

УДК 532.6

ВЛИЯНИЕ УГЛОВОГО И ЛИНЕЙНОГО ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Г. В. Кузнецов, А. К. Ребров*, П. А. Стрижак, Н. Е. Шлегель

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

* Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: kuznetsovgv@tpu.ru, rebrov@itp.nsc.ru, pavelspa@tpu.ru, nik.shlegel.ask@gmail.com

С использованием системы высокоскоростной видеорегистрации установлено влияние безразмерных углового и линейного параметров взаимодействия капель воды в форме сферы, эллипсоида и условно жидкого диска на виды (режимы) их столкновений в воздухе (отскок, коагуляция, разлет, дробление). Определены условия устойчивой реализации перечисленных взаимодействий. Построены карты соответствующих режимов и проведено их сравнение с известными данными. Вычислены характерные размеры, число образующихся вследствие соударений фрагментов жидкости и суммарные площади поверхности испарения. Показано, что в случае соударений условно жидких дисков можно в несколько раз по сравнению со сферами увеличить площади поверхности жидкости.

Ключевые слова: капли воды, форма, взаимодействие, столкновения, угловой и линейный параметры, отскок, коагуляция, разлет, дробление.

DOI: 10.15372/PMTF20190408

Введение. Современные модели движения капель, жидкостных цепочек и струй в аэрозольных облаках и газовых средах учитывают большую группу факторов. Например, в [1] приведены модели, в которых учитываются действующие силы тяжести и аэродинамического сопротивления, подъемная сила, силы притяжения, Магнуса, турбофореза, термофореза и такие факторы, как несферичность капли, турбулентность несущей среды, сжимаемость, концентрация дисперсной фазы, нестационарность движения, фазовые превращения и др. В процессе движения аэрозоля распределение капель по размерам в нем меняется за счет их столкновений в режиме коагуляции (слияния) и фрагментации (дробления) [2]. Установлены условия, при которых наблюдается устойчивый отскок (взаимодействие капель в отсутствие прямого контакта, если недостаточно кинетической энергии на преодоление отталкивающих сил) и разлет (прохождение одной капли через другую с сохранением начальных размеров) капель [2]. Однако отскок не приводит к существенному изменению распределения капель по размерам в потоке и как следствие не представляет большого интереса для исследователей. Кроме того, такой режим взаимодействия реализуется лишь при небольших значениях числа Вебера ($We < 1,5$) [3, 4], что соответствует малым скоростям относительного движения капель (как правило, до

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 18-71-10002).

© Кузнецов Г. В., Ребров А. К., Стрижак П. А., Шлегель Н. Е., 2019

0,5 ÷ 1,0 м/с). В реальных тепломассообменных технологиях такие условия реализуются редко [5]. Разлет происходит достаточно часто в средних диапазонах изменения чисел Вебера ($10 \leq We \leq 50$) [2]. Структура аэрозоля, как и в случае отскока, меняется незначительно (в отличие от случаев коагуляции и дробления).

Адекватно описать условия и характеристики отскока, разлета, коагуляции и дробления капель воды при моделировании движения фрагментов аэрозоля в газовой среде сложно. Недостаточно экспериментальной информации об условиях и характеристиках столкновений в каждом режиме. Наиболее типичными и широко используемыми экспериментальными методами можно считать использованные в [3, 4]. Представляет интерес проведение статистического анализа взаимодействия большого числа фрагментов жидкости в составе аэрозоля [2, 6]. Известны попытки получения карт режимов взаимодействия для обобщения экспериментальных данных о влиянии размеров, скорости движения и углов атаки капель на последствия их столкновений, а также обобщения экспериментальных данных с использованием числа Вебера для снарядов и мишеней, безразмерных линейного B и углового β параметров взаимодействия.

В работах [7–10] с использованием систем координат $\beta(We)$, $B(We)$ обобщены результаты исследований процессов взаимодействия сталкивающихся капель различных жидкостей в газовой среде, выполненных в течение последних 70–80 лет. Анализ результатов исследований соударения капель показывает, что недостаточно изучены не только сложные случаи, реализующиеся на практике (вторичное распыление капель топлива, тушение лесных пожаров, организация различных технологических процессов), но и более простые, связанные с формой сталкивающихся капель.

В [8–12] приведены типичные схемы регистрации основных характеристик процессов взаимодействия капель — углового и линейных параметров. Линейный параметр взаимодействия капель во всех случаях вычисляется одинаково, как отношение расстояния между центрами масс капель к сумме радиусов последних (либо двух таких расстояний к сумме диаметров) [7, 8]. Угловой параметр соударения рассчитывается как косинус угла взаимодействия, но последний определяется как угол между вектором относительной скорости движения капель и плоскостью их касания [7, 8] (вместо последней может использоваться линия, соединяющая центры масс капель [12]) или угол между траекториями движения [11]. Поскольку целесообразность использования того или иного углового параметра взаимодействия вызывает дискуссии, построение карт режимов столкновений часто проводится в координатах $B(We)$ [7–10], так как при расчете расстояний между центрами масс сближающихся капель учитывается вектор относительной скорости и как следствие угол атаки.

Анализ карт режимов взаимодействия ($\beta(We)$ и $B(We)$) капель воды [7–10], глицеринового раствора, ксантановой камеди, эмульсий на основе молока [13] и других составов позволяет выделить переходные области (регистрируются нестабильные последствия реализации одновременно нескольких режимов) между отскоками, разлетами, коагуляцией и дроблением. В качестве причин таких эффектов называются отличие форм капель от сферических и сложность сравнения углов взаимодействия. Влиянием данных факторов, вероятно, можно пренебречь лишь при малых размерах капель (менее 0,1 мм), когда их форма близка к сферической практически при любых дозвуковых скоростях [14]. При больших размерах этот эффект может быть значительным, так как в процессе полета капли непрерывно трансформируются, особенно в условиях варьирования температуры газовой среды [14]. Влияние таких деформаций сложно оценить при анализе карт режимов взаимодействия $\beta(We)$ и $B(We)$ [7–10]. Лишь в области больших значений относительных скоростей движения капель (более 3 ÷ 5 м/с) силы инерции определяют последствия соударений, и роль угла атаки, а также форм капель становится незначительной.

