

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Шлегель Никита Евгеньевич

**КОМБИНИРОВАННЫЕ СХЕМЫ ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
КАПЕЛЬ ЖИДКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ В КАМЕРАХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Стрижак Павел Александрович

Томск – 2021

Оглавление

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ.....	14
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	34
2.1. Современные методики исследования характеристик вторичного измельчения капель жидкости.....	34
2.2. Экспериментальный стенд и методика исследования процессов вторичного измельчения капель жидкости.....	38
2.3. Свойства исследованных топлив	48
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ	55
3.1. Влияние формы капель на характеристики взаимодействия при их столкновении	55
3.2. Влияние параметров мишени и снаряда на характеристики взаимодействия капель.....	67
3.3. Влияние скоростей движения и размеров исходных капель на расчет критических чисел Вебера для режимов соударений.....	78
3.4. Экспериментальное определение последствий взаимодействия капель воды при смешении аэрозоля с нагретым газовым потоком....	81
3.5. Экспериментальное определение последствий взаимодействия капель воды в газовом потоке при разной степени турбулизации.....	90
3.6. Экспериментальное определение характеристик вторичного измельчения капель воды с газовыми пузырьками.....	98
3.7. Влияние вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкости на режимы и последствия столкновений капель	106
3.8. Экспериментальное исследование столкновений однокомпонентных и многокомпонентных капель топлив	121
3.9. Характеристики вторичных фрагментов при соударении капель одно- и многокомпонентных жидкостей с нагретой стенкой	141
3.10. Комбинированное измельчение капель жидкости и композиционных топлив	172

3.11. Энергетический анализ перспективных схем вторичного измельчения	186
3.12. Измельчение капель жидкости в газовой среде при разном давлении и температуре	193
3.13. Вторичное измельчение капель мазута при соударениях между собой и с твердой стенкой.....	196
3.14. Рекомендации по использованию результатов исследований для повышения эффективности работы теплоэнергетических установок за счет первичного и вторичного измельчения капель топлив.....	205
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	216
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	219
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Перечень основных публикаций по теме диссертации	238
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Перечень научных мероприятий, на которых выполнена апробация результатов диссертационных исследований....	241
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акты об использовании результатов диссертационных исследований.....	242

ВВЕДЕНИЕ

Топливные технологии с учетом всего разнообразия объектов энергетики и двигателей внутреннего сгорания имеют ряд ключевых направлений развития. К числу основных относятся [1–3]: минимальные антропогенные выбросы (газовые, летучая зола, коксовые отложения); максимальная полнота выгорания топлива; повышение тепловой мощности; минимальные температуры и тепловые потоки, достаточные для устойчивого зажигания; расширение номенклатуры компонентов топлив за счет вовлечения промышленных и бытовых отходов; комбинированные системы топливосжигания за счет использования традиционных энергоресурсов и альтернативных источников. На этом фоне усиливается интерес исследователей во всем мире к так называемым композиционным водосодержащим топливам [3]. Их часто называют композиционными жидкими, водоугольными или органоугольными [3]. В качестве ключевых ограничений широкого использования в энергетике последних традиционно считаются [3]: малая по времени стабильность, т.е. интенсивная расслаиваемость при хранении; сложности транспортировки и распыления (закупоривание форсунок, повышение давления в трубопроводах и другие эффекты); пониженные (относительно аналогичных параметров при сжигании углей, нефтепродуктов или газа) температуры в камере сгорания за счет испарения воды. Благодаря активному развитию науки, техники и технологий в мире многие из указанных ограничений к настоящему моменту времени практически устранены за счет применения в составе топлив специализированных добавок и примесей [4]. Тем не менее, нередко исследователями (например, [5–7]) подчеркивается, что целесообразно разработать технологии измельчения капель сложных по составу топлив в нагревательных камерах или других установках для интенсификации их зажигания и повышения полноты выгорания. Для этого могут быть

применены стадийные подходы, в частности, первичное и вторичное измельчение.

Технологии первичного измельчения основаны на использовании форсуночных устройств [8,9]. В частности, для распыления композиционных топлив используют, как правило, пневматические форсунки в силу их относительной конструктивной и эксплуатационной простоты и надежности. В зависимости от вида топлива и топочного устройства форсунки должны обеспечивать требуемые характеристики распыления топлива, создавать заданную форму капельного факела, иметь определенный диапазон возможного варьирования расхода топлива и размеров капель. Наличие в композиционных топливах мелкодисперсных твердых частиц приводит к значительному эрозионному износу элементов форсунки. Поэтому конструкции форсунок для распыления композиционных топлив не должны иметь узкие каналы и высокие скорости движения топлива вблизи их стенок.

Вторичное измельчение капель жидкостей встречается в различных приложениях, например, при распылении топлив в топках котлов [10–12], системах охлаждения [12], двигателях внутреннего сгорания [10,13], теплообменном оборудовании [14,15]. В связи с этим достоверное изучение процессов вторичного измельчения капель имеет большое значение для разработки высокоэффективных технологий распыления. Для вторичного измельчения капель используются различные принципы и подходы. Наиболее типичные: дробление капель жидкости за счет удара о твердую поверхность (такие процессы называют соударение с твердой стенкой) [16,17], за счет столкновения капель между собой [18,19], перегрева и микро-взрывного распада капель [20,21], дробление капель воздушным потоком (часто называют газовой струей) [22,23].

Широкое применение схем вторичного измельчения капель жидких топлив в промышленных теплоэнергетических системах может способствовать снижению экологических и экономических показателей горения, а также увеличить энергоэффективность сжигания.

Композиционные жидкие топлива нередко включают отходы нефтяного происхождения и углеобогащения. Проблема утилизации таких отходов имеет общемировой характер, так как осложняется ограниченностью площадей для хранения и экологической опасностью [24–26]. Системы распыления таких топлив считаются малоэффективными.

В настоящее время распылительные технологии развиваются в направлении повышения энергоэффективности максимально возможного и допустимого измельчения капель жидкостей [27–30]. При этом в системах и установках, использующих тепло, чаще всего, такие технологии реализуются с использованием существенно неоднородных капельных составов. Как следствие, наиболее актуальное направление исследований – интенсификация процессов вторичного измельчения (т.е. дополнительного после первичного распыления форсункой) как однородных, так и существенно неоднородных жидкостей. Среди технологий вторичного измельчения капель жидкостей можно выделить наименее затратные [27–29]: соударения между собой или со стенкой; измельчение путем воздействия воздушным потоком. Пока остается довольно много дискуссионных вопросов об условиях, при которых можно обеспечить максимальное (требуемое для интенсификации соответствующих тепломассобменных процессов) количество вторичных фрагментов с малыми размерами. Поэтому целесообразно проанализировать современные достижения мирового научного сообщества в области изучения этих процессов и сформулировать перспективные ниши для последующих исследований.

Целью работы является определение условий и характеристик измельчения однородных и многокомпонентных капель жидких и композиционных топлив до мелкодисперсного аэрозоля по результатам экспериментальных исследований и формулирование рекомендаций по их использованию в теплогенерирующих технологиях.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Сравнительный анализ диапазонов изменения размеров, скоростей движения и углов атаки однородных и многокомпонентных капель жидких и композиционных топлив при распылении их в топочных устройствах.
2. Определение влияния номенклатуры и концентраций перспективных компонентов жидких и композиционных топлив на последствия первичного и вторичного измельчения капель.
3. Разработка экспериментальной методики, создание стенда и проведение исследований условий и характеристик вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив.
4. Экспериментальное определение характеристик вторичной фрагментации капель жидких и композиционных топлив при варьировании ключевых факторов и параметров: схемы измельчения, температуры в камере сгорания, свойств жидкости, концентрации добавок, формы и размеров капель и др.
5. Сравнительный анализ схем первичного и вторичного измельчения капель топлив, разработка по его результатам комбинированных схем фрагментации капель.
6. Разработка рекомендаций по использованию результатов диссертационных исследований с целью повышения эффективности распыления топлив в камерах сгорания энергетических установок.

Научная новизна работы. Разработана экспериментальная методика проведения исследований по определению характеристик вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив, используемых при работе систем для генерации и трансформации энергоносителей с перспективными специализированными добавками (в виде отходов углеобогащения и нефтепереработки). Определены эффективные условия измельчения капель с учетом группы факторов и параметров: размеры, скорости движения, углы атаки, компонентный состав и концентрация

добавок, температура жидкости, температура и давление газовой среды. Сформирована не имеющая аналогов информационная база данных режимов и характеристик вторичного измельчения капель перспективных композиционных и жидких топлив.

Практическая значимость работы. Для широкой группы составов топлив на базе отходов углеобогащения и нефтепереработки определены интегральные характеристики вторичного измельчения капель и построены режимные карты взаимодействия. Обоснованы экологические, экономические и социальные эффекты от применения вторичного измельчения капель в системах для генерации и трансформации энергоносителей. Экономический и энергетический эффекты состоят в повышении энергоэффективности работы теплотехнического оборудования за счет уменьшения размеров после первичного измельчения капель, что приводит к увеличению площади поверхности теплообмена, фазовых превращений и химического реагирования. При сжигании отходов в составе суспензий с добавлением воды снижаются антропогенные выбросы. Этим обосновывается экологическое преимущество сжигания композиционных топлив. Социальный эффект заключается в том, что станет возможным снизить объемы сжигаемого угля, уменьшатся выбросы в атмосферу. Результаты диссертационных исследований используются в НИ ТПУ в образовательных и научных процессах при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», а также в реализации проектов РНФ 18-71-10002-П и 21-71-10008. Результаты использованы при разработке и модернизации систем для генерации и трансформации энергоносителей. К диссертации приложены акты об использовании результатов исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, использованием высокоскоростных систем регистрации и

программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, полученными для одно- и многокомпонентных жидкостей (на примере воды, эмульсий и суспензий).

