

03

## **Статистический анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении в высокотемпературном газовом потоке**

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

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

Поступило в Редакцию 12 февраля 2015 г.

Проведен статистический анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении в высокотемпературных (около 1100 К) газах. Начальные радиусы и скорости движения капель изменялись в диапазонах 0.1–0.25 мм и 0.5–5 м/с. Скорость встречного потока газа составляла 1.5 м/с. С использованием панорамных методов, средств высокоскоростной и кросскорреляционной видеорегистрации определены условия, соответствующие разным последствиям (коагуляция, распад или дробление) столкновений капель.

Процессы коагуляции, дробления и деформации капель жидкостей играют важную роль [1–3] в широком спектре газопарокапельных приложений [5–8]. Однако практически все заключения о закономерностях таких процессов сделаны на основе результатов исследований движения малых групп (две, три, пять) капель. При реализации технологий [5–8] капли перемещаются в турбулентном режиме и их концентрация в потоке может достигать нескольких тысяч единиц на  $1 \text{ м}^3$ , а размеры могут изменяться от десятков микрометров до нескольких миллиметров [5–8]. Интерес представляет анализ закономерностей столкновений капель с существенно отличающимися размерами и скоростями движения.

Наименее изучены процессы движения капель жидкостей через высокотемпературные газы [9–12]. Анализ результатов [9–12] (исследованы деформация капель воды при их движении через газы, испарение в высокотемпературных газах, влияние на характеристики этих процессов скоростей движения и размеров капель) показывает, что процессы перемещения капель воды через высокотемпературную газовую среду

характеризуются интенсивным и непрерывным изменением траекторий их движения и столкновениями. Результаты исследований непосредственно столкновений капель и их последствий в высокотемпературных газах не опубликовано. Видеограммы [10,11] показывают, что изучение последствий столкновения капель целесообразно проводить с использованием статистического подхода. Разные последствия столкновений в условиях совместного воздействия группы факторов возможны с определенной вероятностью результата.

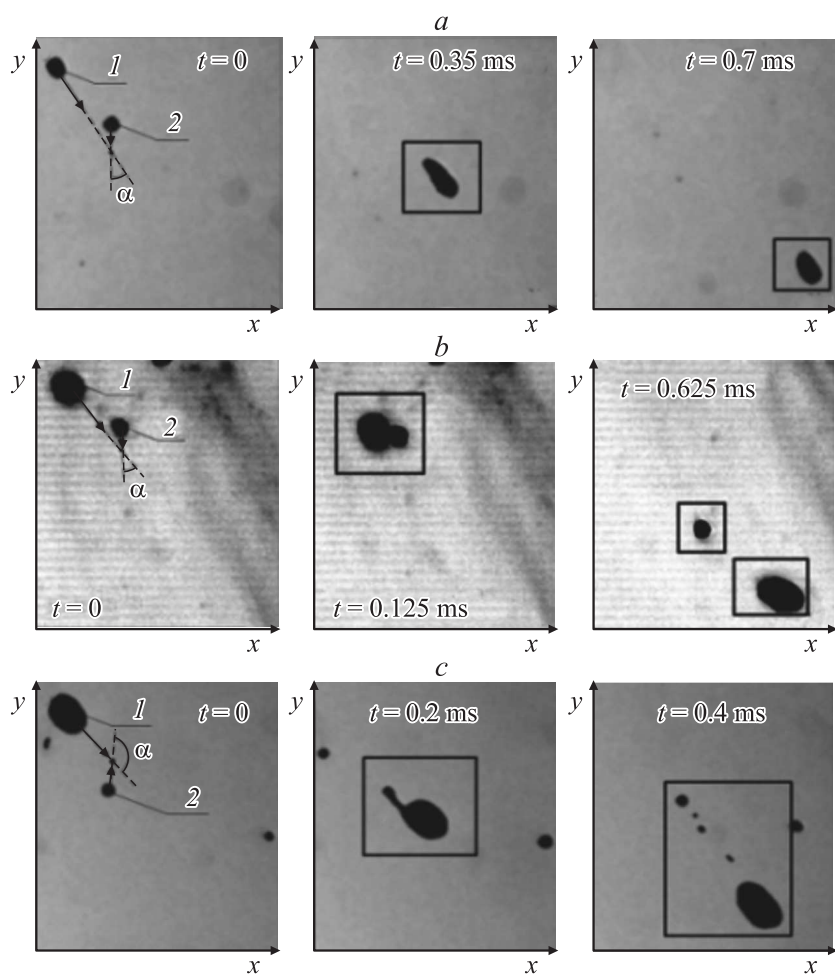
Цель данной работы — выделение по результатам экспериментальных исследований последствий столкновений двух капель воды в потоке высокотемпературных газов.