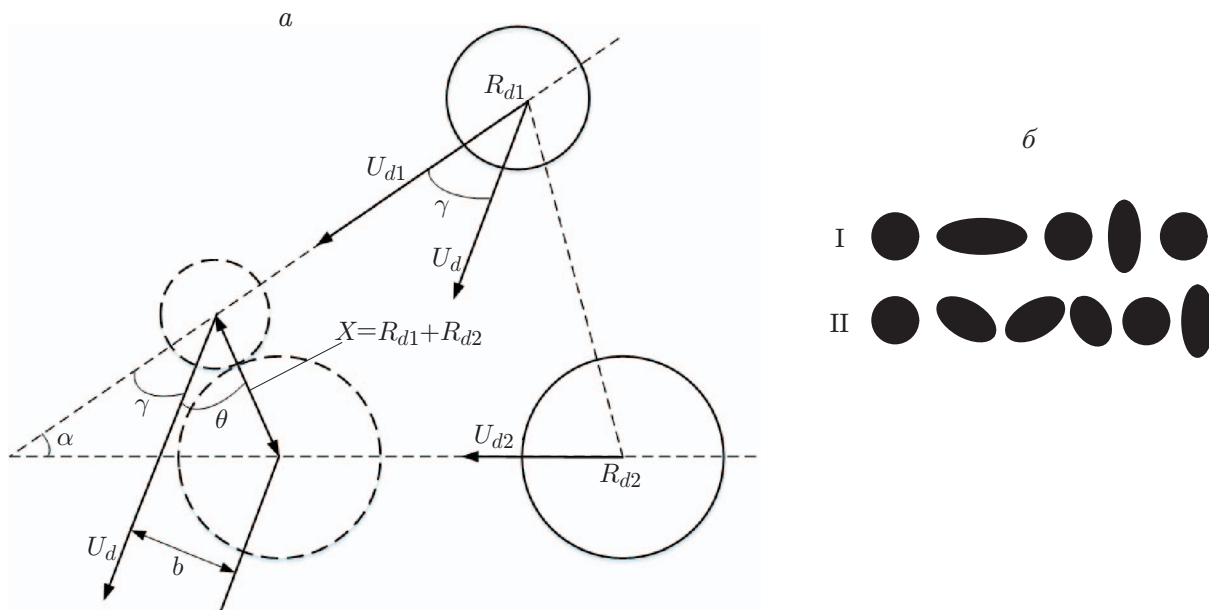


Рис. 1. Схема регистрации столкновения капель (*а*) и типичные формы капель при их деформации в газовом потоке (*б*):

I — в процессе свободного падения, II — в процессе вращения вокруг своей оси

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния угла столкновения капель с различной начальной формой на характеристики и условия реализации режимов взаимодействия. Для этого необходимо построить карты соответствующих режимов с учетом трех подходов, различающихся использованием углового и линейного параметров для типичных [7–10] диапазонов $\beta = 0 \div 1$, $B = 0 \div 1$, $We = 0 \div 200$, а также определить ряд параметров капель до и после взаимодействия. В таком случае можно прогнозировать изменение структуры и компонентного состава капельных аэрозолей в газовых потоках для различных приложений.

Методика экспериментальных исследований. Как и в экспериментальной работе [6], использовался стенд, дополненный дисковым элементом для установки группы специальных капилляров под заданным углом относительно друг друга. Опыты проводились с использованием различных схем движения капель воды: противоположно и сонаправленного, перпендикулярного, при варьировании углов α , γ , θ во всем возможном диапазоне. Используемая в настоящей работе схема регистрации соударений капель (аналогичная использованной в [8, 12]) приведена на рис. 1, *а*. Методики определения расстояния между центрами масс соударяющихся капель b соответствовали использованным в [7–11]. Углы атаки α , γ , θ (см. рис. 1, *а*) рассчитывались с учетом представлений, приведенных в [8–12], для форм капель, аналогичных полученным в [13].

В настоящей работе эксперименты выполнялись при температуре воздуха $18 \div 20$ °С с двумя взаимодействующими каплями с начальными радиусами $0,1 \div 1,0$ мм и скоростями $0,1 \div 10,0$ м/с. Система генерации капель с заданными скоростью и размерами состояла из двух насосов погружного типа с регулируемой производительностью ($0,5 \div 3,0$ л/мин), двух силиконовых капилляров (в каждом эксперименте использовались два одинаковых капилляра с диаметрами $0,2 \div 2,0$ мм), общего резервуара и системы стока в него образующихся при столкновениях фрагментов. Настройка параметров генерации капель выполнялась при проведении серии предварительных экспериментов с применением двух высокоско-

ростных видеокамер (разрешение 1152×864 , частота регистрации $3000 \div 100\,000$ кадр/с) с фокусировкой в одной области регистрации для получения пространственных изображений сталкивающихся капель, что позволяет контролировать соосность движения по третьей пространственной координате. Вследствие необходимости получения различных форм капель перед соударением выполнялось варьирование производительности насоса и угла наклона капилляра. В процессе видеорегистрации можно было наблюдать непрерывную деформацию капли. В [14] рассмотрены особенности этого процесса при свободном падении капли. Проведение серии опытов позволило получить не менее пяти видеокадров с идентичными случаями взаимодействия капель. Как и в [14], выполнялось разделение изображений регистрируемых капель по их формам путем сравнения с эталонной. Допускались отклонения средних размеров не более чем на 5 %. Исследовались капли трех форм: сфера, эллипсоид, условно жидкий диск. В работе [14] установлено, что капли непрерывно трансформируются как при вращательном, так и при поступательном движении, наиболее часто принимая формы сферы, эллипсоида и условно жидкого диска, называемого также блином и парашютом (см. рис. 1, б).

Методики регистрации размеров, форм, скоростей движения и углов взаимодействия капель в целом аналогичны использованным в [14]. Полученные видеogramмы обрабатывались с помощью программ Tema Automotive и FastCam, которые обеспечивали проведение анализа координат положения, форм капель, их скоростей, ускорений, углов, пройденных расстояний в широком диапазоне значений с высокой дискретизацией во времени. Систематические погрешности определения размеров R_d и скоростей U_d не превышали 1,6 и 2,1 %, случайные погрешности — 2,1, 3,4 % соответственно. С использованием Tema Automotive и параметрической сетки на видеogramмах определялись углы α , γ , θ . Систематическая погрешность при регистрации углов атаки не превышала 2,3 %.

