

03

## Характеристики „отскока“ взаимодействующих капель воды

© Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

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

Поступило в Редакцию 28 сентября 2018 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2018 г.

Принято к публикации 23 октября 2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований условий и характеристик „отскока“ (сближения и взаимодействия через газовую буферную оболочку) капель воды при движении в газовых средах с разными параметрами: скоростью и направлением движения, температурой и компонентным составом. Опыты проводились в потоке воздуха, водяного пара, продуктов сгорания. Рассмотрены особенности „отскока“ капель с разной начальной температурой, проведено сравнение при 18–20 и 60–80°С. С использованием высокоскоростной съемки зарегистрированы более 1000 столкновений капель, которые разделены на группы: „отскок“, коагуляция, разлет, дробление. Получены результаты критериальной обработки с применением чисел Вебера.

DOI: 10.21883/JTF.2019.06.47630.348-18

### Введение

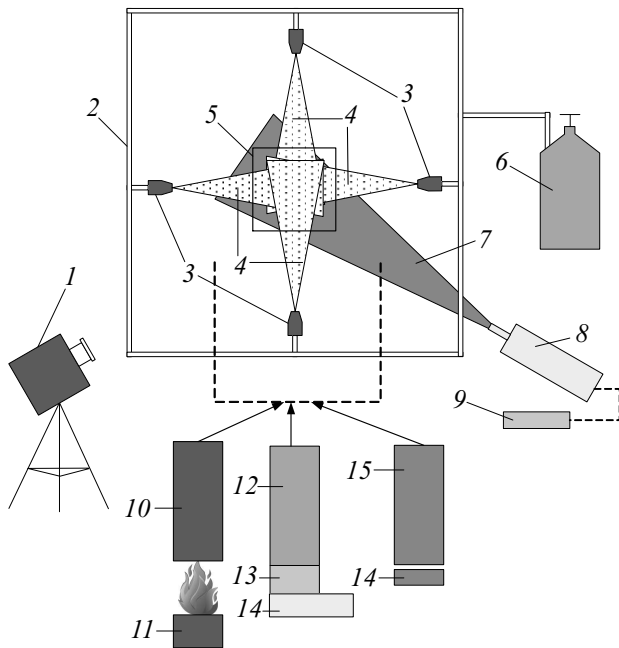
Из обзорных статей и монографий, посвященных изучению процессов движения капель жидкостей в газовых средах (в частности, [1–5]), известны разные условия их взаимодействия: „отскок“ (сближение, торможение, соударение через газовую прослойку), коагуляция (слияние и последующее движение единой капли), разлет (столкновение с образованием фрагментов жидкости, имеющих количество и размеры, соответствующие начальному), дробление (образование большого числа мелких фрагментов, т.е. полидисперсного аэрозоля). Многочисленные исследователи по всему миру используют несколько отличающуюся терминологию для описания и разделения соответствующих вариантов последствий столкновений, но количество основных вариантов („отскок“, коагуляция, разлет, дробление) остается одинаковым уже на протяжении более чем 50 лет. Это стало причиной концентрации внимания исследователей на детальном изучении механизмов, условий и характеристик четырех вариантов последствий взаимодействия сталкивающихся капель. Наиболее изученными принято считать два варианта взаимодействия — коагуляцию (слияние) и дробление (измельчение) [1–5]. Близкие критические условия для каждого из этих вариантов установлены при использовании экспериментальных подходов, основанных на результатах проведения опытов с двумя каплями, движущимися по заданным траекториям [6–8], а также с большим аэрозольным облаком [9,10]. Разлет капель реализуется при средних (относительно условий дробления и коагуляции) скоростях их движения и характеризуется, по сути, сохранением структуры аэрозоля, так как капли после столкновения образуют практически идентичное количество новых фрагментов жидкости с близкими начальным размерами [6–10]. Скорее всего, по этой причине разлету уделяется мало

внимания. Еще меньше изучены процессы „отскока“ сталкивающихся капель жидкостей, так как они, как правило, реализуются при малых скоростях взаимодействия (соответственно минимальных числах Вебера — до 1.5), и их детальное изучение затруднено, поскольку требует применения высокоточных видеорегирующих и следящих комплексов [1–5]. Такое состояние проблемы можно объяснить высокой сложностью регистрации соответствующих процессов сближения и „отскока“ как в опытах с двумя каплями [6–8], так и элементами (фрагментами жидкости) аэрозоля [9,10].