При проведении экспериментов использовался стенд [10,11] с комплексом регистрационной аппаратуры: видеокамера с форматом изображения  $1024 \times 1024$  пикселей, частотой до  $10^5$  fps; кросскорреляционная камера с форматом изображения  $2048 \times 2048$  пикселей, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами не более  $5 \mu\text{s}$ ; двойной импульсный твердотельный лазер, имеющий длину волны  $532 \cdot 10^{-9}$  м, энергию в импульсе не менее  $70 \text{ mJ}$ , длительность импульса до  $12 \text{ ns}$ , частоту повторений не более  $15 \text{ Hz}$ ; синхронизирующий процессор с дискретизацией сигналов менее  $10 \text{ ns}$ .

Аналогично экспериментам [10,11] регистрировались изображения капель воды в процессе их движения через высокотемпературные продукты сгорания керосина в полном цилиндре (высота  $1 \text{ m}$ , внутренний и внешний диаметры —  $0.2$  и  $0.206 \text{ m}$ ), выполненном из жаростойкого светопрозрачного стекла. Размеры каждого видеокadra в области высокотемпературных газов выбирались в соответствии с характерной длиной участков траектории движения, сталкивающихся в экспериментах двух капель.

Температура продуктов сгорания в экспериментах составляла  $1070 \pm 30 \text{ K}$ . Измерения проводились тремя хромель-алюмелевыми (диапазон измеряемых температур —  $273\text{--}1373 \text{ K}$ , погрешность  $\pm 3.3 \text{ K}$ ) термопарами. Начальная температура вводимых в газовую среду капель воды поддерживалась около  $300 \text{ K}$  с использованием нагревательных камер [13].

Для измерения скорости движения газов  $u_g$  по рассматриваемому цилиндрическому каналу использовался метод Particle Image Velocimetry (PIV) [14]. Аналогично [9–12] перед проведением опытов с



**Рис. 1.** Видеogramмы экспериментов с реализацией трех последствий столкновений капель: *a* — коагуляция и движение объединенной капли, *b* — слияние и распад на близкие (по начальным размерам) капли, *c* — дробление на более мелкие капли.

каплями в газовую среду вводили „трассеры“ (частицы  $\text{TiO}_2$ ). Скорости их движения и соответственно газа поддерживались около 1.5 м/с.

Аналогично экспериментам [9–12] исследования проводились для капель полидисперсного водяного потока. Их начальные размеры (радиусы) варьировались в диапазоне  $0.1 \leq r_m \leq 0.25$  мм. Относительная объемная концентрация поддерживалась 0.001–0.0012 м<sup>3</sup> капель жидкости на 1 м<sup>3</sup> газа. Размеры  $r_m$  и скорости перемещения  $u_m$  капель измерялись с использованием методов Interferometric Particle Imaging (IPI) [15] и PIV [14]. Систематические погрешности определения  $r_m$ ,  $u_g$  и  $u_m$  с применением методов PIV и IPI, а также соответствующего видеорегистрирующего стенда [11, 12] не превышали 1.6 и 2.1%. Максимальные случайные погрешности составили:  $r_m$  — 2.1%,  $u_g$  и  $u_m$  — 3.4%. Также при обработке видеogramм экспериментов определялись углы пересечения траекторий движения капель в момент их столкновения  $\alpha$  с использованием специализированного программного обеспечения и параметрической сетки на видеogramмах.

В результате статистического анализа полученных экспериментальных данных установлено, что после столкновения возможны три варианта дальнейшего развития процесса: коагуляция и движение объединенной капли (рис. 1, *a*); капли сливаются, но затем конгломерат (за очень малый период времени — менее 0.1  $\mu\text{s}$ ) распадается на две капли с близкими начальными размерами (рис. 1, *b*); дробление на несколько (от 3 до 10) мелких капель (рис. 1, *c*). Выделенные последствия столкновения двух капель развивают заключения, сделанные по результатам экспериментов [9–12] о коагуляции капель в высокотемпературных газах. В частности, установлены [9–12] три режима коагуляции: движущиеся в следе капли догоняют идущие впереди; капли изменяют направление своего движения на противоположное и коагулируют с идущими в следе за ними; капли вследствие реализации фазовых превращений коагулируют с движущимися параллельно на некотором расстоянии от них (вследствие уменьшения статического давления между параллельно движущимися каплями при их испарении последние сближаются).