Как и в [7–12], при обобщении результатов экспериментов, выполненных с использованием схемы, представленной на рис. 1, а, строились карты режимов столкновений в системах координат $\beta(\text{We})$ и $B(\text{We})$. Угловые параметры β_1 , β_2 , β_3 рассчитывались для углов α , γ и θ : $\beta_1 = \cos \alpha$, $\beta_2 = \cos \gamma$, $\beta_3 = \cos \theta$. Связь углов α и γ рассчитывалась при $U_{d2} > U_{d1}$ по формулам $\sin \alpha = X/U_{d2}$, $\sin \gamma = X/U_d$. При применении угла θ использовались формулы $b = X \sin \theta$, $X = R_{d1} + R_{d2}$. Линейный параметр рассчитывался с учетом расстояния между центрами масс $B = b/X$. Также с учетом относительной скорости движения $U_d = (|U_{d1}|^2 + |U_{d2}|^2 - 2|U_{d1}||U_{d2}|\cos \alpha)^{0,5}$ для каждой капли (мишени и снаряда) вычислялись числа Вебера: $\text{We}_1 = 2\rho R_{d1}U_d^2/\sigma$, $\text{We}_2 = 2\rho R_{d2}U_d^2/\sigma$. Значения U_d , R_{d1} , R_{d2} , α , γ , θ определялись с использованием видеogramм. Характеристики воды задавались для температуры 20 °C: $\rho = 10^3$ кг/м³, $\sigma = 72,88 \cdot 10^{-3}$ кг/с².

В отличие от [6] в настоящей работе определялись число образующихся при столкновениях фрагментов (капель различных форм и размеров) и суммарная площадь их поверхностей. По аналогии с [14] использовались специализированные алгоритмы слежения Tema Automotive. До столкновения рассчитывались площади миделевого сечения взаимодействующих капель S_m (для несферических форм расчет выполнялся за счет осреднения четырех значений S_m , соответствующих различным сечениям капли). В зависимости от формы капли использовались различные формулы пересчета среднего размера. Например, в случае сферы по формуле $R_d = (S_m/\pi)^{0,5}$ вычислялся средний радиус, далее с использованием формулы $S = 4\pi R_d^2$ определялись суммарные площади свободной поверхности исходных капель. До взаимодействия исходная площадь поверхности жидкости S_0 была равна сумме соответствующих параметров для сближающихся капель (снаряда и мишени). После столкновения образующиеся фрагменты жидкости имели разные формы и размеры. Поскольку анализировать размеры фрагментов жидкости с разными конфигурациями поверхностей достаточно сложно, принималось допущение о сферической форме

всех образующихся и, как правило, малых по размерам фрагментов воды. В этом случае с использованием Tema Automotive рассчитывались средние радиусы фрагментов, площади их поверхностей и вычислялась суммарная площадь поверхности всех капель жидкости S_1 .

Результаты исследования и их обсуждение. Для исследования влияния безразмерных угловых $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и линейного B параметров взаимодействия капель на режимы соударений (рис. 2, 3) с учетом подходов [7–12] получены соответствующие карты и проведено сравнение с известными данными (см. рис. 2, *a–в*, 3, *a*), обобщенными в [7–10], установлены недетерминированные условия реализации отскока, коагуляции, дробления и разлета и показаны многочисленные экспериментальные точки, соответствующие различным схемам взаимодействия, практически во всех областях значений параметров. Для большинства схем взаимодействия показаны соответствующие им области (см. рис. 2, *a–в*, 3, *a*). В настоящей работе установлено, что если не различать (не выполнять соответствующую выборку кадров) формы (сфера, эллипсоид, условно жидкий диск) взаимодействующих капель, то достаточно сложно выделить области однозначного доминирования режимов коагуляции, дробления или разлета в диапазоне средних значений числа Вебера $We = 15 \div 60$ (см. рис. 2, *a–в*, 3, *б*). При построении карты режимов β_3 с учетом угла θ разрешение карты мало (см. рис. 2, *a–в*), картина взаимодействия капель неполная, поэтому далее такая схема не использовалась. Лишь при фильтрации соударений капель с учетом конфигураций поверхности можно получить области (диапазоны) изменения основных параметров (β, We), в которых устойчиво реализуются исследованные схемы взаимодействия (см. рис. 2, *г–и*, 3, *в–д*).

Из рис. 2, 3 следует, что в исследованных диапазонах значений β, B, We виды соударений капель с формами сфера — сфера, сфера — эллипсоид, сфера — условно жидкий диск существенно различаются. Результаты проведенных экспериментов показывают, что основное различие состоит в доминировании одного или двух видов столкновений капель в форме сферы, эллипсоида и условного жидкого диска. В частности, при взаимодействии сфер доминируют коагуляция и отскок, в случае сталкивающихся эллипсоидов — разлет и коагуляция, а для условных жидких дисков характерно дробление. Это обусловлено наличием различных аэродинамических сил, действующих на капли разной формы при движении в газовой среде. В частности, на капли в форме жидкого диска действуют в несколько раз большие силы сопротивления и трения, чем на капли в форме сферы [14]. Это приводит к неустойчивости поверхности капель несферической формы [14] даже при меньших (по сравнению со сферами) значениях скоростей движения и размерах (соответственно, числах Вебера). В частности, на рис. 2, *з, и*, 3, *д* видно, что разлет регистрировался даже при $We < 5$. Для сферы соответствующие критические (переходные между коагуляцией и разлетом) значения составляли, как правило, $We = 12 \div 15$, а для эллипсоида характерны средние переходные значения We относительно сферы и условно жидкого диска.

При столкновении капель в форме эллипсоидов во всем диапазоне углов столкновений (в этом режиме взаимодействия времена релаксации эллипсоидов существенно больше, чем в случае сферы) зарегистрирована устойчивая коагуляция (см. рис. 2, *е, ж*, 3, *з*). Это свидетельствует о том, что положение эллипсоидов относительно друг друга или сферической капли практически не оказывает влияния на последствия взаимодействия. При попадании снаряда в центральную часть эллипсоидальной мишени под любым углом регистрировались условия разлета. Лишь при попадании капли-снаряда в хвостовые части эллипсоида происходило интенсивное разрушение, соответствующее дроблению (часто используются термины “частичная фрагментация” или “полный распад”).