Современных представлений о причинах „отскока“ (например, в [6,7,11] сформулированы гипотезы о влиянии газовой прослойки между каплями) недостаточно как для объяснения причин изменения структуры газопарокапельных потоков, так и прогнозирования последней в перспективных приложениях (в частности, при генерации теплоносителей на основе капель воды, паров и дымовых газов; для термической очистки воды при выпаривании примесей; при пожаротушении) [12,13]. При этом следует отметить, что „отскок“ является наиболее значимым эффектом при движении газопарокапельных потоков в реальных практических приложениях, которым, как правило, соответствуют малые скорости движения небольших по размерам фрагментов жидкости, например, вследствие турбулентных пульсаций. В настоящей работе предпринята попытка экспериментальной оценки условий и характеристик „отскока“ капель воды в газовых средах при варьировании основных параметров.

### Экспериментальный стенд и методы исследования

Опыты проводились с применением стенда, схема которого приведена на рис. 1. Использовались два генератора аэрозоля компрессорного типа с распылителями,



**Рис. 1.** Схемы проведения эксперимента по регистрации столкновений капель в аэрозольном облаке, образующемся при смешении капельных и газовых потоков: 1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — канал подачи воды, 3 — форсуночные устройства, 4 — зоны распыления, 5 — область регистрации, 6 — емкость с водой, 7 — лазерный световой нож, 8 — генератор лазерного излучения, 9 — синхронизатор, 10 — цилиндр из жаростойкого материала, 11 — полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горячая жидкость, 12 — тракт потока разогретого воздуха, 13 — нагреватель, 14 — нагнетатель, 15 — тракт подачи паровоздушного потока.

схема расположения которых изменялась (встречно, сонаправленно, под углом  $\pi/2$ ) для обеспечения разных условий столкновений. Скорости, размеры (радиусы) и углы атаки капель изменялись в диапазонах 0.1–1 mm, 0.1–10 m/s, 0– $\pi/2$ .