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования комбинированных систем вторичного измельчения капель топливных композиций выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10002 «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкости в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах) (2018–2023 гг.). Созданные диссертантом экспериментальные методики применяются при выполнении исследований в проекте Российского научного фонда № 21-71-10008, направленного на определение характеристик вторичных фрагментов топлив при использовании методик первичного и вторичного измельчения. Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий Российской Федерации «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» и «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Разработана методика вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в диапазонах изменения температуры и давления газовой среды, соответствующих теплопередающему и теплоиспользующему оборудованию, отличающаяся от известных комбинацией группы механизмов: распад капель при взаимодействии их между собой, с потоком воздуха и твердой поверхностью.
2. Установлен дисперсный состав вторичных фрагментов после комбинированных схем измельчения исходных капель типичных жидких

и перспективных комбинированных топлив, используемых в промышленных теплоэнергетических установках.

3. Определено влияние характеристик жидкостей на режимы (изменения положения границ на картах режимов) соударений капель в системах координат с группой критериев (We , Oh , Re , Ca , B). Показано, что при увеличении вязкости с 0.001 до 0.0063 Па·с снижается количество вторичных фрагментов практически на 40%. Уменьшение поверхностного (с 0.07269 до 0.036 Н/м) и межфазного натяжения (с 0.04257 до 0.00341 Н/м) способствуют снижению количества вторичных фрагментов практически на 20% и 70%, соответственно.
4. Установлено существенное влияние температуры газа и давления на последствия вторичного измельчения капель топлив. Например, увеличение температуры газовой среды с 20 до 500 °С и давления с 0.9 до 5 атм приводит к возрастанию отношения площадей поверхности после и до взаимодействия капель практически на 20% и 25%, соответственно.
5. Обосновано, что площадь поверхности испарения жидкости существенно возрастает при применении схем вторичного измельчения: соударение капель между собой – в 3–6 раз, с потоком воздуха – в 5–7 раз, с твердой стенкой – в 15–25 раз, комбинированная методика – более чем в 100 раз. Предложены модификации схем расположения основных элементов распыливающих систем в топочных камерах энергетических установок, позволяющие реализовать комбинированные механизмы измельчения капель жидких и композиционных топлив.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментов, выборе методов, алгоритмов и средств регистрации, проведении опытов, обработке полученных результатов, оценке погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций использования полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов. Постановка решаемых задач, планирование экспериментов и подготовка публикаций проводились

совместно с научным руководителем. Автор выражает благодарность коллективу Лаборатории тепломассопереноса ТПУ за помощь в организации и проведении экспериментов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на XV всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2018), международном симпозиуме имени М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2018–2020), XII всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019), III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020), Всероссийской научно-технической конференции «Энергия 2021» (Иваново, 2021), XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Екатеринбург, 2021), VIII Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2021).

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в более чем 20 печатных работах, в том числе более 10 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science» и входящих в первый квартиль: «Powder Technology» (ИФ=4.1), «Chemical Engineering Science» (ИФ=3.8), «International Communications in Heat and Mass Transfer» (ИФ=3.9), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=4.7), «Fuel» (ИФ=5.5), «Energy» (ИФ=6.1) и др.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 245 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 4 таблиц. Библиография включает 162 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены практическая значимость, научная новизна и достоверность полученных результатов, личный вклад автора.

В первой главе проанализировано современное состояние исследований схем вторичного измельчения капель жидкостей. Выполнен анализ современных способов и технологий измельчения капель жидкостей, сформулированы основные достоинства и недостатки каждой из схем. Определено современное состояние теоретических и экспериментальных исследований распыления жидкостных потоков и измельчения капель. Рассмотрены перспективные добавки для изменения свойств жидкостей. Определены основные достижения. Выделены нерешенные задачи, а также сдерживающие факторы развития технологий вторичного измельчения капель топлив.

Во второй главе приведено описание разработанных методик исследований процессов вторичного измельчения капель жидкости и обоснован выбор рациональных схем. Представлена схема созданного экспериментального стенда и разработанная автором методика измерений параметров фрагментации капель, а также рассмотрены добавки для изменения свойств (поверхностное и межфазное натяжение, динамическая вязкость, плотность) жидкости и методы приготовления растворов. Выделены систематические погрешности и причины случайных погрешностей измерений.

В третьей главе приведены основные результаты выполненных экспериментальных исследований. Установлено влияние параметров исходных капель, свойств жидкости, температуры и давления газовой среды на характеристики вторичного измельчения. Представлены карты режимов взаимодействия капель с критическими значениями параметров, характеристик перехода между ними и отношений площадей поверхности

испарения после и до измельчения. Разработаны рекомендации по использованию результатов в энергетических приложениях.

В заключении сформулированы основные итоги диссертационных исследований, а также соответствующие выводы.

К диссертационной работе приложены: 1. Перечень основных публикаций; Приложение 2. Перечень научных мероприятий, на которых выполнена апробация результатов диссертационных исследований; Приложение 3. Акты об использовании результатов диссертационных исследований.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

В настоящее время технологии первичного измельчения капель жидких топлив основаны на применении форсуночных и спринклерных устройств [9,31]. Для распыления топлива используются, как правило, пневматические форсунки вследствие их относительной конструктивной и эксплуатационной простоты и надежности. В зависимости от вида топлива и топочного устройства форсунки должны обеспечивать заданную форму капельного факела (топливной струи), иметь определенный диапазон варьирования расхода жидкости и воздуха.

Наиболее перспективным (с точки зрения длительной и безотказной работы) решением принято считать форсунки на основе комбинированных каналов, по которым раздельно подаются топливо, вода и воздух [9,31]. Основной особенностью таких форсунок является интенсивное взаимодействие жидкого или композиционного топлива, истекающего из сопла, и возвратной газовой струи (типа кумулятивной). Благодаря эффекту Коанда [9] жидкость прилипает к стенкам диффузного сопла и растекается вдоль них тонкой струей. Однако этот процесс является неустойчивым. Высокоскоростная возвратная струя газа, внедряясь в жидкостную струю вдоль ее оси, нарушает целостность последней и заставляет жидкость равномерно распределяться тонкой струей по стенкам диффузора. При этом возвратная газовая струя после соударения с жидкостной изменяет свое направление на обратное, растекается вдоль стенок диффузора и ускоряет поток жидкости. Внутри конуса формируется тороидальный вихрь. В результате взаимодействия жидкостной струи и газового потока на выходе из диффузора образуется газокapельный поток. Определенная группа мелких фрагментов жидкости попадает в возвратную газовую струю. Увеличивается средняя плотность газового потока, и эффективность возвратной струи

варьировалось от 1 до 2 бар. В [33] определены диаметры капель топлив (от 0.1 мм до 0.6 мм) при давлении в 1 бар. В [33] показаны экологические и энергетические показатели сжигания дизельного топлива и растительного масла с применением специализированных добавок. Незученными остаются характеристики процессов вторичного измельчения капель топлива и струй в промышленных теплоэнергетических устройствах.

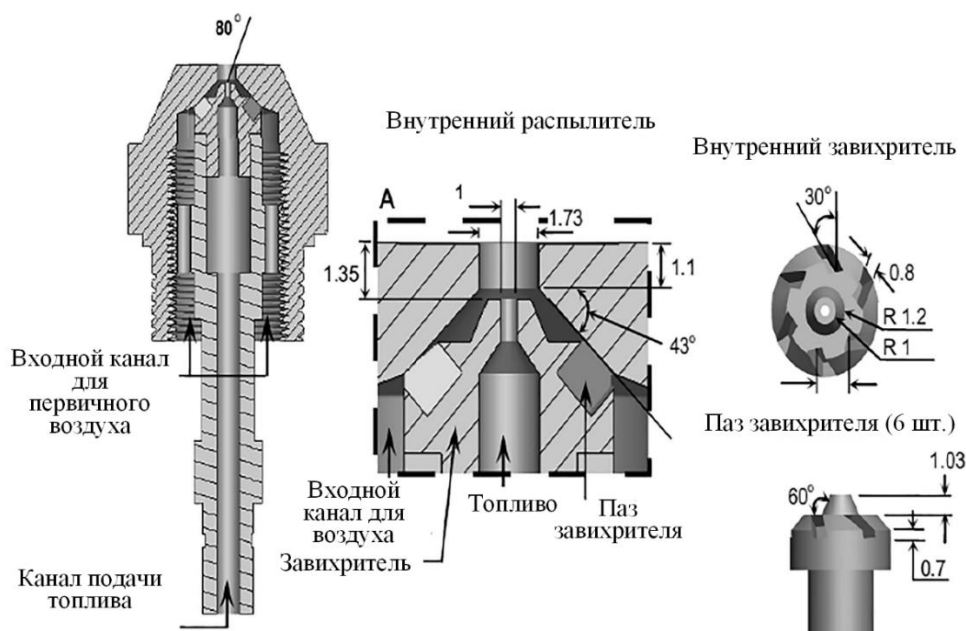


Рисунок 1.2. Схема горелки на жидком топливе (Giersch Enertech Group, Германия, модель: G1100) [33].

В [35] приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных с целью оптимизации процессов сжигания смесей мазута и хлопкового масла в котле. Разработана модель для изучения характеристик горения этого топлива в дизельном двигателе внутреннего сгорания. Сжигание происходило при помощи горелки DFO. Определена общая производительность горелки (тепловая мощность). Давление жидких топлив составляло от 6 до 25 бар. Установлено, что добавление примесей к топливу несет изменения химических и физических свойств жидкости, что приводит к необходимости специализированной настройки горелки. В [35] изучено влияние параметров сгорания от давления топлива. Обосновано, что с ростом давления увеличиваются выбросы SO_2 . Но в [35] не изучены характеристики

процесса распыления жидкого топлива, которые оказывают существенное влияние на условия горения и антропогенные выбросы.