Для мишеней — условно жидких дисков характерны близкие к наблюдавшимся для эллипсоидов закономерности, однако при увеличении угла между траекториями движения регистрировался устойчивый переход от разлета к дроблению в диапазоне средних чисел

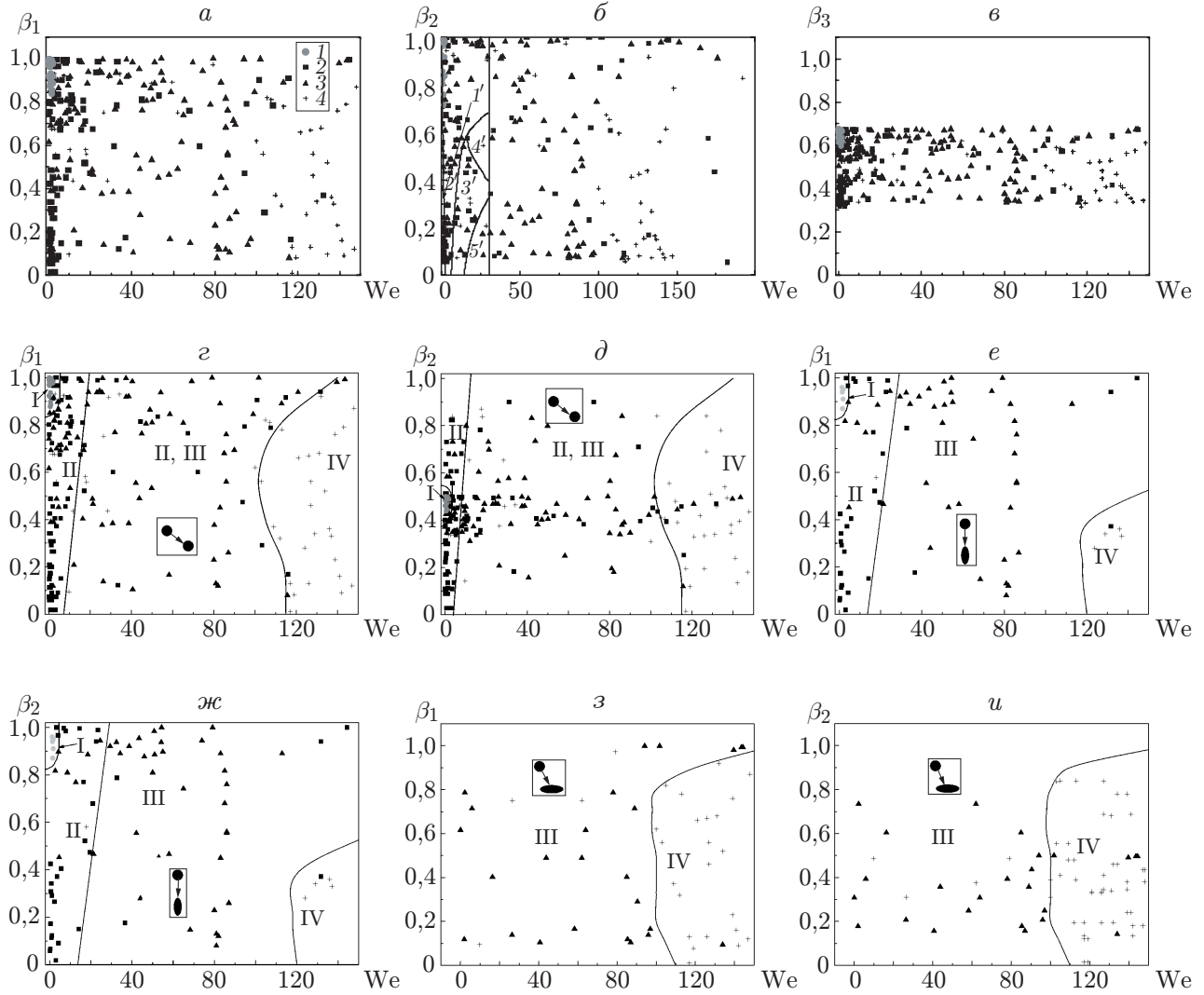


Рис. 2. Режимы соударения капель (отскок (I), коагуляция (II), разлет (III), дробление (IV)), полученные при использовании угловых параметров взаимодействия:

a – $в$ — рассчитанные по экспериментальным данным режимы для β_1 , β_2 , β_3 ; $г$ – $и$ — экспериментальные данные для капель различной формы ($г$, $д$ — сфера — сфера, $е$, $ж$ — сфера — эллипсоид, $з$, $и$ — сфера — условно жидкий диск); 1 – 4 — экспериментальные данные настоящей работы (1 — отскок, 2 — коагуляция, 3 — разлет, 4 — дробление); $1'$ – $5'$ — границы областей режимов в соответствии с [8] ($1'$ — медленное слияние, $2'$ — отскок, $3'$ — быстрое слияние, $4'$ — дробление, $5'$ — дробление с растяжением)