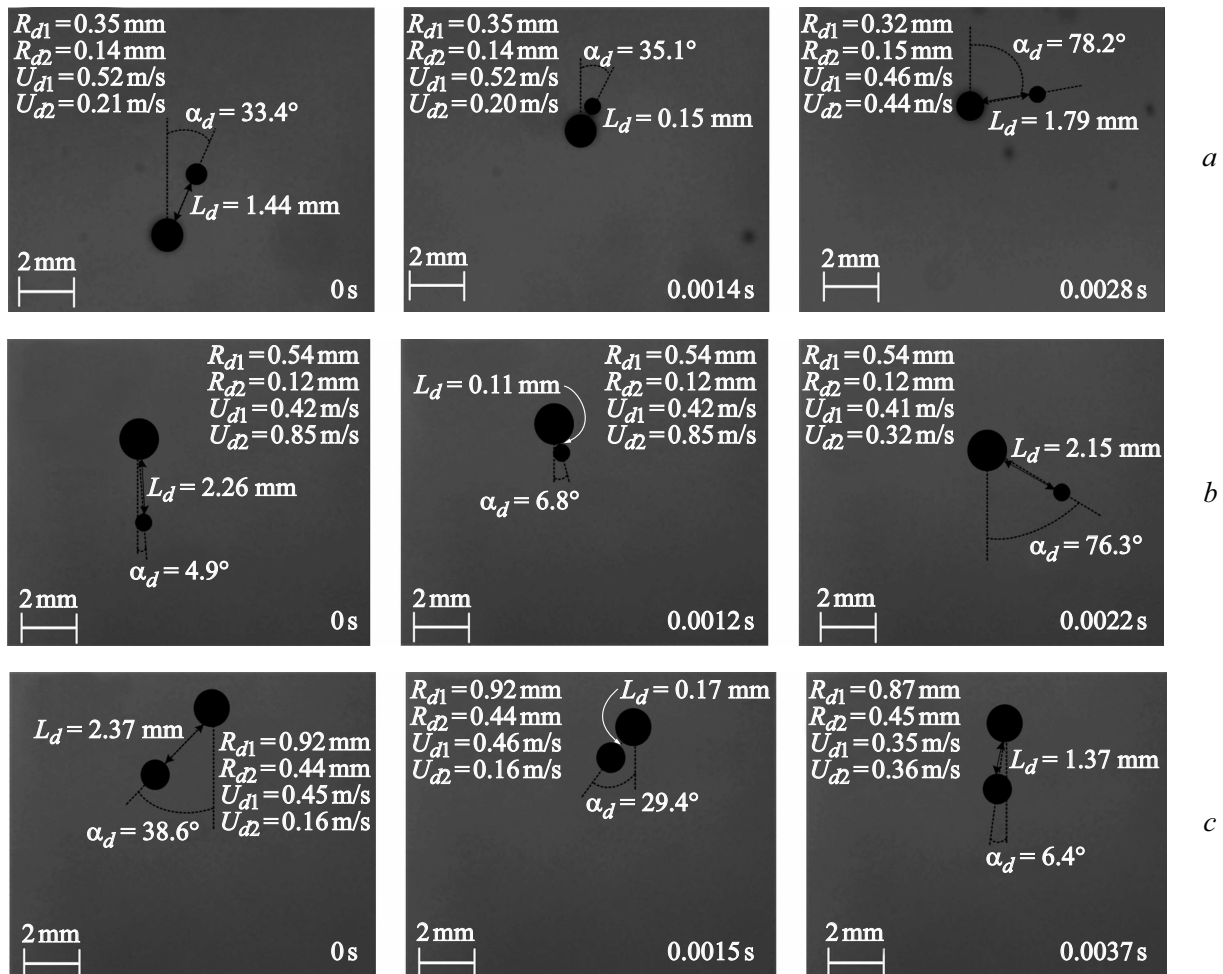
Для варьирования параметров газовой среды в области регистрации использовались три блока. Первый генерировал поток разогретого воздуха на основе нагревателя и нагнетателя с варьируемой температурой от 20 до 500°C и скоростью движения 0–10 m/s. Второй формировал поток водяного пара на основе нагнетателя и увлажнителя с постоянной температурой 100°C, концентрацией пара 90–100% и скоростью движения 0–5 m/s. Третий, на основе горелочного устройства и системы нагнетания дымовых газов, аналогичен использованному в опытах [9,10], и генерировал поток продуктов сгорания керосина с температурой 850–1000°C и скоростью 0–5 m/s. Контроль температуры в зоне регистрации столкновений выполнялся в предварительных тестовых экспериментах за счет использования двух малоинерционных термопар (хромель–алюмель, диапазон (–50)–1200°C, погрешность  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ , диаметр спая 0.3 mm) и платы ввода–вывода National Instruments 9213.

Поддержание заданной начальной температуры капель воды осуществлялось с использованием системы, включающей блоки разогрева жидкости до 80°C. Использовались две платиновые–платиновые термопары с погрешностью  $\pm 2^\circ\text{C}$ , инерционностью 1 s, диаметром спая 0.3 mm, плата National Instruments 9213, трубчатый электронагреватель с максимальной температурой нагрева жидкости, соответствующей ее кипению. Варьирование температуры воды относительно комнатной (18–20°C) необходимо для проверки базовой гипотезы об интенсификации процессов „отскока“ испаряющихся капель.