В [36] изучены характеристики горения биодизеля и эмульсии рапсового масла. Сжигание происходило при помощи горелки, в которой основной поток воздуха закручивался и нагревался до 350 °С. Установлено, что капли, расположенные вокруг центральной области пламени, имеют меньшие размеры, чем внутри. Угол раскрытия струи варьировался от 42° до 56°. Скорость движения топливной струи изменялась от 6.74 м/с до 32.41 м/с. За счет этих параметров удавалось существенно менять интегральные характеристики процесса горения топлива.

В [37] исследовано влияние параметров распыления жидкого топлива на экологические показатели (CO и NO_x). Камера сгорания работала в режиме беспламенного горения керосина. Использовались различные типы вихревых сопел с твердым конусом. Размер отверстий варьировался от 0.187 мм до 0.41 мм, что позволяло изменять расход топлива при заданном давлении. Для создания вихревого потока воздух подавался по четырем тангенциальным каналам, что позволило создать зону низкого давления и обратный поток в камере сгорания. Измерение характеристик распыления проводилось при помощи теневой съемки частиц. В [37] приведены результаты численного моделирования с использованием камер сгорания конической формы, что показало усилить рециркуляцию продуктов сгорания за счет увеличения времени их пребывания в топке в отличие от цилиндрической. Установлено, что тангенциальный впрыск воздуха позволяет обеспечить более высокую рециркуляцию горячих продуктов сгорания в первичной зоне камеры сгорания. Так же обосновано, что чем выше давление топливной смеси, тем меньше размер капель, что приводит к улучшению рециркуляции и перемешиванию.

В [38] описаны типичные виды жидких топлив (дизельное топливо, сланцевое масло, мазут 40, мазут 100) и характеристик сжигания в котельных агрегатах. Рабочее давление таких топлив составляет от 0.7 до 3.5 МПа.

Размеры капель при таких давлениях варьировались от 15 до 25 мкм. Для промышленного использования мазута к нему добавляют жидкие присадки (ВНИИНП-102, ВНИИНП-106, Полифен), которые снижают вязкость и поверхностное натяжение. Дозировка присадок ВНИИНП составляет 2 кг на тонну мазута, температура контакта не должна быть менее 70 °С. Перед использованием мазута его нагревают: для механического распыления до температуры около 150 °С, для паромеханического – до 125 °С. При сжигании таких топлив разрежение в топке котла варьируется от 1 до 7 МПа. Варьирование характеристик топлива и воздуха связаны с типом используемой форсунки. В настоящее время в энергетике используются механические и с распыляющей средой форсуночные устройства. Механическое распыление осуществляется при подаче топлива под давление от 1 до 2 МПа через отверстие от 1 до 3 мм. Это обеспечивает дробление топлива на мелкие капли. В паровых и пневматических форсунках дробление топлива осуществляется за счет кинетической энергии пара или воздуха при воздействии на него механическим и паровым завихрителем. В ротационных форсуночных устройствах подача и дробление топлива реализуется за счет вращения стакана.

В [39] сравниваются характеристики горения биожидкости (смесь пальмового масла и биодизеля) и мазута с использованием печи мощностью 0.7 МВт и энергетического котла мощностью 75 МВт. Для испытаний в пилотной печи использовалась форсунка Y-образного струйного распыления с внешним перемешиванием и паром. На рис. 1.3 показано сопло совместно с вихревой горелкой.

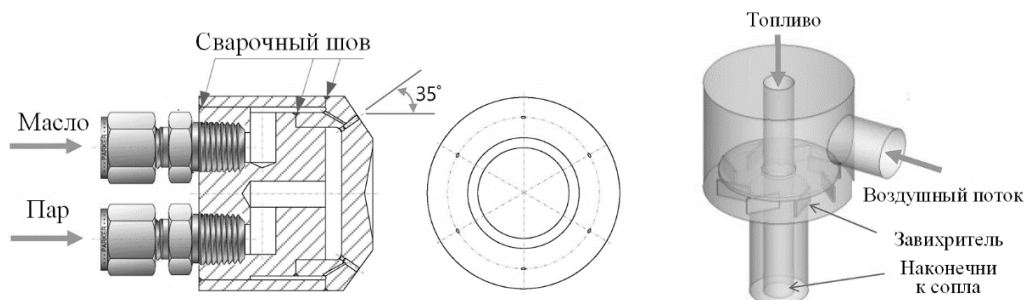


Рисунок 1.3. Схема сопла на жидком топливе и вихревой горелки [39].

Пар для распыления и топливо подводятся к соплу отдельно. Процесс смешения жидкого топлива и воздушной смеси происходит в шести специализированных отверстиях диаметром 0.9 мм. Определение характеристик распыления проводилось с использованием системы лазерного света Helos, SympatecGmbh. Давление пара при распылении составляло 5 кг/см². Печь для испытаний сжигания жидкого топлива состоит из основной топки, системы пода топлива и воздуха, системы очистки выхлопных газов (рис. 1.4).

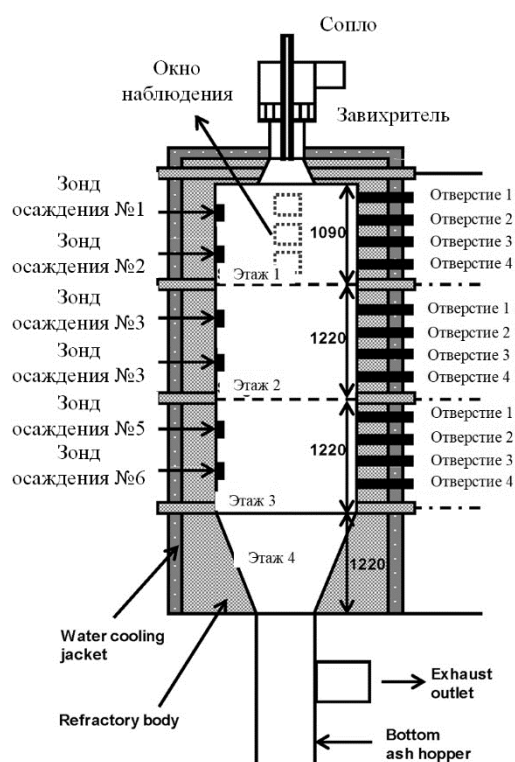


Рисунок 1.4. Внешний вид и схема экспериментальной печи [39].

Внутренний диаметр печи составляет 1500 мм, высота 4750 мм. Печь имеет цилиндрическую форму. Стенки изготовлены из огнеупорной стали с водяной рубашкой. Печь состоит из четырех ступеней, в которых сделаны отверстия для измерения температуры и концентрации газов. В верхней части печи устанавливалась тангенциальная горелка так, чтобы пламя расходилось вдоль оси печи. Наблюдения происходили с помощью трех смотровых окон. Дымовые газы поступали в воздухонагреватель и охладитель. В процессе горения давление в топке поддерживается в пределах

100–200 Па. Жидкое топливо подавалось при помощи масляного насоса. Завихритель горелки состоит из восьми лопаток, которые позволяют регулировать угол завихрения. Также такая горелка позволяла использовать угольные частицы с диаметром 60 мм, которые использовались для предварительного нагрева камеры сгорания до 1000 °С. В [39] использован промышленный котел для изучения характеристик горения жидкого топлива (рис. 1.5). Используемый котел имеет два уровня горелок для создания вихревого пламени. В верхней части расположены пластинчатый пароперегреватель и подогреватель.

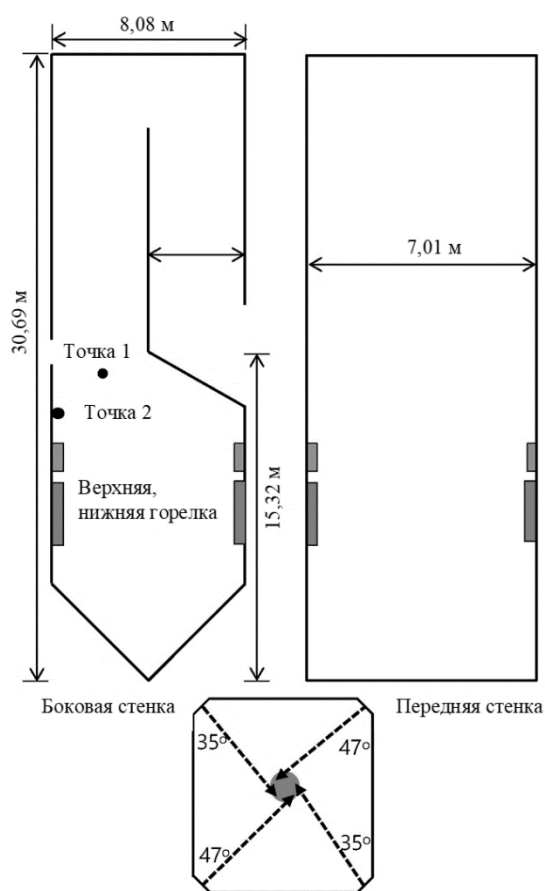


Рисунок 1.5. Схема котла мощностью 75 МВт [39].

В [39] обсуждены существенные отличия характеристик горения различного вида топлива. Зарегистрировано значительное снижение антропогенных выбросов по сравнению с углем. Остаются неизученными характеристики первичного и вторичного измельчения капель жидкого

топлива и влияния их на эффективность работы котельных агрегатов и характеристики антропогенных выбросов.