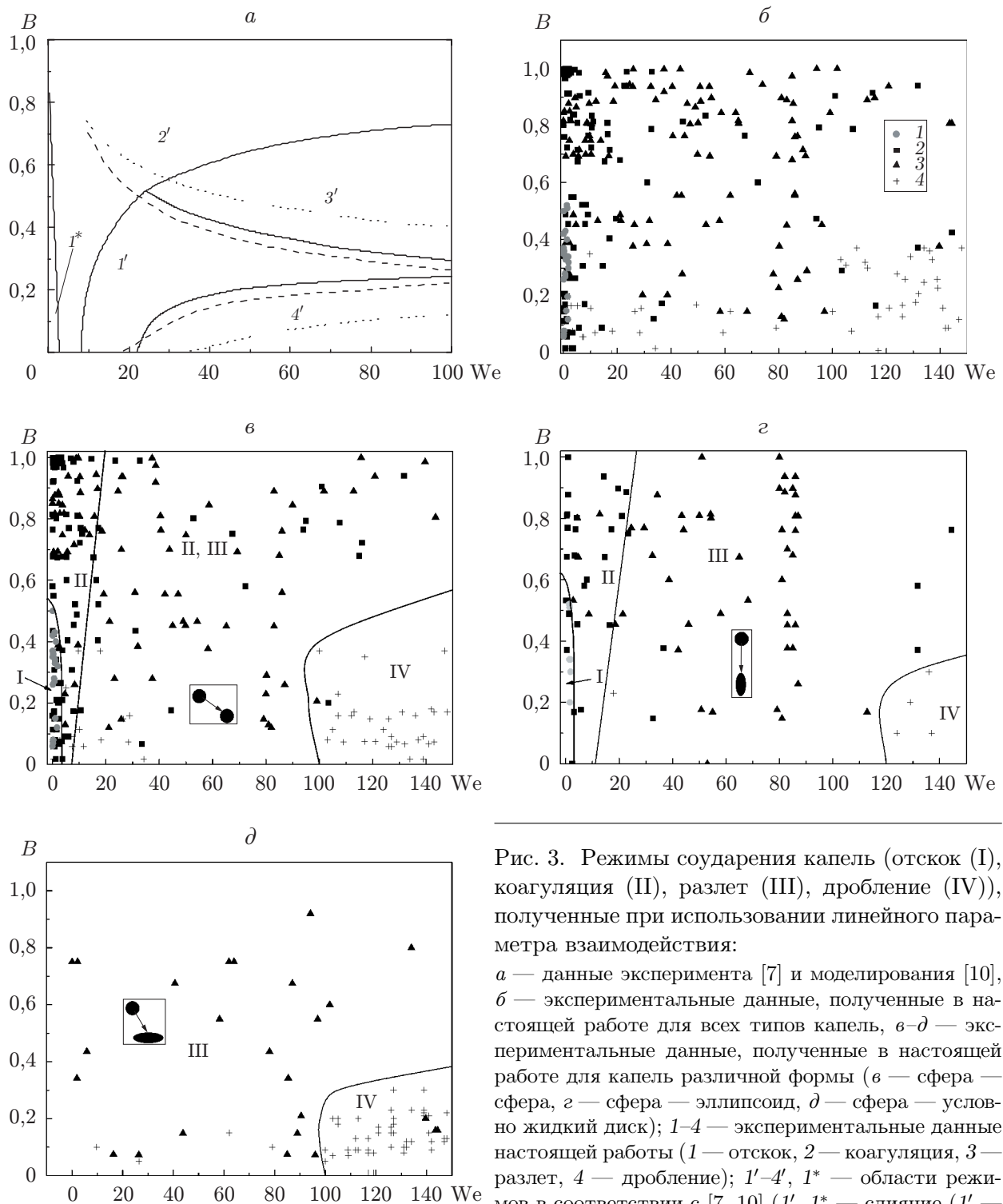


Рис. 3. Режимы соударения капель (отскок (I), коагуляция (II), разлет (III), дробление (IV)), полученные при использовании линейного параметра взаимодействия:

a — данные эксперимента [7] и моделирования [10], *б* — экспериментальные данные, полученные в настоящей работе для всех типов капель, *в–д* — экспериментальные данные, полученные в настоящей работе для капель различной формы (*в* — сфера, *г* — сфера — эллипсоид, *д* — сфера — условно жидкий диск); 1–4 — экспериментальные данные настоящей работы (1 — отскок, 2 — коагуляция, 3 — разлет, 4 — дробление); 1'–4', 1* — области режимов в соответствии с [7, 10] (1', 1* — слияние (1' — данные [7], 1* — данные [10]), 2' — отскок, 3' — дробление с растяжением, 4' — дробление); линии — границы областей (сплошные — данные [10], пунктирные — данные [7] при соотношении размеров капель 1 : 1, штриховые — данные [7] при соотношении размеров капель 2 : 1)

Вебера $We \leq 100$. Это обусловлено тем, что условно жидкий диск, по сути, состоит из большого количества водных цепочек, которые становятся тоньше при увеличении скорости движения (поперечные размеры увеличиваются, толщина уменьшается). При попадании в такие цепочки снаряд пробивает их и проходит с сохранением начальных размера и формы, т. е. реализуется типичный режим разлета сталкивающихся фрагментов жидкости. При малых углах атаки сфер и условно жидких дисков взаимодействие капли-снаряда и водяных цепочек в составе мишени происходит по касательной (при взаимодействии с несколькими мелкими фрагментами жидкости, входящими в данные цепочки). Поэтому площадь контакта увеличивается. Это способствует интенсификации дробления (как правило, значительной фрагментации) обеих капель (см. рис. 2,з,и, 3,д). На рис. 2,з,и, 3,д видно, что даже в диапазоне малых размеров капель и относительных скоростей движения ($We < 10$) отскоки и коагуляция не зарегистрированы. В этом диапазоне значений We очень сложно создать условия для существенной трансформации поверхности капли и приобретения ею формы условно жидкого диска. В случае если удавалось обеспечить разные формы капель (условно жидкий диск, эллипсоид, сфера), при $We < 10$ всегда регистрировался только разлет (см. рис. 2,з,и, 3,д). В остальных случаях даже при начальной форме капли в виде условно жидкого диска вследствие малых размеров и относительных скоростей движения перед взаимодействием она трансформировалась в сферу или эллипсоид (см. рис. 2,а-д, 3,б,в). В целом дископодобные формы капель при $We < 20$ слабоустойчивы. Поэтому в данном диапазоне значений числа Вебера количество экспериментальных точек невелико (см. рис. 2,з,и, 3,д).

Анализ влияния углов α и γ (безразмерных параметров β_1 и β_2) на характеристики исследованных режимов взаимодействия показывает, что чем меньше значения данных углов, тем больше вероятность отскока и коагуляции капель. Чем больше значения α и γ , тем интенсивнее взаимодействие с разделением капель на фрагменты (разлет и дробление). При этом в случае использования параметра β_2 экспериментальные точки соответствуют более узкому диапазону его значений на рис. 2 (что хорошо согласуется с данными [8]), чем при использовании β_1 . Последовательность режимов и характерные переходные границы в целом сохраняются независимо от используемого подхода при вычислении углового параметра (β_1, β_2).

