаимодействия газов и капль [26] в условиях проведенных экспериментов, можно ввести в рассмотрение безразмерный коэффициент $\gamma_f = (F_a + F_s + F_m + F_t + F_h)/F_g$ и сформулировать условие торможения капль в виде $\gamma_f = 1$. При $\gamma_f < 1$ капль сохраняют начальное направление движения, а при $\gamma_f > 1$ уносятся газовым потоком.

На рис. 6 приведены рассчитанные по результатам экспериментов значения параметра γ_f для условий, соответствующих зависимости $\text{Re}'_d = f(\text{Re}_g)$ на рис. 5. Также на рис. 6 приведены характерные значения параметра γ'_f , представляющего отношение двух основных (как показала обработка результатов проведенных экспериментов) действующих на капль (F_a и F_g) сил. В качестве первого приближения при вычислении γ_f и γ'_f принималось $\rho_g = 2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $\mu_w = 3.1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\mu_g = 4.3 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda_w = 0.58 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_g = 0.07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Скорости вращения капль и флуктуационные скорости газов определялись по видеogramмам экспериментов методом PIV и средствами скоростной видеорегистрации. Для измерения характерных перепадов температуры газов на линиях тока капль применялись три хромель-копелевые термодпары (диапазон измерений и погрешности указаны выше).

Анализ отклонений значений γ_f и γ'_f на рис. 6 показывает, что при прогнозировании условий торможения и последующего уноса капль в потоке газов

можно рекомендовать к использованию коэффициент γ'_f , характеризующий отношение лишь основных действующих на капли (F_a и F_g) сил. При этом немонотонный характер изменения γ_f и γ'_f (рис. 6) для разных групп капель можно объяснить соответствующими погрешностями определения параметров исследуемых процессов и значений используемых при теоретическом анализе констант ($\rho_g, \rho_w, \mu_g, \mu_w, \lambda_g, \lambda_w$ и др.). Так, например, обусловленные объективными причинами отклонения плотности и теплопроводности газов хотя бы на 1–2% от табличных значений приводят к соответствующим отклонениям в вычислении значений сил, действующих на одиночную каплю.

Представленные на рис. 6 распределения γ_f и γ'_f по размерам капель позволяют сделать неочевидный, на первый взгляд, вывод. Изменение почти в 10 раз значений R_m приводит к изменению не более чем на 10% (при полном учете всех действующих сил) параметра γ_f , определяющего (по данным экспериментов) условия останковки и разворота капель во встречном потоке высокотемпературных газов. Установленная закономерность может быть объяснена следующим образом. Увеличение размеров капель приводит к росту сил инерции [26]. При этом растут и силы сопротивления движению любых тел в жидких и газовых средах [26]. Но специфика исследовавшихся процессов заключается в том, что в отличие от обычных неиспаряющихся сфер, цилиндров или эллипсоидов, движущихся в потоке газов с умеренной температурой, капли воды при движении в высокотемпературной среде интенсивно испаряются. При этом скорость испарения (зависящая от температуры поверхности капли экспоненциально [27–29]) достигает максимальных значений на передней части капли [30–32]. Соответственно с этого участка поверхности происходит интенсивный вдув водяных паров в пристенную область. За счет этого вдува происходит торможение капли. При высоких скоростях U_m этот вклад незначителен. Но при относительно низких скоростях движения капель влияние вдува водяных паров в пристенную область может быть значительным. При этом следует учитывать также и вдув паров воды с боковых участков поверхности капли. Этот приток массы также способствует ее торможению. В итоге существенное изменение размеров капель приводит к гораздо менее значительному росту параметра γ_f . Также необходимо отметить, что, как показывают результаты теоретических (численных) исследований [30–32], образующиеся при испарении воды пары обтекают капли и частично заполняют область ее следа. В результате на „тыльной“ (задней) поверхности капли температура и соответственно скорость испарения воды будут много меньше по сравнению с этими же характеристиками на „лобовой“ (передней) поверхности, и вдув паров с „тыльной“ части ее поверхности будет существенно менее интенсивным.