В [40] исследованы характеристики сжигания композиционного топлива на основе отходов углеобогащения в котельном агрегате РН-38. Для подачи топлива в котел использовалось форсуночное устройство, разработанное ИТ СО РАН совместно с ООО «ТеплоПром». Для подачи топлива использовался мембранный насос производительностью 75 л/мин. Такое же форсуночное устройство устанавливалось на котел КЕ 10/14. Давление в линии подачи топлива достигало 0.8 МПа. Проведенные испытания показали, что сжигание отходов углеобогащения имеет хорошую перспективу для их утилизации.

Таблица 1.1. Типичные характеристики распыления жидких и композиционных топлив в энергетических установках.

Источник	Используемые жидкости	Давление жидкости, бар	Размеры капель, мм	Скорости движения капель, м/с
[33]	Дизельное топливо, растительное масло	от 1 до 2	от 0.1 до 0.6	-
[35]	Мазут, хлопковое масло	от 6 до 25	-	-
[36]	Биодизель	-	-	от 6.74 до 32.41
[38]	Дизельное топливо, Сланцевое масло, Мазут 40, Мазут 100	От 7 до 35	-	От 80 до 300

В [41,42] приведены результаты экспериментальных исследований структуры потока водоугольного топлива в процессе его распыления в аэродинамическом имитаторе топки котла. Экспериментальная установка состояла из сопла, аэродинамического имитатора топки, насоса с

пневмоприводом, бака с распыляемым топливом, компрессора, резервуара для отработанного топлива, лазера, высокоскоростной видеокамеры, блока синхронизации и персонального компьютера. Распыление водоугольной суспензии осуществлялось с помощью сопла с внутренней смесительной камерой, расположенной в аэродинамическом имитаторе топки котла. Исследуемый топливный состав подавался насосом с пневмоприводом из резервного бака. В качестве распыляемого агента использовался воздух, нагнетаемый компрессором. Поток распыляемой смеси освещался световым пучком, создаваемым лазером. Фиксация структуры распылительного конуса и его компонентов в виде капель топлива осуществлялась высокоскоростной видеокамерой. Одновременная работа лазера и камеры обеспечивалась благодаря блоку синхронизации. Распыление композиционного топлива происходило при давлении 0.2 МПа, воздуха – при давлении 0.18 МПа. Размер частиц угля составлял 200 мкм. Камера расположена на расстоянии 0.5 м от оси распыляемого конуса. Установлено, что распылительный конус состоит из трех характерных зон: сердцевины потока, средней и внешней зон. Определено, что большая часть капель (80.8%) имела скорость движения до 8 м/с, около 20% капель имели скорость от 8 м/с до 34 м/с, и лишь 0.2% капель имели скорость в диапазоне от 34 м/с до 40.41 м/с. Установлены характерные стадии распада капель потока композиционного топлива.

В [43] изучены характеристики распыления композиционного топлива. Экспериментальный стенд состоял из системы подготовки и транспортировки композиционного топлива, системы подачи распыляемого воздуха, системы очистки воды, системы сбора пыли и измерительной системы. Из сопел разных диаметров распылялось композиционное топливо и воздух, пространство распыла подсвечивалось лазером, и высокоскоростная видеокамера фиксировала результат. С помощью специализированного программного обеспечения происходил анализ результатов. Установлено, что прямой тип сопла менее подвержен износу при распылении композиционного топлива, по мере увеличения расстояния

от кончика сопла медианный диаметр уменьшается, и равномерность распыления возрастает, с уменьшением медианного диаметра снижается вязкость топлива. Оптимизация размеров частиц угля в смеси снижает её вязкость и повышает равномерность распыления.

В [44] проанализировано влияние вязкоупругости на характеристики распыления композиционных топлив. Эксперимент заключался в видеорегистрации характеристик первичного и вторичного распыления. Первичное распыление – процесс, при котором цилиндрическая струя жидкости окружена коаксиальным кольцевым воздушным потоком, вторичное – процесс, при котором капля жидкости сталкивается с воздушной струей. Для проведения экспериментального исследования с первичным распылением использовалась установка, состоящая из компрессора, нагоняющего воздух, расходомера, измеряющего объёмный расход воздуха, распылителя, в который одновременно поступает и воздух, и топливо, резервуара, в который попадает жидкость после фиксации видеокамерой. При вторичном измельчении использовалась схема: капли топлива, падающие вертикально вниз, входят в поток воздуха, нагнетаемый компрессором и выходящий из перпендикулярно направленного к направлению падения капель сопла. Полученные результаты показывали, что вязкоупругость композиционного топлива оказывает большое влияние на структуру распыла, его длину и частотные характеристики.

Из проведенного анализа литературы по сжиганию жидких и композиционных топлив можно сделать вывод, что создана и эксплуатируется группа энергетических установок, позволяющих сжигать такие виды топлива. Для сжигания жидких и композиционных топлив необходима частичная модернизация топочных камер и форсуночных устройств. В частности, при сжигании композиционного топлива целесообразно использовать вихревую камеру сгорания. Остаются неизученными характеристики измельчения капель топливных композиций

после их распыления форсуночным устройством, что представляет в настоящее время особый интерес.

Дополнительное (нередко его называют многоступенчатым) измельчение капель топлив можно обеспечить за счет интенсификации разных механизмов. Наиболее часто применяются [32,45,46]: соударение с преградой (сетки, решетки, уступы, стенки, подложки, кольца и др.); столкновения капель между собой; их разгон до высоких скоростей и превышения критических (предельных) чисел Вебера (или наоборот, вход в воздушную струю); микро-взрывной распад или частичное диспергирование неоднородных капель при нагревании. Наименее затратной, с точки зрения энергетических и временных ресурсов, является интенсификация распада капель при соударениях между собой в струе топлива. В этом плане перспективной задачей является изучение основных характеристик таких соударений при использовании топлив с разными компонентными составами (на примере типичных суспензий, эмульсий, растворов, однородных составов). При этом целесообразно определить, насколько мелкие капли получаются при соударениях и какие связи имеются с группой определяющих факторов и параметров.

Для увеличения эффективности и интенсивности химического реагирования и фазовых превращений в различных технологиях используются разнообразные методики. Одной из наиболее дешевых и часто реализуемых является увеличение площади контактной поверхности реагентов и жидкостей. Такие методы особенно популярны в теплоэнергетических установках, двигателях внутреннего сгорания, установках термической очистки воды. Наибольшее распространение получили методы дробления струи жидкости при соударении со стенкой [27–29], при бинарных столкновениях капель, струй или аэрозольных потоков друг с другом [18,19,47] или с воздушным потоком [48–51]. В последнее время важным направлением является измельчение топливных эмульсий при

микро-взрывном дроблении капель [20,21,52,53]. Наибольшую актуальность данный метод имеет для двигателей внутреннего сгорания.

Ежегодно за счет применения развивающихся экспериментальных методик уточняются представления о тех или иных физических процессах, эффектах и явлениях. Аналогичное заключение можно сделать в области многофазных и многокомпонентных сред [54–62]. Ежегодно появляются новые знания не только о локальных эффектах, но и довольно часто выдвигаются гипотезы для развития ранних представлений в целом о комплексе процессов и сложных системах. Многие эффекты и процессы считаются сложно контролируемыми. К их числу относятся отскок, коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в газовых, газопарокапельных и паровых потоках. Целесообразно разработать модели, позволяющие достоверно прогнозировать характеристики этих процессов. Это позволит развить представления классической теории столкновений и слияния (коагуляции) капель [60–62], созданной на основе известных трудов Б.В. Дерягина, Л.Д. Ландау, Э. Фервея, Дж.Т. Овербека. При проведении соответствующих экспериментальных исследований станет возможным уточнить известные (из работ А.Г. Гирина, В.А. Архипова, В.П. Бушланова, И.М. Васенина, Ф.Г. Гапонича, А.М. Подвысоцкого, В.М. Трофимова, А.А. Шрайбера, Б.Н. Маслова, К.Ю. Арефьева, А.В. Воронцовского и др.) эмпирические и теоретические выражения (в основном опираются на интегральный параметр, представляющий математическое ожидание отношения изменения массы капли-мишени, возникающего в результате ее столкновения с каплями-снарядами, к общей массе последних) и обобщения (через критериальные выражения с использованием чисел Рейнольдса, Вебера и Лапласа) [45,63–66]. Известных результатов экспериментов по изучению столкновений капель жидкостей в газовых средах (например, [45,46,67]) недостаточно для описания последствий их взаимодействия.

В обзорной работе [68] обобщены имеющиеся данные о столкновениях капель топлив. Уделено особое внимание исследованию результатов

столкновения капель, а также вероятным исходам, среди которых выделялись отскок, коагуляция, разлет и дробление. Предпринята попытка связать существующие результаты с единым описанием поведения капель в момент столкновения и дальнейшего движения. Выдвинута гипотеза о том, что расхождение критических чисел We у группы авторов вызвано возникающими на поверхности капель эффектами и межфазными условиями. Наличие примесей на поверхности, рассмотренное в [69], в виде поверхностно-активных веществ оказывает существенное влияние на процесс столкновения капель. Соответствующие обоснования приведены в [47] при столкновении горящих капель топлива в диапазоне чисел Вебера от 1 до 40. Критическое число Вебера, установленное экспериментально, соответствовало диапазону $We=5-7$ для разных условий. Характеристики процесса столкновения таких капель существенно отличаются от известных данных о взаимодействии обычных жидкостных капель. В [47] обосновано, что это связано со снижением поверхностного натяжения жидкости вследствие нагрева капель.