В отличие от [8] в настоящей работе переходы между режимами разлета и дробления наблюдались при больших значениях числа Вебера ($We > 90$). Это обусловлено учетом условий реализации только одного режима соударения (в [8] допускались даже неединичные случаи реализации разлета и коагуляции в областях, которые полагались областями устойчивого дробления); использованием двух камер для контроля соударения капель в одной плоскости (в [8] этот фактор не обсуждался); различным влиянием скорости движения и размеров капель на значение числа Вебера; отличием от используемых в [8] подходов при регистрации относительной скорости движения капель. Поскольку только в [8] приведены обобщенные данные для β_2 , анализ этих данных необходим для сравнения карт соответствующих режимов. В целом можно сделать вывод об удовлетворительном соответствии карт режимов взаимодействия на рис. 2.

Аналогичные выводы можно сделать при сравнении результатов экспериментов с использованием безразмерного линейного параметра взаимодействия капель B и данных [7, 10] (ср. рис. 3,а и рис. 3,б-д). Условие $B = 0$ может выполняться при лобовом (соосном) встречном или сонаправленном столкновении капель, условие $B = 1$ — при касательном соударении капель и любом угле атаки. При $B \rightarrow 1$ доминируют условия отскока (малые относительные скорости движения) и разлета (большие относительные скорости движения), а при $B \rightarrow 0$ реализуется в основном коагуляция (малые относительные скорости движения) или дробление (большие относительные скорости движения). На

рис. 3 показаны диапазоны значений числа Вебера, соответствующие переходам между режимами при различных значениях B .

Если не различать разлет и коагуляцию капель, а также их формы (см. рис. 2, *a–в*, 3, *б*), то границы области перехода к режиму дробления соответствуют значениям числа Вебера $We = 40 \div 60$, а к режиму разлета — значениям $We = 15 \div 20$, что хорошо согласуется с данными [7, 8, 10], приведенными на рис. 2, *a–в*, 3, *a*. Однако без учета формы капель сложно достоверно определить условия максимальной фрагментации последних. В настоящей работе ставилась задача определения более точных границ областей перехода от одного режима к другому.

Аналогично [3, 4] в данной работе установлено, что во всем диапазоне значений угла атаки регистрируются взаимодействия, завершающиеся полной или частичной фрагментацией (дроблением) капель. Такие условия регистрировались при больших размерах ($0,5 \div 1,0$ мм) и скоростях движения ($7 \div 10$ м/с) хотя бы одной из капель. При этом несферическим каплям соответствовали меньшие размеры R_{d1} , R_{d2} и скорости U_{d1} , U_{d2} . Этот результат очевиден, однако впервые установлены количественные различия диапазонов углов столкновений капель в форме сфер, условно жидких дисков и эллипсоидов, в которых доминируют отскок, коагуляция, разлет и дробление (см. рис. 2, 3).

Для больших значений скоростей движения (более 7 м/с) и размеров (более 0,5 мм) капель ($We > 50$) характерны взаимодействия не только с их дроблением. Большое число соударений зарегистрировано в режимах разлета и (или) коагуляции (см. рис. 2, 3). Это можно объяснить влиянием углов столкновений и форм капель, которые не учитываются при вычислении чисел Вебера.

Удовлетворительное соответствие данным опытов [3, 4] можно отметить лишь при $We > 50$ (см. рис. 2, 3). При меньших значениях We параметры, соответствующие переходным условиям между режимами коагуляции и разлета, а также дробления, различаются на $20 \div 30$ %. По-видимому, этот результат обусловлен влиянием углов столкновений и форм взаимодействующих капель. В отличие от работ [3, 4] во всех диапазонах значений числа Вебера регистрировались разные схемы взаимодействия (при величине углов между траекториями движения капель от 0 до 90°). В частности, даже при $We < 15$ установлены условия, при которых зарегистрировано большое число взаимодействий в режиме не только коагуляции, но и разлета и дробления (снарядов и мишеней).

Анализ результатов экспериментов показывает, что оценить условия и последствия разрушения или слияния двух капель воды при их столкновениях с использованием только числа Вебера (как, например, в [3, 4]) при несовпадении векторов скорости их движения невозможно. В соответствии с теорией подобия последствия столкновений двух капель воды (возможно, и других жидкостей) определяются не только скоростью движения одной из них (или относительной скоростью с учетом их взаимного перемещения), коэффициентом поверхностного натяжения и плотностью жидкости, но и конфигурацией поверхности капель и углом атаки. Результаты экспериментов показывают, что угол атаки, не входящий в выражения для числа Вебера, как и форма капель, играет не менее важную роль, чем четыре перечисленных выше фактора (см. рис. 2, 3). Пространство критериев, определяющих условия и последствия столкновений двух капель, является многомерным. Угол атаки и коэффициент несферичности являются характеристиками процесса, которые должны быть включены в число анализируемых критериев наряду с We .

На рис. 4 приведены результаты вычислений отношений S_1/S_0 (увеличение суммарной площади поверхности жидкости). Представлены значения S_1/S_0 , которые рассчитаны как средние для всех зарегистрированных столкновений. При использовании диаграмм роста сложно оценить реальные последствия взаимодействия капель, так как часто, например при дроблении, образуется полидисперсный поток фрагментов жидкости, и в ходе