Регистрация процессов взаимодействия капель воды выполнялась с применением высокоскоростной видеокамеры (разрешение 1152 × 864, частота 10000 кадров в секунду) и программного обеспечения для слежения за перемещающимися объектами Tema Automotive (методика аналогична [9,10]). В каждом опыте определялись значения размеров  $R_d$ , скоростей движения  $U_d$  и углов столкновений  $\alpha_d$  капель. Для контроля скоростей движения потока газов ( $U_g$ ) использовался метод Particle Image Velocimetry, капель жидкостей ( $U_d$ ) — метод Particle Tracking Velocimetry. Размеры  $R_d$  измерялись с использованием метода Interferometric Particle Imaging. Погрешности определения значений  $U_g$  и  $U_d$  не превысили 3.4%, а значений  $R_d$  — 2.1%. Все методы интегрированы на базе программного обеспечения Actual Flow [9,10]. Угол  $\alpha_d$  вычислялся с учетом масштабного коэффициента по видеogramме с погрешностью 2.5%.

Аналогично опытам [9,10] выполнялась выборка кадров, на которых регистрировались процессы сближения капель в газовой среде, их столкновения и разные последствия. С учетом последних все столкновения разделялись на четыре группы: „отскок“, коагуляция, разлет, дробление. Для каждой из этих групп рассчитывались вероятности  $P_0, P_1, P_2, P_3$  — отношение числа соударений с определенным результатом при идентичных параметрах к общему числу столкновений. Эти вероятности характеризовали частоту реализации одного из четырех режимов взаимодействия. В отличие от опытов [9,10] основное внимание уделено ранее слабо изученным процессам „отскока“ капель. На рис. 2 приведены зарегистрированные видеogramмы с иллюстрацией процессов сближения, взаимодействия через тонкую газовую прослойку, „отскока“ и отдаления капель. В отличие от известных представлений [6–10] проведенные эксперименты показали, что такие случаи могут реализовываться не только при малых размерах и скоростях движения капель — „снарядов“ и „мишеней“ (по терминологии [6,7]).

По результатам проведенных опытов аналогично [9,10] получены зависимости значений  $P_0, P_1, P_2, P_3$  от размеров  $R_d$ , скоростей движения  $U_d$  и углов столкновений  $\alpha_d$ . На основе этих зависимостей рассчитаны числа Вебера сближающихся капель перед столкновением. Вычислялась относительная скорость движения капель учетом относительной скорости движения



**Рис. 2.** Типичные видеок cadры экспериментов с „отскоком“ каплей при их столкновении в газовой среде (*a–c* — при разных углах взаимодействия „мишени“ и „снарядов“).