Результаты экспериментальных исследований коагуляции и разлета капель после столкновения приведены в [70]. Для проведения экспериментальных исследований использовался стенд, состоявший из двух генераторов капель. Регистрация соударений проводилась при помощи высокоскоростной видеокамеры. Размеры капель варьировались от 0.5 до 2.5 мм. В [70] установлено влияние величины безразмерного отношения длины капли к ее ширине на реализацию режимов. Так, при разлете величина этого безразмерного параметра минимальна, а при коагуляции – максимальна. Полученные результаты полезны для развития технологий увеличения площади жидких фрагментов и увеличения эффективности сжигания топлив. Но в [70] не изучены режимы соударения капель и количество образованных фрагментов после процесса дробления.

В двигателях внутреннего сгорания капли топлива часто сталкиваются со стенками. В [71] экспериментально исследованы столкновения капель с

сухими и влажными стенками. Использовался подход, в котором рассматривался коэффициент реституции (CoR), характеризующий диссипацию энергии при ударе со стенкой. Он определялся как отношение скорости капли после отскока к начальной. Установлено, что с увеличением толщины слоя жидкости на стенке и ее вязкости CoR снижается. Зависимости CoR от поверхностного натяжения не установлены. Также выявлено, что CoR не зависит от угла удара частицы о стенку, если нормальная скорость постоянна. Из анализа [71] понятно, что не уделялось внимание режимам соударения капель, что является особо важным для теплоэнергетического оборудования, так как при режиме дробления можно добиться максимальной площади испарения фрагментов.

Столкновения капли бензина с различными типами подложек изучены в [72]. При столкновении капли с сухой металлической подложкой регистрировалось ее осаждение и растекание с формированием тонкой пленки жидкости. В дальнейшем при падении капле такая пленка может способствовать образованию коронообразных всплесков жидкости и формированию вторичных капель, провоцирующих более легкое зажигание топлива. Установлена зависимость высоты выброса капель от толщины пленки. Чем жидкостной слой тоньше, тем на большую высоту и меньшее время выбрасывались вторичные капли. Вязкость жидкости также имеет большое значение. При падении капли бензина на пленки силиконового масла различной толщины и вязкости разбрызгивание вторичных капель не зарегистрировано. Их количество зависело от содержания бензина в пленке, то есть имело накопительный характер.

Гидродинамика при падении капли воды на перегретые твердые горизонтальные поверхности изучена в [73]. Использовались различные типы смачиваемой поверхности: сверхгидрофильная, гидрофильная, гидрофобная и супергидрофобная. Экспериментальные исследования проведены при температурах подложки от 125 до 415 °С. Диапазон чисел Вебера в экспериментах составил 10–225. На увеличение времени контакта и

испарения капле определяющее влияние оказывал рост размера капле. Снижение скорости удара и температуры поверхности также влияли на время испарения, но в меньшей степени. Для капле размерами около 0.3 мм время контакта снижалось за счет увеличения скорости движения капле. Для капле больших размеров, например, 0.5–0.7 мм установлено критическое число Вебера, при котором капля дробилась на мелкие вторичные капли. Это также приводило к снижению времени испарения. Получены эмпирические зависимости, описывающие связь гидродинамических характеристик капли, падающей на нагретую поверхность, с числами Рейнольдса, Вебера и другими безразмерными параметрами.

Столкновения капли с жидкой пленкой при различной вязкости изучено в [74] с использованием метода Laser Induced Fluorescence. Установлена зависимость разбрызгивания капле топлива от числа Вебера: чем оно выше, тем сильнее происходит выброс вторичных капле и тем больше меняется морфология пленки. Высота выброса коронобразных брызг также увеличивается при повышении числа Вебера. Продолжительность выброса капле также прямо пропорциональна числу Вебера. Увеличение вязкости пленки снижало время выброса капле. Увеличение толщины пленки приводило к уменьшению высоты брызг и увеличению времени их существования. Безразмерный диаметр коронобразного всплеска уменьшается с увеличением вязкости и толщины жидкой пленки.

В [75] с помощью метода Planar Laser Induced Fluorescence исследованы характеристики разрушения пленки жидкости в парожидкостных сепараторах. В качестве флуорофора использован Rhodamine B. Диапазон чисел Рейнольдса в экспериментах составил 1800–4200. При обработке результатов установлена удельная высота разрыва пленки жидкости и распределения размеров капле. При сравнении с теоретической моделью дробления пленки жидкости расхождение результатов составило не более 15%. При маленьких и средних значениях

числа Рейнольдса ($Re < 2788$) расхождение теоретических и экспериментальных данных в определении средних размеров капель оказалось минимальным.

В [76] исследована зависимость характеристик аэрозоля дизельного топлива от высоты распыления форсуночными устройствами. Исследование проводилось с помощью высокоскоростной камеры. Использовался цилиндрический сосуд с постоянным объемом. Большая высота распыления топлива способствовала образованию топливного тумана у стенки камеры. На начальном этапе распыления холодные стенки оказывали охлаждающее действие на топливо, увеличивая время задержки зажигания. Выявлено осаждение сажи на стенке в нижней части камеры из-за низкотемпературного зажигания. При увеличении температуры образование сажи прекращалось. Однако в верхней части камеры сгорания установлено постоянное формирование слоя сажи при воспламенении топливовоздушной смеси. При большой высоте впрыска топлива зажигание происходило в центральной части цилиндра.

Также в рамках схем вторичного измельчения нередко на практике реализуется смешение нескольких жидкостных аэрозольных потоков путем пересечения под различными углами факелов распыла форсуночных устройств (с целью интенсификации столкновений капель). Интенсивность дробления капель при этом существенно зависит от угла атаки и чисел Вебера, а также от характеристик жидкости (вязкость, плотность, поверхностное натяжение). Основное внимание при этом уделяется определению условий роста числа мелких фрагментов за счет соударений исходных капель и влиянию вышеуказанных параметров [77,78].

Для снижения выбросов NO_x и CO_x часто используется смесь топлива с водой, например, в [79]. Исследован процесс дробления водо-дизельной смеси в поперечном воздушном потоке. Для распыления топлива использована форсунка с диаметром отверстия 0.5 мм, давление впрыска до 10 МПа. В качестве экспериментальных жидкостей использовались вода,

дизельное топливо и их смесь в различных пропорциях. Число Вебера в экспериментах изменялось от 30 до 125 для воды и от 92 до 382 для дизельного топлива при тех же условиях. Смешение двух жидкостей осуществлялось с помощью Т-образного соединения перед форсункой. Процесс распада изучался с помощью метода Planar Laser Induced Fluorescence с добавлением флуорофоров в дизельное топливо или воду. Выявлено разделение двух жидкостей после впрыска. Показано, что характеристики образовавшихся капель зависят от массовой доли веществ в смеси, и могут прогнозироваться в соответствии с полученными результатами.

Макроскопические характеристики впрыска дизельного топлива в камеру сгорания исследованы в [80]. Для определения границ распыляемой жидкости использован метод порогового удержания или бинаризации изображения. В [80] предложена методика выбора порогового значения бинаризации изображения по интенсивности пикселей изображения в окрестности границы распыления. Оценка точности данного метода проводилась с использованием симметричного распылителя с четко определенной геометрией. Использование нового метода [80] позволило идентифицировать аэрозольный поток с большей точностью. Расхождение составило около 0.5° от угла раскрытия факела, в то время как традиционные методики имеют погрешность $3\text{--}4^\circ$. Новый алгоритм определения порога бинаризации обеспечивает измерение макроскопических характеристик распыления с большей точностью.

В [81] для сжигания топлива предложено использовать схему измельчения капель за счет впрыска газового потока. Такой метод приводил к интенсификации фрагментации капель, но характеризовался значительным переизбытком газа (воздуха) в камере сгорания, что способствовало увеличению экономических затрат, а также росту концентрации образующегося диоксида азота. В [65] показано, что при высоких скоростях движения капельного потока происходит фрагментация капель за счет

преобладания сил трения и сопротивления над силами поверхностного натяжения. Такой способ измельчения капель является невыгодным, так как соответствующие камеры и теплообменники должны работать при высоком давлении, что приводит к увеличению затрат на оборудование и повышению износа. К тому же реальные технологические условия крайне сложно воспроизвести в экспериментах. Важно развитие моделей. Задачи моделирования бинарных столкновений капель решены в [82]. Большое внимание в [82] уделено газовому слою, заключенному между каплями при их столкновении и его влиянию на режимы взаимодействия. Полученные результаты подтверждены экспериментальными исследованиями. Установлено, что пики энергии поверхностного натяжения согласуются изменением геометрических размеров капель. Показано, что можно эффективно управлять режимами соударений капель жидкостей при варьировании интегральных характеристик в широких диапазонах.

Из анализа современного состояния исследований характеристик вторичного измельчения капель топлив можно сделать вывод, что в настоящее время возрастает интерес к комбинированию первичного и вторичного измельчения, что, в свою очередь, может привести к уменьшению экономических и временных характеристик, необходимых для формирования капельного аэрозоля требуемой дисперсности. Пока не проводился сравнительный анализ интегральных характеристик измельчения капель жидкостей с разным компонентным составом при применении наиболее перспективных схем вторичного дробления капель. Это, скорее всего, обусловлено тем, что физические причины измельчения при использовании вышеперечисленных подходов существенно отличаются, и пока не разработаны общие критерии их сопоставления. В первом приближении целесообразно сопоставить интегральные показатели измельчения через определение средних и максимальных размеров образующихся фрагментов жидкости, суммарной площади их поверхности или занимаемого суммарного объема. Затем требуется оценить количество

энергии, необходимой для получения идентичных значений этих параметров при применении каждой из схем вторичного дробления. Также перспективной задачей остается выбор комбинации нескольких методик вторичного измельчения для капель жидких и композиционных топлив с разными свойствами. Исходя из анализа результатов исследований можно сформулировать предположение о том, что для капель жидких и композиционных топлив наиболее перспективными будут схемы вторичного измельчения капель, базирующиеся на их контакте со стенками, соударении между собой и с натекающим потоком воздуха.