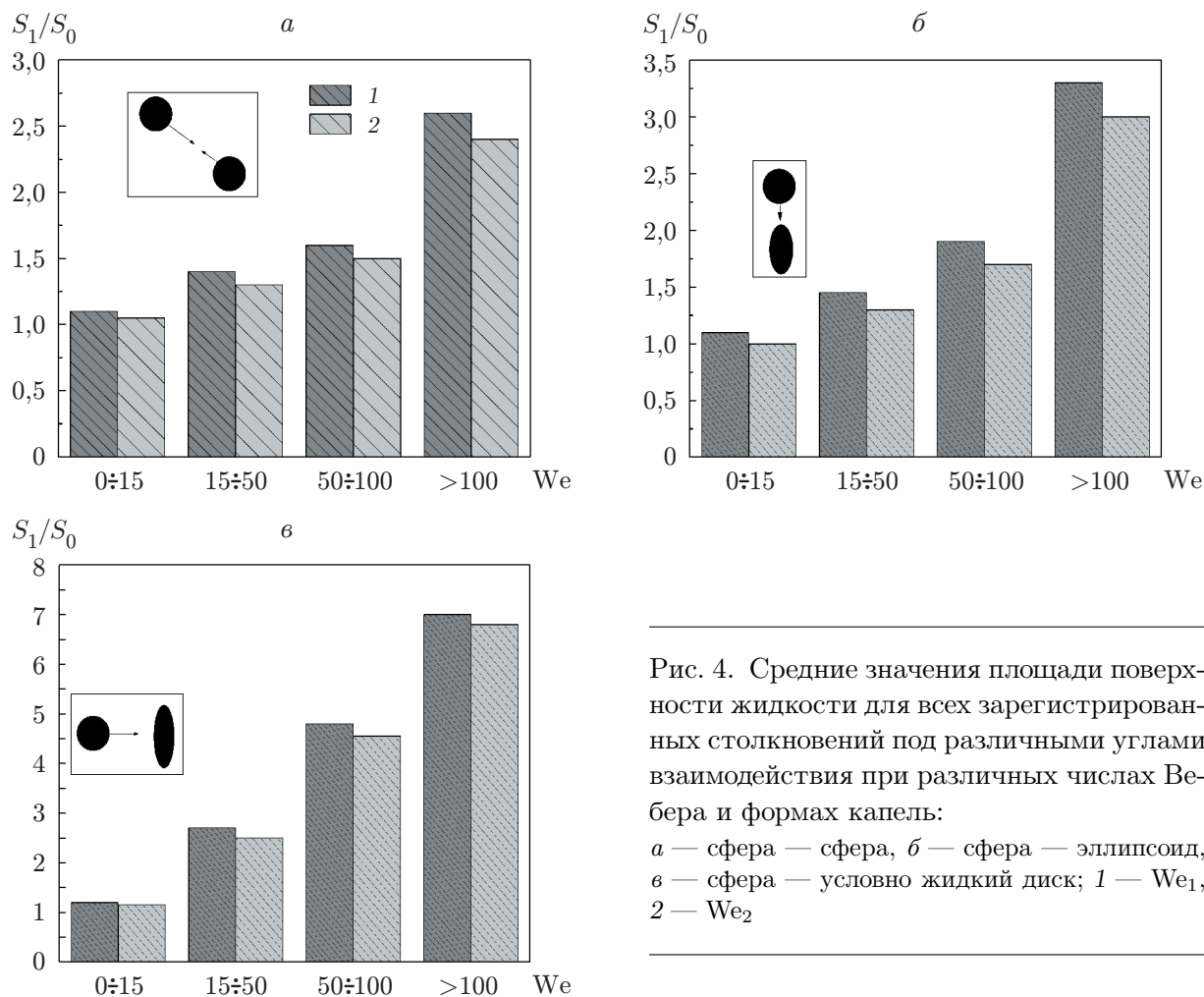


Рис. 4. Средние значения площади поверхности жидкости для всех зарегистрированных столкновений под различными углами взаимодействия при различных числах Вебера и формах капель:

a — сфера — сфера, *б* — сфера — эллипсоид, *в* — сфера — условно жидкий диск; 1 — We_1 , 2 — We_2

экспериментов число новых капель меняется существенно (на 20–30 %), а суммарная площадь поверхности — несущественно (менее чем на 10 %). Поэтому обобщение результатов экспериментов целесообразно проводить с использованием не суммарного количества образующихся жидкостных фрагментов, а отношения площадей их свободной поверхности (соответствует площади испарения жидкости) до и после взаимодействия S_1/S_0 .

На рис. 4 видно, что в случае We_1 значения S_1/S_0 больше, чем в случае We_2 . Это обусловлено принятым (в соответствии с классическими представлениями (см., например, [3, 4])) условием, что снарядом считается капля, имеющая большую скорость перед столкновением. Следует отметить, что зависимости $S_1/S_0(We_1)$ и $S_1/S_0(We_2)$ хорошо коррелируют. Как и предполагалось, при соударении капля несферической формы значения S_1/S_0 существенно больше, чем при соударении по схеме сфера — сфера, во всем диапазоне значений числа Вебера и углов атаки. Это обусловлено доминированием режимов разлета и дробления. Также вполне очевидным можно считать увеличение S_1/S_0 при увеличении We (см. рис. 4). Большое значение имеют количественные оценки диапазонов значений величины S_1/S_0 как функции We для различных конфигураций поверхности капель.

Результаты проведенных исследований показывают, что площадь поверхности жидкости можно увеличить в несколько раз (до 10) при различных условиях взаимодействия

и формах капель (см. рис. 4). При этом масштабы увеличения S_1/S_0 сопоставимы с ранее установленными при увеличении скоростей движения капель (т. е. за счет аэродинамического фактора, способствующего их сплющиванию, надуванию, разрыву водных цепочек и формированию аэрозоля [15]), а также при перегреве неоднородных капель (суспензий, эмульсий, растворов, несмешиваемых жидкостей типа воды в дизельном топливе или дизельного топлива в воде) [16, 17]. Лишь для эмульсий с существенно различающимися (более чем на $100 \div 150$ °C) температурами кипения значения отношения S_1/S_0 могут превышать 100 и времена нагрева до распада составляют, как правило, десятки (или даже сотни) микросекунд [17].

Каждый из рассмотренных в экспериментальных работах [15–17] и настоящей работе факторов: тепловой (перегрев), аэродинамический (ускорение), контактный (соударение капель между собой или с преградой) — способствует увеличению значения S_1/S_0 (см. рис. 4). Этот результат важен для развития тепломассообменных технологий, для применения которых требуется интенсификация фазовых превращений за счет так называемого вторичного (непосредственно в технологических камерах и агрегатах) измельчения капель. Последнее можно осуществить, обеспечив совместное влияние трех рассмотренных факторов. При этом необходимо учитывать расходы энергии на ускорение капель, их столкновения или смешивание неоднородных составов. Менее затратными представляются технологии вторичного измельчения капель, основанные на их столкновениях между собой, так как в этом случае отсутствует необходимость дополнительного подвода тепловой энергии, а также существенного ускорения потоков. За счет варьирования углов атаки, форм, размеров и концентрации капель можно получить большие значения S_1 для достижения значений $S_1/S_0 > 5$.