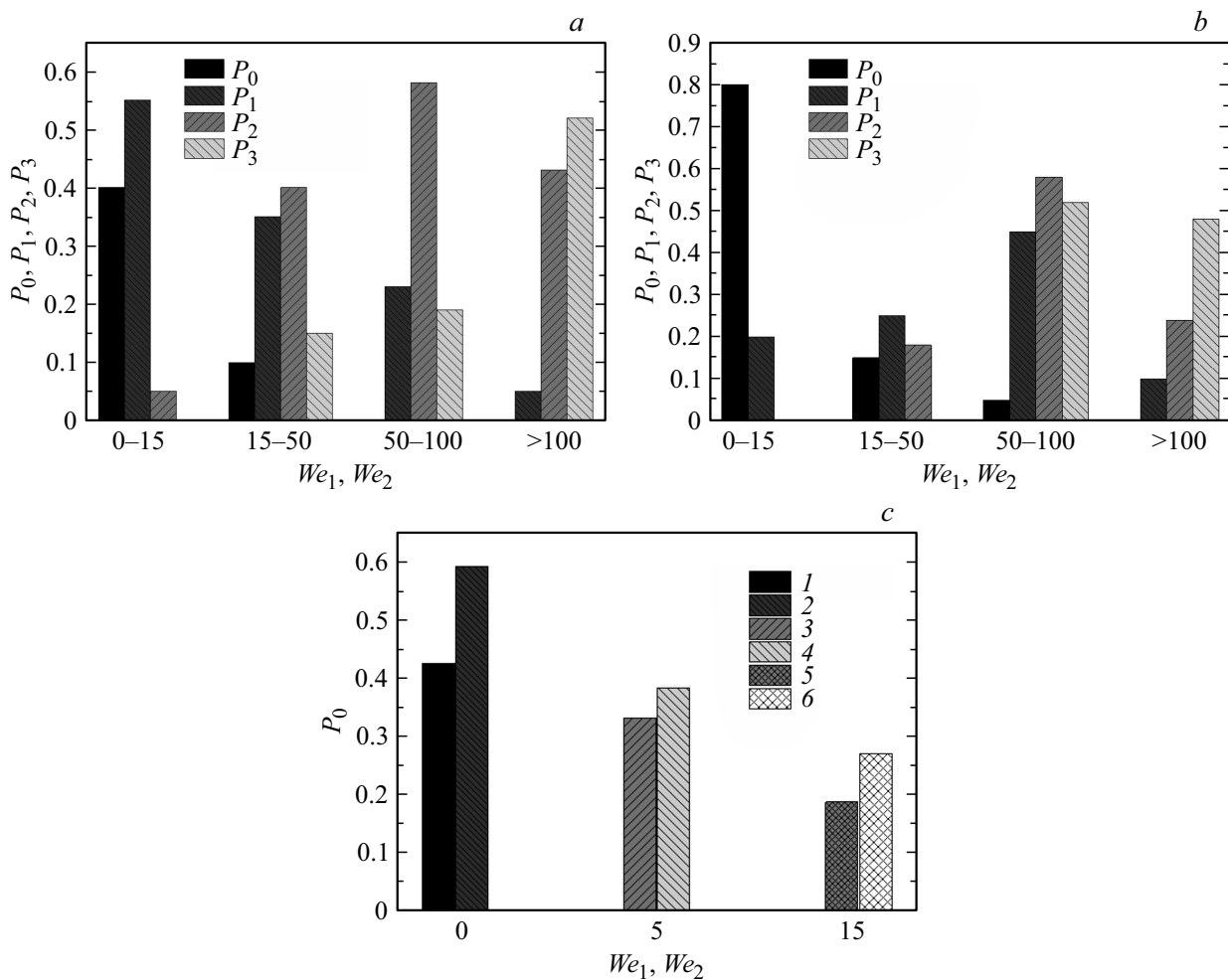
$U_d = (|U_{d1}|^2 + |U_{d2}|^2 - 2|U_{d1}| \cdot |U_{d2}| \cos(\alpha))^{0.5}$ . Числа Вебера для капли-снаряда и капли-мишени определялись по формулам:  $We_1 = 2\rho R_{d1} U_d^2 / \sigma$ ,  $We_2 = 2\rho R_{d2} U_d^2 / \sigma$ . Свойства воды (плотность, поверхностное натяжение) задавались с учетом известных справочных зависимостей от температуры.

## Результаты и обсуждение

В соответствии с представлениями [6,7] для „отскока“ каплей в газовой среде характерны числа Вебера не более 1.5. Но на основе экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что диапазон изменения чисел Вебера может быть значительно шире в зависимости от состояния среды, в которой сталкиваются капли. Это обусловлено тем, что параметр  $We$  не описывает особенности всех возможных последствий взаимодействия фрагментов жидкости при варьировании параметров несущей (газовой) среды (воздух, водяной пар, продукты сгорания). Основного внимания при анализе заслуживают интенсивность течения и температура

газов. К тому же, часто используют разные подходы к расчету чисел Вебера [6–10] — по характеристикам „мишени“ или „снаряда“. Поэтому диапазоны  $We$ , соответствующие коагуляции, разлету и дроблению, у коллективов исследователей нередко отличаются на 15–40%. Результаты проведенных экспериментов по переходным числам Вебера для „отскоков“, коагуляции, разлетов и дробления значительно отличаются от приведенных в [6–10] (рис. 3). Это свидетельствует о высокой роли фазовых превращений, протекающих на свободной поверхности сталкивающихся капель воды.