Выводы по первой главе

1. Процессы первичного и вторичного измельчения капель жидкого и композиционного топлива являются одними из определяющих в системах генерации и трансформации энергоносителей, а также в системах и установках, использующих тепловую энергию. Размеры капель в топочной камере определяют скорости теплообменных процессов, фазовых превращений и химического реагирования. Известные системы первичного измельчения капель высоковязких композиционных топлив не позволяют получать фрагменты, которые бы успевали эффективно прореагировать в топочных камерах.

2. Экспериментальные исследования процессов сжигания и измельчения капель высоковязких композиционных топлив до недавнего времени сдерживались отсутствием экспериментальных методик и материалов для создания форсуночных устройств. В настоящее время острой проблемой является утилизация отходов угольных и нефтяных производств. Эти отходы в составе суспензий повышают вязкость, что приводит к изменению характеристик измельчения капель.

3. Целесообразно реализовать вторичное измельчение капель жидких и композиционных топлив перед их сжиганием в промышленных теплоэнергетических установках для повышения площади испарения

полученных фрагментов, что способствует росту скоростей сжигания топлива и полноте выгорания.

4. Анализируя литературные данные, можно сделать вывод о том, что в настоящее время для сжигания в промышленном теплоэнергетическом оборудовании используются дизельное топливо, мазут, органические масла и сланцевое масло с давлением в тракте топливо подачи от 1 до 25 бар и диаметрами от 0.1 до 0.6 мм. Для этих входных параметров целесообразно, в первую очередь, предусмотреть реализацию дополнительного измельчения капель за счет комбинированных методик.

5. В настоящее время отсутствует экспериментальная база интегральных характеристик вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив для наиболее перспективных схем измельчения: соударения между собой и с твердой поверхностью, измельчение капельной струи путем воздействия газовым потоком и комбинация таких схем. Целесообразным является изучение процессов измельчения и характеристик вторичных фрагментов на примере бинарных соударений и при взаимодействии струй топлив.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Современные методики исследования характеристик вторичного измельчения капель жидкости

В промышленных теплоэнергетических устройствах используются форсуночные устройства для первичного измельчения жидкостей и композиционных топлив. Такие устройства описаны в главе 1. Вторичное же измельчение реализуется вследствие фрагментации капель в воздушном потоке. В лабораторных условиях не представляется возможным изучение процессов распыления жидких и композиционных топлив в промышленных теплопередающих и теплоиспользующих системах, так как такие установки имеют значительные габариты и при сжигании в них образуются высокие концентрации продуктов сгорания, температуры и давления. Целесообразно проводить исследования бинарных соударений капель композиционных топлив и аэрозолей с применением стендов, которые бы по основным условиям коррелировали с энергетическими установками.

Для проектирования стендов с комбинированными схемами вторичного измельчения капель жидкостей целесообразно изучить опыт мирового научного сообщества с точки зрения типовых стендов и схем регистрации. Например, в [83] экспериментальная установка для изучения характеристик распыления состояла из распылителей воды, плунжерного насоса, мощность которого контролировалась цифровым преобразователем SV-IG5, расходомера TM0038X, цифрового манометра ECO-1 KELLER. Форсунки, используемые в экспериментах, имели круглое отверстие диаметром 400 мкм. Скорости и размеры капель измерялись с помощью системы DualPD. Эта система состояла из лазера, передатчика и приемника, полосового фильтра и процессора сигналов. Процессы распыления жидкостей так же изучались в [23]. Экспериментальная установка состояла из распылительной камеры высокого давления, генератора капель жидкости,

газового сопла, источника света, микроскопа и камеры. Система микроскопической аэрозольной визуализации состояла из высокоинтенсивного источника света и камеры, оснащенной микроскопом Questar QM-100.

В [71,84–86] исследовались процессы дробления капель жидкостей о твердую поверхность. Изучались характеристики фрагментов жидкости (дистиллированная и деионизированная вода), образующихся при попадании исходных капель на разные твердые поверхности. Твердые поверхности, применяемые в данных исследованиях, имели разные теплофизические свойства и степень шероховатости, а также нагревались до различных температур. Также изучалось влияние угла атаки, скорости движения капель жидкости, ее параметров (вязкость, поверхностное натяжение, плотность) на последствия и условия взаимодействия с твердой поверхностью.

В [87] изучалась деформация капель этилового спирта, впрыскиваемых в непрерывную воздушную струю. Капли создавались с использованием генератора. Для нагнетания воздушного потока использовались сопло и компрессор. Поле скорости окружающего воздушного потока измерялось с помощью PIV.

Процессы микро-взрыва изучались в [88,89]. В данных исследованиях рассматривались процессы измельчения и воспламенения капель биодизеля и этанола в результате интенсивного нагрева. Последний реализовывался в муфельных печах при их свободном падении, что позволяло исключить влияние держателя или подложки на характер разрушения капли.

При дроблении капель жидкости за счет удара о твердую поверхность, как правило, используют подложку из нержавеющей стали или алюминия [16,17]. В [16] капли жидкости генерировались при помощи иглы G33 (диаметр капель около 2 мм). Регистрация процесса соударения капель с подложкой и скорость их движения осуществлялось при помощи высокоскоростной видеосъемки. Варьирование скорости движения (0.5 до 4 м/с) осуществлялась за счет изменения высоты сброса капли до 1 м. В [17]

измельчение капли происходило за счет соударения о нагретую подложку из шлифованного алюминия. Температура подложки составляла 450 °С.

Для соударения капель между собой разработаны экспериментальные стенды [18,19]. В [18] жидкость из резервуара перекачивалась через трубки и подавалась в сопла с внутренним диаметром 0.85 мм и длиной 25.4 мм. Угол атаки между струями жидкостями составлял 78°. Скорость движения капель варьировалась от 1 до 6 м/с, за счет изменения скорости насоса. Для регистрации процесса соударения капель использовалась высокоскоростная фотосъемка. Источником света служила ксеноновая лампа. В [19] для реализации бинарных столкновений жидких капель использовались два генератора, производящие непрерывный капельный поток с размерами капель от 150 до 250 мкм. Скорости и размеры капель определялись сверхбыстрой съемкой, которая синхронизировалась с генераторами капель. В [18,19] установлены режимы соударения капель разновязкостных жидкостей.

В [22,23] показаны характеристики измельчения капель за счет воздействия воздушным потоком. Для воздействия на жидкостный поток капель в [22] разработан стенд, состоящий из горизонтального круглого сопла. В сопло подавался воздух из воздухоудовки Рутса, которая позволяла создавать непрерывный и равномерный воздушный поток. Скорость воздушного потока регулировалась с помощью высокоточного ротаметра. Генератор капель представлял собой цилиндрическую жидкостную камеру, которая формировала непрерывный вертикальный поток капель жидкости. Сопло для генерации капель модифицировалось сужающей секцией, что позволяло сделать профиль скорости плоским и однородным, сводя к минимуму влияние пограничного слоя. В [23] генератор капель и газовое сопло располагались под углом около 90° друг к другу. Экспериментальная установка состояла из распылительной камеры высокого давления, генератора капель жидкости, газового сопла, источника света и высокоскоростной камеры. Воздушное сопло имело круглую форму

диаметром 1.5 мм. Длина канала сопла составляла около 5 мм и имела закругленный вход с радиусом 5 мм, для минимизации влияния пограничного слоя на выходе сопла. Это приводило к тому, что капли, входящие в воздушный поток, подвергались воздействию высокой относительной скорости. Расход воздуха контролировался ротаметром. Для поддержания постоянного перепада между давлением впрыска топлива и противодавлением в распылительной камере использовалась комбинация обратных и продувочных клапанов.

В [85] капли воды генерировались с помощью иглы и сбрасывались на нагретую полированную алюминиевую поверхность. Соударения капель регистрировались с помощью высокоскоростной CMOS-камеры (Mikrotron MC1310), оснащенной объективом 18–108/2.5 (Navitar Zoom 7000), с разрешением 576×576 пикселей. Камера располагалась горизонтально с ударной поверхностью для точного измерения высоты отскока капли.

Капли воды генерировались с помощью специализированного наконечника и падали на полированную алюминиевую поверхность [86]. Поверхность была тщательно отполирована [86]. Дистиллированная вода подавалась в верхнюю часть соплового блока, оснащенного генератором. Вода вытекала вертикально вниз на вращающийся диск диаметром 200 мм. Скорость вращения была отрегулирована таким образом, чтобы во время каждого вращения диска через щелевое отверстие проходило не более одной капли. Оптический датчик фиксировал положение щелевого отверстия во вращающемся диске и генерировал сигнал для запуска съемки со вспышкой. Горизонтальный образец был закреплен на медной основе со встроенным картриджным электронагревателем. Образец полировали перед каждым экспериментом [86]. Для наблюдения столкновения между каплями и поверхностью использовали две камеры. Одна камера фиксировала взаимодействие сбоку, другая камера – сверху [86].

Для регистрации характеристик процессов вторичного измельчения использовались высокоскоростные видеокамеры и прожекторы для

подсветки областей регистрации. В отличие от перечисленных выше исследований, где исследовалась только одна из методик вторичного измельчения капель, в настоящей работе с целью интенсификации процесса измельчения использовались стенды, позволяющие реализовывать несколько схем взаимодействия капель. На рис. 2.1 приведены типичные схемы вторичного измельчения капель.