Также по результатам анализа видеogramм проведенных экспериментов можно объяснить реализацию одного из двух известных [12] режимов деформации капель при движении в потоке газов. Установлено [12], что капли могут либо последовательно деформироваться, принимая формы „эллипсоид–сфера“ (с характерными вытягиванием

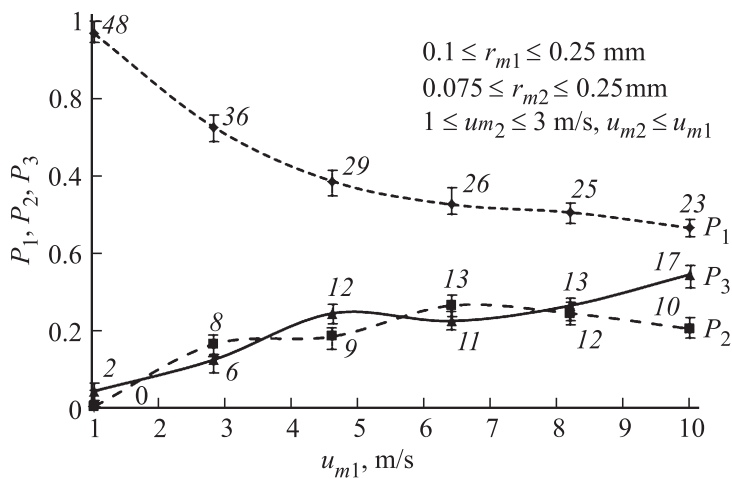


Рис. 2. Характерные значения критериев  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ .

и сжиманием их относительно направления перемещения), либо вращаться относительно своего центра масс (но с изменением размеров), сохраняя форму эллипсоида. В полидисперсных потоках зарегистрирован [12] второй режим деформации, и он обусловлен вращением капель вследствие столкновений и нестационарным смещением центра масс.

Исследования в широком диапазоне изменения размеров капель и скоростей их движения показали статистику последствий столкновений двух капель в рассматриваемых условиях. При любых значениях  $r_m$  и  $u_g$  происходили коагуляция, дробление или распад капель. Но частоты появления каждого из этих событий существенно отличались.

На рис. 2 представлены значения критериев  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$ , характеризующих частоту проявления одного из трех вариантов последствий столкновений двух капель при различных размерах ( $0.1 \leq r_m \leq 0.25$  mm) и скоростях ( $1 \leq u_m \leq 10$  m/s). Значения  $P_1$  (коагуляция),  $P_2$  (разлет) и  $P_3$  (дробление) вычислены после обработки 300 столкновений (для каждого значения скорости первой капли  $u_{m1}$  рассматривалось 50 столкновений, значения числа последствий с соответствующим вариантом исхода приведены у каждой „характерной точки“ зависимостей).

Значения  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  вычислялись по формулам

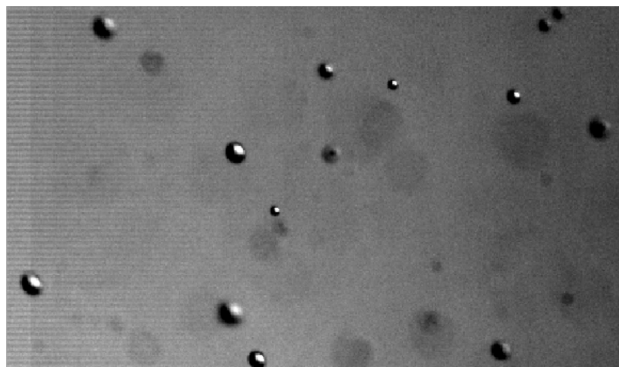
$$P_1 = N_1/(N_1 + N_2 + N_3), \quad P_2 = N_2/(N_1 + N_2 + N_3),$$

$$P_3 = N_3/(N_1 + N_2 + N_3),$$

где  $N_1, N_2, N_3$  — число столкновений, в результате которых реализуются соответственно первый, второй и третий варианты последствий (для каждого значения  $u_{m1}$  рассматривалось 50 столкновений, числа на рис. 2 соответствуют числу столкновений, в результате которых реализуется один из трех соответствующих вариантов).