Проведенные эксперименты показали, что значения  $P_0, P_1, P_2, P_3$  как функции от  $We_1$  и  $We_2$  (рис. 3, *a*) в случае впрыска капельного аэрозоля с комнатной температурой довольно хорошо коррелируют по результатам опытов с воздухом при разных температурах, потоком водяного пара и продуктами сгорания в диапазоне значений чисел Вебера больше 50. При  $We = 15–50$  процессы разлета и дробления капель чаще регистрировались в условиях комнатных температур газов и капель. При нагреве газового потока и повышении концентрации водяного пара частота реализации режима дробления



**Рис. 3.** Значения рассчитанных частот реализации „отскока“ ( $P_0$ ), коагуляции ( $P_1$ ), разлета ( $P_2$ ) и дробления ( $P_3$ ) сталкивающихся капель. При расчете этих значений последствий учтены все зарегистрированные столкновения при разных исследованных начальных параметрах капель и газовой среды (а), отдельно рассмотрены условия максимальной интенсификации фазовых превращений при впрыске капель разогретой воды в поток продуктов сгорания (б). Выделены предельные (переходные, т.е. при превышении которых частота реализации „отскока“ в несколько раз снижается) значения  $P_0$  (с) для условий движения в воздухе (1, 2), водяных парах (3, 4) и продуктах сгорания (5, 6) капель с начальной температурой 18–20°C (1–3) и 60–80°C (4–6).

в проведенных опытах существенно снижалась. При сравнении с продуктами сгорания даже в случае изменения  $We$  от 15 до 50 высокие значения имеют частоты реализации разлета и коагуляции (рис. 3). Это обусловлено тем, что в потоке продуктов сгорания происходит интенсивное торможение, последующее обратное движение или закручивание капель. Поэтому в экспериментах регистрировались частые случаи бокового взаимодействия капель с относительно невысокой скоростью (аналогично опытам [6,7]). Частота реализации „отскока“ капель также возрастала при впрыске капель в поток водяного пара или продуктов сгорания (рис. 3, б). Это обусловлено интенсификацией процессов конвекции и диффузии паров воды между каплями.

Особенно заметен вклад выделенных выше процессов при впрыске аэрозоля с каплями разогретой воды с начальной температурой 60–80°C в поток горячего воздуха или продуктов сгорания. Частота реализации „отско-

ков“ капель в таких условиях возрастает в несколько раз (рис. 3, б, с). Это обусловлено тем, что капли размерами от 0.1 до 1 мм при высоких температурах интенсивно испаряются. Вокруг них образуется паровой буферный слой, представляющий тепловую защиту [12]. В соответствии с данными экспериментов [14] при температуре газов от 500 до 1000°C температура поверхности капли достигает значений 80–90°C за несколько секунд (как правило, не более 4–5 с). Так как капли впрыскиваются с начальной температурой 60–80°C, очевидно, что температура их поверхности достигает 90°C практически мгновенно (в течение 1–2 с). В таких условиях массовые скорости парообразования  $We$  имеют максимальные значения. Экспериментальные оценки [14] показали, что значения  $We$  изменяются от 0.05 до 0.25 kg/(m<sup>2</sup>·s). При этом проведенные по методике [14] оптические измерения показали, что капли разогретой воды после впрыска остывают не более чем на 10–15% в течение