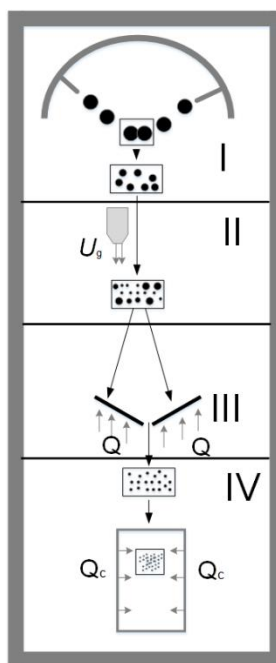


Рисунок 2.1. Схемы комбинирования методик вторичного измельчения [90]:
 I – соударение капель между собой; II – воздействие воздушным потоком; III – соударение о твердую поверхность; IV – микро-взрывное измельчение.

2.2. Экспериментальный стенд и методика исследования процессов вторичного измельчения капель жидкости

Для определения характеристик вторичного измельчения капель жидкостей и композиционных топлив использовался стенд, схема которого приведена на рис. 2.2а. Схема измельчения капель жидкости представлена на рис. 2.2б. В стенде можно выделить несколько характерных узлов: генераторы капель жидкости, зона измельчения и регистрирующее оборудование. Для генерации капель использовались сменные сопла 7 (длина составляла 19 мм), которые позволяли варьировать размеры от 0.1 до 1.1 мм.

Для подачи жидкости использовались погружные насосы JT-500 DC (производительность 600 л/ч, высота подъёма 5 м, питание 12 В 1.2 А). Для регулирования производительности каждый насос подключался к регулятору напряжения XY-ZT, DC-DC 4.5 В – 35 В. Это позволяло варьировать скорость капель от 0.5 до 10 м/с. Для исследования измельчения капель о твердую поверхность в стенд устанавливались металлические подложки, выполненные из меди, алюминия и стали. Поверхность подложки обладала классами шероховатости 14 ($R_a=0.008\text{--}0.01$ мкм; $R_z=0.05\text{--}0.25$ мкм), 6 ($R_a=1.25\text{--}2.5$ мкм; $R_z=6.3\text{--}10$ мкм), 3 ($R_a=10\text{--}20$ мкм; $R_z=40\text{--}80$ мкм). Также в качестве подложки использовались стекло и металлическая сетка (с размером ячейки 1×1 мм). Изучалось влияние гидрофобности покрытия. Для этого медная пластина покрывалась парафином и масляной пленкой. Исследовалось влияние температуры поверхности на процесс диспергирования капли. Для этого медная пластина нагревалась до температур 50 °С, 100 °С, 180 °С. Нагрев осуществлялся с помощью лабораторных автотрансформаторов SUNTEK 10000BA 0-3000 В (40 А). Температура нагрева измерялась пирометром Testo 835-T2 с погрешностью 0.1 °С. Для создания высокотемпературной зоны нагрева капель композиционных топлив использовалась трубчатая муфельная печь (3) NaberthemR 50/250/13 (максимальная возможная температура 1300 °С). Контроль температуры проводился при помощи термопары типа S (платинородий-платиновая; максимальная температура 1350 °С, предел допускаемых отклонений ± 1 °С).

Процессы вторичного измельчения капель регистрировались высокоскоростной видеокамерой Fastcam mini UX, предназначенной для использования в широком спектре научных и промышленных приложений (разрешение изображения 1.3 мегапикселя при 1280×1024 пикселей, частотой съемки до 4000 кадров в секунду, объём памяти 32 ГБ). Fastcam mini UX отличается прочной конструкцией, подходящей для работы в условиях сильных ударов и вибрации, и компактным корпусом камеры ($120\times 120\times 93$

мм). Камера оснащена интерфейсом Gigabit Ethernet для надежного управления системой с высокоскоростной передачей данных на ПК. С помощью программного обеспечения Photron Fastcam Viewer определялась скорость движения (U_d), размер (R_d) и угол атаки (α_d).

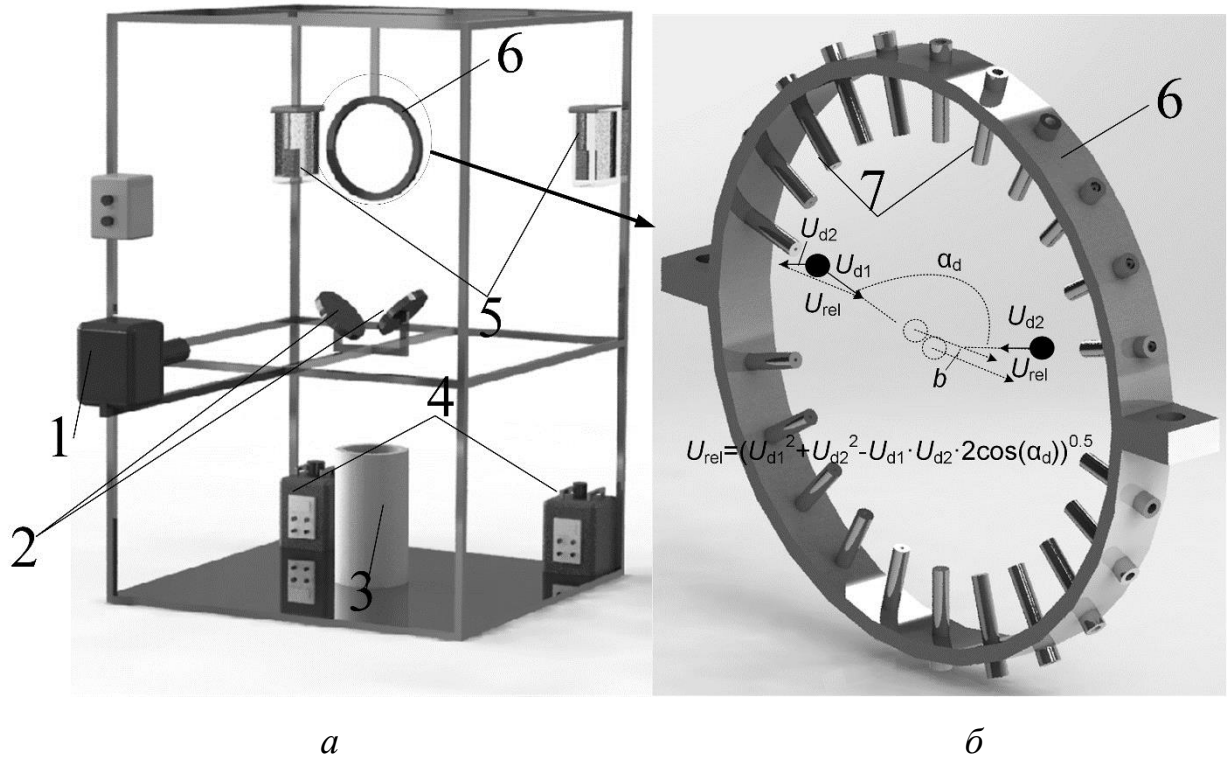


Рисунок 2.2. Схема стенда (а) и регистрации соударения капель (б): 1 – высокосортная видеокамера; 2 – металлические подложки; 3 – муфельная печь; 4 – лабораторные автотрансформаторы; 5 – емкости; 6 – кольцевой держатель сопел; 7 – сопла.

Для обработки полученных видеogramм использовались программные комплексы Tema Automotive и FastCam, которые позволяли проводить анализ координат положения, форм капель, их скоростей, ускорений, углов, пройденных расстояний и прочих параметров при их изменении в широком диапазоне значений с высокой дискретизацией во времени. Для измерения скоростей движения капель воды U_d и воздушного потока U_g применялся метод Particle Image Velocimetry [46,91]. Скорости перемещения воздуха в области регистрации определялись до вдува распыленной жидкости.

Трассирующие частицы (нанопорошок диоксида титана 80–100 нм) вводились в воздушный поток в нижней части области регистрации. Регистрировались мгновенные распределения скоростей трассеров в потоке газов между импульсами лазера. Алгоритм определения мгновенных распределений скоростей методом Particle Image Velocimetry базировался на контроле расстояний, пройденных трассерами за фиксированный временной интервал между вспышками лазера. Кросскорреляционной камерой фиксировалась пара кадров. Каждая из видеogramм разбивалась на элементарные расчетные области. При использовании преобразований Фурье находился максимум корреляционной функции, которая и определяла перемещение трассеров. При помощи масштабного коэффициента (определенного на начальном этапе экспериментов в момент калибровки оптической системы) и известной временной задержке рассчитывалась скорость. При регистрации скоростей движения аэрозоля в качестве трассеров использовались капли жидкости.

Регистрация траектории и скорости движения каждой капли выполнялась методом Particle Tracking Velocimetry по аналогии с опытами [46,91]. Данный метод является развитием Particle Image Velocimetry и предназначен для вычисления мгновенных двухкомпонентных полей скорости трассирующих частиц в потоке газа или жидкости. В отличие от Particle Image Velocimetry в Particle Tracking Velocimetry вектор скорости измеряется по перемещениям отдельных трассеров в потоке. Измеренное векторное поле имеет разрешение больше, чем в методе Particle Image Velocimetry, а векторная сетка является нерегулярной – с узлами в точках положения трассеров. С применением метода Particle Tracking Velocimetry можно обеспечить достоверный контроль скорости и траекторий движения различных маркированных элементов многофазных и многокомпонентных сред, а также фиксировать скорости и траектории движения фрагментов жидкости при столкновениях капель.