Результаты выполненных исследований можно использовать при выборе допустимых (с точки зрения энерго- и ресурсоэффективности) диапазонов изменения основных технологических параметров высокотемпературных (термических) систем водоподготовки на

тепловых и атомных электростанциях, формирования газопарокапельных теплоносителей на базе дымовых газов и парожидкостных потоков, газожидкостных смесей для обработки зашлакованных поверхностей энергетического оборудования, а также систем полидисперсного пожаротушения.

Заключение

Выполненные с высокой разрешающей способностью регистрирующей аппаратуры эксперименты обеспечили информационную базу для обработки экспериментальных данных в виде критериальной зависимости, связывающей основные (значимые) для исследуемых процессов критерии — числа Рейнольдса дисперсной и несущей фаз в достаточно широких диапазонах их изменения (соответствуют группе широко применяющихся технологий, например [1–9]).

Полученные результаты развивают современные представления о процессах гидродинамики и тепломассопереноса при формировании газопарокапельных смесей в условиях высоких температур. С их использованием можно прогнозировать условия уноса капель высокотемпературными газами (рис. 5). Результаты экспериментов также позволяют сделать вывод о возможности проведения с удовлетворительной надежностью прогностического анализа условий торможения капель с учетом только основных действующих сил.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00003).

Список литературы

- [1] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 12. С. 11–18.
- [2] Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 7. С. 15–23.
- [3] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 597–604.
- [4] Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 12. С. 33–37.
- [5] Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Int. J. Heat and Mass Trans. 2014. Vol. 79. P. 838–845.
- [6] Тулебаев В.Б., Дьяченко И.Ю. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2008. Т. 16. № 1. С. 40–45.
- [7] Никитин М.Н. // Пром. энергетика. 2010. № 6. С. 42–46.
- [8] Tang Z., Fang Z., Yuan J.P., Mercier B. // Fire Safety J. 2013. Vol. 55. P. 35–49.
- [9] Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2013. Т. 51. С. 421.
- [10] El-Sayed R., Negeed, Albeirutty M., Takata Y. // Int. J. Therm. Sci. 2014. Vol. 79. P. 1–17.
- [11] Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. // ТИА. 1999. Т. 6. № 3. С. 331–341.
- [12] Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Невмержицкий Н.Н. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 3. С. 9–14.
- [13] Алеханов Ю.В., Близнецов М.В., Власов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 6. С. 1–6.
- [14] Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 2. С. 30–35.

- [15] *Абросимов П.Б., Заплатин П.В., Нагорный В.С.* и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 11. С. 39–43.
- [16] *Анохина Е.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 8. С. 32–37.
- [17] *Демьянов А.Ю., Динариев О.Ю., Иванов Е.Н.* // Инженерно-физический журн. 2012. Т. 85. № 6. С. 1145–1154.
- [18] *Домрачев Р.А., Фирсова Л.П., Шишкина С.В.* // Гальванотехника и обработка поверхности. 2006. Т. 14. № 4. С. 23–26.
- [19] *Кофман Д.И., Востриков М.М., Антоненко А.В.* // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 9. С. 41–43.
- [20] *Westerweel J.* // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
- [21] *Foucaut J.M., Stanislas M.* // Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. P. 1058–1071.
- [22] *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* // Exp. in Fluids. 2002. Vol. 32. N 2. P. 143–152.
- [23] *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 3. С. 109–131.
- [24] *Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М.* // ТиА. 2011. Т. 18. № 1. С. 1–13.
- [25] *Ysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Fire Safety J. 2014. Vol. 70. P. 61–70.
- [26] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Тепло-массоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
- [27] *Муратова Т.М., Лабунцов Д.А.* // ТВТ. 1969. Т. 7. № 5. С. 959–967.
- [28] *Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б.* Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 391 с.
- [29] *Авдеев А.А., Зудин Ю.Б.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 4. С. 565–574.
- [30] *Ysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. Vol. 86. N 1. P. 62–68.
- [31] *Strizhak P.A.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2013. Vol. 86. N 4. P. 895–904.
- [32] *Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Vol. 87. N 1. P. 103–111.