1–2 с. В опытах с разогретым воздухом они интенсивно прогревались до температур, близких к кипению воды, а в экспериментах с воздухом без его подогрев в области регистрации имели практически идентичную начальной температуру за счет непрерывной подачи новых эшелон распрыскиваемой горячей воды. При плотности водяных паров  $\rho_v = 0.8–1.9 \text{ kg/m}^3$  можно рассчитать линейные скорости их оттока с поверхности капель:  $V_e = W_e/\rho_v$ . Значения  $V_e$  составляют 0.02 до 0.3 м/с. В соответствии с теоретическими результатами исследований, рассмотренными в монографии [12], при таких скоростях оттока паров вокруг капель образуется устойчивая паровая оболочка толщиной 5–15% от размера капли. В результате фрагменты жидкости отталкиваются друг от друга. Если учесть высокую концентрацию капель в потоке, траектории их перемещения, интенсивное торможение за счет парообразования (детально эти особенности рассмотрены в монографиях [12,15]), то между ними образуется множество вихревых структур, соответствующих турбулентным режимам. Вдув водяных паров интенсифицировал проанализированные процессы, и значения параметра  $P_0$  нелинейно возрастали (рис. 3, *b, c*). Данный эффект становился особенно заметен при сравнении с экспериментами, в которых температуры капель и газов составляли около 20°C. В таких условиях скорости газов (и соответственно давление) в следе капель снижались [12]. Это способствовало ускорению всех движущихся в следе первой последующих капель. Поэтому при последовательном движении и столкновениях капель регистрировались максимальные значения вероятностей их коагуляции.

Для иллюстрации эффектов расхождения двух интенсивно испаряющихся капель (радиусы менялись в диапазоне 0.5–1 мм) друг от друга были проведены дополнительные эксперименты с двумя каплями, подвешенными параллельно (начальное расстояние между ними  $(1–5)R_d$ ) на тонких (диаметр 0.1 мм) капроновых нитях. Использование разных схем нагрева (разогретый до 300°C поток воздуха или пьезозажигательный элемент с температурой пламени 300–400°C) и высокоскоростной видеорегистрации позволило установить, что в процессе нагрева и парообразования капли могут отдалиться друг от друга на  $(0.5–1.5)R_d$ . Если учесть уменьшение размеров капель вследствие испарения, то расстояния между ними могут возрасти до трех и даже пяти начальных размеров  $R_d$ . Такие довольно простые оценки показывают, что вероятность коагуляции интенсивно испаряющихся капель крайне мала. Поэтому в проведенных экспериментах с аэрозолями регистрировались максимальные значения параметров  $P_0$  и  $P_2$ , соответствующих „отскокам“ и разлету капель при взаимодействии (рис. 3, *b, c*).

Помимо существенно отличающихся предельных (переходных) чисел Вебера для „отскока“ (рис. 3, *c*), установлены отличия значений аналогичных параметров для коагуляции, разлета и дробления. В частности, для условий максимальной в проведенных экспериментах

интенсивности фазовых превращений, при впрыске воды с температурой 60–80°C в поток продуктов сгорания с температурой около 1000°C переход от „отскока“ к коагуляции регистрировался при  $We = 7–9$ , от коагуляции к разлету  $We = 20–30$ , а единичные (редкие) столкновения с дроблением зарегистрированы при максимальных значениях  $We$  (более 120). В случае температур воды и газов, соответствующих комнатной, переходные значения чисел Вебера хорошо соответствовали [6–10]:  $0 < We < 0.5$  — слияние под действием поверхностного натяжения;  $0.5 < We < 1.5$  — „отскок“ капль за счет газовой прослойки;  $1.5 < We < 15$  — коагуляция;  $15 < We < 50$  — разлет;  $50 < We < 100$  — разлет и дробление в зависимости от расположения центров масс;  $We > 100$  — дробление.