Установлено, что условия теплового микровзрывного распада капель зависят от неоднородности состава капель (как правило, два или три компонента с существенно различающимися температурами кипения, например вода, дизельное топливо, керосин, спирт, бензин, нефть, масло и др.) [16, 17]. В [16, 17] рассмотрены неоднородные капли, содержащие керосин, дизельное топливо, воду, твердые частицы (графит и углерод). Наличие этих компонентов обеспечивало увеличение значения S_1/S_0 в несколько раз при конвективном, кондуктивном, радиационном и смешанном режимах нагрева, а в случае перегрева капель воды регистрировались кипение и слабая фрагментация. Можно утверждать, что при интенсификации столкновения перегретых неоднородных капель число фрагментов и суммарная площадь их поверхности многократно увеличатся. По-видимому, будет проявляться синергетический эффект вследствие большой концентрации перегретых многокомпонентных капель. Такие условия являются оптимальными для достижения максимальной площади поверхности жидкости в капельном облаке (т. е. площади взаимодействия с газом и как следствие фазовых переходов) в имеющихся и разрабатываемых технологиях [18, 19].

Выводы. Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

Карты режимов взаимодействия капель в форме сферы, эллипсоида и условно жидкого диска существенно различаются в системах координат $B(We)$ и $\beta(We)$. Наименьшие различия соответствуют режиму отскока, так как при любой форме капли он может происходить лишь при малых размерах и относительной скорости движения капель ($We < 5$). Параметры $\beta_1, \beta_2, \beta_3, B$ оказывают влияние на последствия столкновений, однако основное влияние оказывает относительная скорость движения капель. В среднем диапазоне значений $We = 10 \div 50$ определяющее влияние оказывают конфигурация поверхности капли и значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3, B$. При соударениях капель в форме сферы доминировали коагуляция и разлет, при соударениях эллипсоидов — коагуляция, условно жидких дисков — дробление.

С использованием полученных на основе экспериментальных данных карт режимов взаимодействия капель воды определены предельные условия, соответствующие переходу к режиму интенсивного дробления как по значениям We , так и по диапазонам β_1 , β_2 , β_3 , B . Эти результаты дополняют представления [7–12] и впервые позволяют сопоставить различные подходы, применяемые при вычислении угловых коэффициентов взаимодействия. Показано, что физические закономерности происходящих процессов можно описать с помощью как углового параметра $\beta_1(We)$, так и углового параметра $\beta_2(We)$.

Интенсификация дробления капель в форме сфер, эллипсоидов и условно жидких дисков при соударениях может приводить к разномасштабному увеличению относительной площади поверхности жидкости. Наиболее существенное (в 6–8 раз) увеличение S_1/S_0 можно получить в системах с каплями в форме условно жидких дисков. На основе результатов проведенных экспериментов (в частности, диаграмм $S_1/S_0 = f(We)$) можно прогнозировать число капель и суммарную площадь поверхности испарения жидкости, которые являются наиболее важными параметрами в газопарокапельных системах (при термической или огневой очистке жидкостей, полидисперсном пожаротушении, в теплоносителях на основе паров и капель воды, а также продуктов сгорания). В случае неоднородных по составу капель дополнительный вклад во вторичное измельчение вносит микровзрыв (в [16, 17] показано, что значения S/S_0 могут увеличиваться в десятки и даже сотни раз). Перспективной задачей исследований является определение условий, при которых можно реализовать синергетический эффект вторичного измельчения капель за счет их столкновений и микровзрывного распада.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Терехов В. И.** Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках / В. И. Терехов, М. А. Пахомов. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2009.
2. **Пажи Д. Г.** Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. М.: Химия, 1984.
3. **Архипов В. А., Ратанов Г. С., Трофимов В. Ф.** Экспериментальное исследование взаимодействия капель при столкновениях // ПМТФ. 1978. № 2. С. 73–77.
4. **Архипов В. А., Васенин И. М., Трофимов В. Ф.** К устойчивости капель идеальной жидкости при столкновениях // ПМТФ. 1983. № 3. С. 95–98.
5. **Высокоморная О. В.** Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы / О. В. Высокоморная, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.
6. **Кузнецов Г. В., Волков Р. С., Стрижак П. А.** Статистический анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении в высокотемпературном газовом потоке // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 17. С. 53–60.
7. **Orme M.** Experiments on droplet collisions, bounce, coalescence and disruption // Progr. Energy Combust. Sci. 1997. V. 23, N 1. P. 65–79.
8. **Krishnan K. G., Loth E.** Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes // Intern. J. Multiphase Flow. 2015. V. 77. P. 171–186.
9. **Pawar S. K., Henrikson F., Finotello G., et al.** An experimental study of droplet-particle collisions // Powder Technol. 2016. V. 300. P. 157–163.
10. **Zhang H., Li Y., Li J., Liu Q.** Study on separation abilities of moisture separators based on droplet collision models // Nuclear Engng Design. 2017. V. 325. P. 135–148.
11. **Kan H., Nakamura H., Watano S.** Effect of collision angle on particle-particle adhesion of colliding particles through liquid droplet // Adv. Powder Technol. 2018. V. 29, N 6. P. 1317–1322.

12. **Kim S., Lee D. J., Lee C. S.** Modeling of binary droplet collisions for application to inter-impingement sprays // Intern. J. Multiphase Flow. 2019. V. 35, N 6. P. 533–549.
13. **Finotello G., De S., Vrouwenvelder J. C. R., et al.** Experimental investigation of non-Newtonian droplet collisions: the role of extensional viscosity // Experiment. Fluids. 2018. V. 59, N 7. 113.
14. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 85. P. 1–11.
15. **Shreiber A. A., Podvisotski A. M., Dubrovski V. V.** Deformation and breakup of drops by aerodynamic forces // Atomiz. Sprays. 1996. V. 6, N 6. P. 667–692.
16. **Vysokomornaya O. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A.** Breakup of heterogeneous water drop immersed in high-temperature air // Appl. Thermal Engng. 2017. V. 127. P. 1340–1345.
17. **Strizhak P. A., Piskunov M. V., Volkov R. S., Legros J. C.** Evaporation, boiling and explosive breakup of oil-water emulsion drops under intense radiant heating // Chem. Engng Res. Design. 2017. V. 127. P. 72–80.
18. **Sazhin S. S.** Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // Fuel. 2017. V. 196. P. 69–101.
19. **Moussa O., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J.** Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions // Intern. J. Thermal Sci. 2018. V. 133. P. 90–97.

*Поступила в редакцию 8/XI 2018 г.,
после доработки — 10/I 2019 г.
Принята к публикации 28/I 2019 г.*