Зависимости на рис. 2 иллюстрируют влияние разности скоростей сталкивающихся капель в потоке газов на последствия столкновений. Скорости перемещения первых (из числа наблюдаемых пар) капель до столкновения составляли  $1 \leq u_{m1} \leq 10$  м/с. Скорости движения вторых изменялись в диапазоне  $1 \leq u_{m2} \leq 3$  м/с. При этом в анализируемых столкновениях скорость движения второй капли не превышала скорости перемещения первой (во всех точках на рис. 2 выполнялось условие  $u_{m2} \leq u_{m1}$ ). Можно отметить, что при малых ( $u_m < 3$  м/с) и сопоставимых скоростях перемещения капель наибольшая частота последствий столкновений соответствует коагуляции. Выделенную закономерность можно отметить для широкого диапазона изменения размеров капель —  $0.1 \leq r_m \leq 0.25$  мм. С ростом разности скоростей движения сталкивающихся капель существенно возрастают  $P_2$  и  $P_3$  (рис. 2). При этом можно отметить в целом сопоставимые значения этих критериев. Выделенный эффект иллюстрирует, что при росте разности скоростей капель частота столкновений с дроблением или разлетом последних существенно увеличивается. Это, скорее всего, обусловлено тем, что при росте скоростей движения капель увеличивается влияние сил инерции по сравнению с силами вязкости и поверхностного натяжения. Как следствие, при наличии „препятствия“ на пути движения капель последние или разлетаются, или дробятся на более мелкие. С ростом скорости движения одной капли по отношению к другой частота последствий столкновений с дроблением превышает аналогичный параметр для разлета.

Можно предположить, что результат столкновения двух капель должен определяться не только их размерами и скоростями перемещения, но и углом пересечения траекторий их движения  $\alpha$ . На



**Рис. 3.** Видеограмма с совокупностью капель в потоке высокотемпературных газов при 3D-регистрации.

рис. 2 представлены статистические данные по столкновениям капель при изменении угла  $\alpha$  в широком диапазоне ( $20-150^\circ$ ). Вследствие практически монотонных зависимостей частот  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  можно сделать вывод о довольно умеренной роли угла  $\alpha$  в определении варианта последствий столкновений. В то же время можно отметить, что для полного исследования влияния угла  $\alpha$  на характеристики столкновения капель целесообразно использование 3D-изображений, так как капли могут выходить из сечения, регистрируемого высокоскоростной камерой. В этом случае капли из других сечений потока могут закрывать регистрируемую область (рис. 3). В проведенных экспериментах регистрировался малый участок перед столкновением капель для исключения влияния этого фактора.

Полученные значения критериев  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  могут быть использованы в качестве оценочных при выборе параметров работы оборудования для реализации большой группы технологий с газопарокапельными высокотемпературными потоками (термическая очистка жидкостей, газопарокапельные теплоносители, полидисперсное пожаротушение).

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

**Список литературы**

- [1] Гонор А.Л., Ривкинд В.Я. // Итоги науки и техники. МЖГ. 1982. Т. 17. С. 86–159.
- [2] Eggers J., Villermaux E. // Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. P. 036601. 79 p.
- [3] Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплообмен и гидродинамика в газопельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
- [4] Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Невмержицкий Н.Н. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 3. С. 9–14.
- [5] Алеханов Ю.В., Близначев М.В., Власов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 1–6.
- [6] Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2013. Т. 51. С. 421.
- [7] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 11–18.
- [8] *Ysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Fire Saf. J. 2014. V. 70. P. 61–70.
- [9] Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 3. С. 50–58.
- [10] Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 7. С. 15–23.
- [11] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Int. J. Heat Mass Transfen. 2014. V. 79. P. 838–845.
- [12] Волков Р.С., Жданова А.О., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Инж.-физ. журн. 2014. Т. 87. № 6. С. 1297–1307.
- [13] Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание конденсированных веществ при локальном нагреве. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 269 с.
- [14] *Foucaut J.M., Stanislas M.* // Meas. Sci. Technol. 2002. V. 13. P. 1058–1071.
- [15] *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* // Exp. Fluids. 2002. V. 32. N 2. P. 143–152.