В отличие от опытов [6–8] в настоящей работе аналогично экспериментам [9,10] указанные границы переходов по диапазонам варьирования  $We$  считались достаточно условными. Это обусловлено тем, что, помимо размеров и скоростей движения капель, входящих в выражения для  $We_1$  и  $We_2$ , значительную роль, как показали проведенные эксперименты, играли углы столкновений и формы последних. Эти факторы не выделялись в настоящей работе, так как представляют самостоятельный интерес. Но предварительные оценки на основе данных опытов [9,10] показывают, что отличия переходных (между явным доминированием процессов „отскока“, коагуляции, разлета и дробления) значений  $We_1$  и  $We_2$  с учетом углов атаки и форм капель могут достигать 15–35% в зависимости от условий нагрева, вдува жидкости, паров и газов в область регистрации. Фильтрация (выборка) последствий столкновений капель с учетом значений угла атаки  $\alpha_d$  показала, что рассчитанные вероятности „отскока“ максимальны (рис. 3, *b, c*) в диапазоне  $\pi/4 < \alpha_d < 3\pi/4$ . При лобовом столкновении (соответствует нулевому углу атаки) „отскоки“ регистрировались лишь при малых скоростях движения (до 2 м/с) и радиусах менее 0.25 мм. Аналогичные закономерности регистрировались при  $\alpha_d \rightarrow \pi/2$ . Но вероятность столкновений с углами атаки 0 или  $\pi/2$  в реальных высокотемпературных газопарокапельных потоках крайне мала (не более 5–7%) вследствие интенсивной турбулентности и фазовых превращений. Поэтому для реальных приложений (теплоносители, термическая очистка жидкостей, теплообменники, пожаротушение) с целью прогнозирования структуры и состава газопарокапельных потоков можно рекомендовать использовать результаты выполненных экспериментов (рис. 3), которые показывают насколько интенсивно взаимодействуют капли в разных условиях нагрева.

## Заключение

С использованием высокоскоростной видеорегистрации и программных алгоритмов слежения за каплями — „мишенями“ или „снарядами“, установлены принципиальные отличия условий „отскоков“ капль при разных

параметрах их взаимодействия в газовой среде. Наиболее ценным результатом проведенных экспериментов следует считать установленные отличия характеристик „отскока“ капель воды при движении в воздухе с варьируемой температурой, потоке водяных паров и продуктов сгорания.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (18-71-10002).

## Список литературы

- [1] Пажу Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
- [2] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 464 с.
- [3] Wierzbka A. // Exp. Fluids. 1990. Vol. 9. N 1. P. 59–64. DOI: 10.1007/BF00575336
- [4] Eggers J., Villermaux E. // Rep. Progr. Phys. 2008. Vol. 71. Article ID 036601. DOI: 10.1088/0034-4885/71/3/036601
- [5] Pawar S.K., Henrikson F., Finotello G., Padding J.T., Deen N.G., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M.H. // Powd. Techn. 2016. Vol. 300. P. 157–163. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.06.005
- [6] Архипов В.А., Ратанов Г.С., Трофимов В.Ф. // ПМТФ. 1978. № 2. С. 73–77.
- [7] Архипов В.А., Васенин И.М., Трофимов В.Ф. // ПМТФ. 1983. № 3. С. 95–98.
- [8] Shreiber A.A., Podvisotski A.M., Dubrovski V.V. // Atom. Spr. 1996. Vol. 6. N 6. P. 667–692.
- [9] Кузнецов Г.В., Волков Р.С., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 17. С. 53–60.
- [10] Антонов Д.В., Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 1. С. 94–103.
- [11] Соловьев А.Д. // Труды ЦАО. 1969. № 89.
- [12] Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 302 с.
- [13] Varaksin A.Y. // High Temp. 2013. Vol. 51. P. 377–407. DOI: 10.1134/S0018151X15030207
- [14] Volkov R.S., Strizhak P.A. // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 127. P. 141–156. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.040
- [15] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.