Размеры (средние радиусы) капель определялись с применением методов Interferometric Particle Imaging и Shadow Photography [46,91]. Применение этих двух методов обусловлено тем, что Interferometric Particle Imaging позволяет выполнять достоверные измерения для сферических тел. При применении для капель в форме эллипсоида, жидкого диска и парашюта метод Interferometric Particle Imaging давал большую (в несколько раз возрастала относительно сферических объектов) погрешность, поэтому применялся метод Shadow Photography. Методика вычислений размеров капель методом Interferometric Particle Imaging основана на различии коэффициентов преломления воздушной и водной сред. При определении размеров осуществлялась регистрация образов капель предварительно откалиброванной и специальным образом расфокусированной кросскорреляционной камерой (с применением диафрагмы). Осуществлялась подсветка капель лазерным ножом. В результате на видеограммах воспроизводятся образы капель, представляющие собой узкие участки с набором интерференционных полос и являющиеся отраженным и однократно преломленным каплями светом. Далее по числу интерференционных полос при помощи специальных алгоритмов [27,28] осуществлялось вычисление размера каждой капли в регистрационной области. Это позволяло получить мгновенное распределение размеров капель жидкости. В методе Shadow Photography применялся диффузный экран, позволяющий получить контрастное теневое изображение капель. С учетом масштабного коэффициента, полученного на этапе калибровки измерительной системы, определялись средние размеры капель несферической формы (усреднение выполнялось с учетом четырех измерений максимальных размеров для каждой из капель).

Алгоритмы определения скоростей движения и размеров капель после их коагуляции аналогичны представленным выше. Систематические погрешности определения размеров R_d и скоростей U_g и U_d с применением панорамных оптических методов, а также соответствующего

видеорегистрирующего стенда не превышали 1.6 и 2.1%. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых параметров составили: R_d – 2.1%, U_g и U_d – 3.4%. Также при обработке видеogramм экспериментов определялись углы пересечения траекторий движения капель в момент их столкновения α_d с использованием специализированного программного обеспечения Tema Automotive и параметрической сетки на видеogramмах. Систематическая погрешность регистрации α_d не превышала 2.3%.

С использованием пакетов Mathematica и Matlab выполнялась фильтрация и сжатие кадров видеogramм со столкновениями капель. В результате данной процедуры удавалось из 10–20 тысяч кадров выделить 200–400, на которых регистрировалось сближение капель (создан специализированный программный код фильтрации кадров по контрастности, размерам, концентрациям, скоростям, траекториям движения капель).

По измеренным параметрам рассчитывались характеристики вторичного измельчения, схема взаимодействия капель приведена на рис. 2.3.

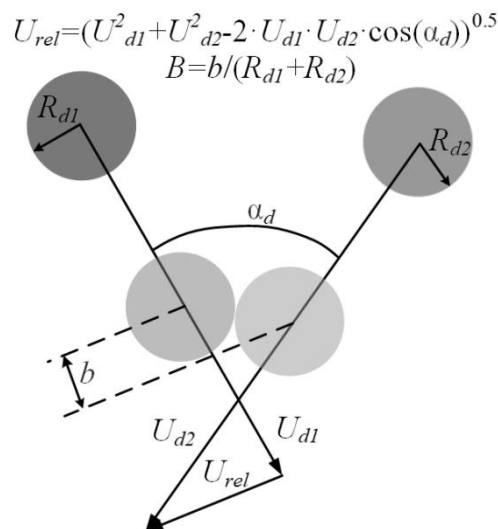


Рисунок 2.3. Схема регистрации параметров соударения [92].

При изучении исходов столкновения капель рассчитывалась результирующая скорость их взаимодействия:

$$U_{\text{rel}} = (U_{d1}^2 + U_{d2}^2 - 2 \cdot U_{d1} \cdot U_{d2} \cdot \cos(\alpha_d))^{1/2}. \quad (2.1)$$

Параметр b – расстояние между центрами капель с учетом проекции на вектор результирующей скорости. Рассчитывались значения линейного (B) и углового (β) параметров взаимодействия:

$$B = b / (R_{d1} + R_{d2}), \quad (2.2)$$

$$\beta = \cos(\alpha_d). \quad (2.3)$$

Для измерения размеров капель R_d проводилась серия опытов и определялся средний радиус. Такой подход использовался для минимизации случайной ошибки и учета возможных деформаций капель при их движении в газовой среде.

Для построения режимных карт вычислялись безразмерные критерии подобия:

число Вебера

$$We = 2 \cdot \rho \cdot R_{d1} \cdot U_{\text{rel}}^2 / \sigma; \quad (2.4)$$

число Онезорге

$$Oh = \mu / (\rho \cdot \sigma \cdot 2 \cdot R_d \cdot 10^{-3})^{0.5}; \quad (2.5)$$

число Рейнольдса

$$Re = (\rho \cdot 2 R_d \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{rel}}) / \mu; \quad (2.6)$$

число капиллярности

$$Ca = \mu \cdot U_{\text{rel}} / \sigma. \quad (2.7)$$

По полученным параметрам строились карты режимов (отскока, разлета, дробления и коагуляции) в системе координат $B(We)$, $\beta(We)$, $We(Oh)$, $Re(Oh)$, $We(Ca)$. При построении карт режимов взаимодействия выделялись четыре режима столкновения капель: отскок, коагуляция, разлет и дробление. Отскок характеризовался упругим соударением и последующим разлетом капель. Поверхностная оболочка капель при отскоке не нарушалась, новые капли не образовались. При коагуляции капель поверхностная оболочка в месте столкновения разрушалась, и две исходные капли объединялись в одну. В случае слияния капель и их последующего разделения без образования новых капель регистрировался режим разлета. В

случае образования нескольких вторичных фрагментов ($N_{ti} > 2$) после столкновения исходных регистрировался режим дробления. При этом установлены два типа дробления: с образованием жидкого диска и с формированием цепочки вторичных фрагментов.

Расчет средней квадратичной погрешности измерений размеров, скоростей движения, количества вторичных капель и средних интенсивностей светимости осуществлялся по формуле:

$$^nS = (\sum_{i=1}^n (R_{av} - R_i)^2)^{0.5} / (n-1). \quad (2.8)$$

После этого с применением правила трех сигм отсеивались грубые ошибки. Среднеквадратичная погрешность результата серии измерений определялась по формуле:

$$^nS_x = ^nS / n^{0.5}. \quad (2.9)$$

Доверительный интервал (абсолютная погрешность серии измерений) определялся по формуле:

$$\Delta R_d = ^nS_x \cdot t(\alpha, n). \quad (2.10)$$

По такой же схеме проводился расчет погрешностей углов столкновения и пути, который проходила капля за некоторый промежуток времени. Основной причиной возникновения погрешностей являлось отклонение формы капель от сферичной из-за деформации их поверхности движения в газовой среде. К косвенным погрешностям при обработке экспериментов относилась погрешность определения скорости движения капли и слоев жидкости. Изменялся путь, пройденный каплей, а время движения равнялось:

$$t = n_f / \text{fps}. \quad (2.11)$$

Скорость движения является функцией одной переменной:

$$U = f(L). \quad (2.12)$$

Погрешность измерения скорости движения капель вычислялась по формуле:

$$\Delta U = \Delta L / t + L \cdot \Delta t / t^2. \quad (2.13)$$

Относительная погрешность серии косвенных измерений определялась с помощью выражения:

$$\delta U = \Delta U / U_{av}. \quad (2.14)$$

Для определения эффективности вторичного измельчения капель при их соударениях использовалось отношение площади свободной поверхности образованных жидкостных фрагментов и начальных капель. Для этого регистрировались радиусы (r_d) всех видимых (т.е. в области видеорегистрации) вторичных фрагментов и их количество N_{ti} . Проводился расчет объема двух капель до взаимодействия:

$$V_0 = 4 \cdot \pi \cdot (R_{d1}^3 + R_{d2}^3) / 3 \quad (2.15)$$

и суммарный объем образованных капель после взаимодействия:

$$V_1 = 4 \cdot \pi \cdot \sum r_{di}^3 / 3. \quad (2.16)$$

Далее количество образованных фрагментов пропорционально увеличивалось до обеспечения равенства объемов капель до и после соударений ($V_0 = V_{ch}$), что позволило учесть вторичные капли, находящиеся вне области регистрации. Вычислялось значение площади свободной поверхности образованных вторичных фрагментов:

$$S_1 = 4 \cdot \pi \cdot \sum r_{di}^2 \quad (2.17)$$

и площади свободной поверхности исходных капель до взаимодействия:

$$S_0 = 4 \cdot \pi \cdot (R_{d1}^2 + R_{d2}^2). \quad (2.18)$$

При соударении двух капель кинетическая энергия до их взаимодействия являлась суммой начальных энергий двух капель:

$$E_{dr} = (m_{d1} + m_{d2}) \cdot U_{rel}^2 / 2, \quad (2.19)$$

где масса капель m_{d1} и m_{d2} вычислялась, как:

$$m_{d1} = \rho \cdot V_{d1}, \quad (2.20)$$

$$m_{d2} = \rho \cdot V_{d2}. \quad (2.21)$$

Аналогично вычислялась кинетическая энергия вторичных фрагментов:

$$E_{ch} = \sum N \cdot m_{ch} \cdot U_{ch}^2 / 2, \quad (2.22)$$

где для вычисления массы использовался средний радиус вторичных капель.

При разрушении капли по схеме с соударением с твердой поверхностью и воздушным потоком расчет кинетических энергий включает в себя только одну исходную каплю:

$$E_{dr}=m_{d1} \cdot U_{rel}^2/2. \quad (2.23)$$

Расчет кинетической энергии вторичных фрагментов аналогичен схеме измельчения при соударении капель между собой.

Выполнены оценки тепловыделения (условной тепловой мощности) при горении капель исследованных жидкостей (для группы топлив). Тепловая мощность до взаимодействия капель определялась с применением выражения:

$$P_0=W_b \cdot S_0 \cdot Q_c. \quad (2.24)$$

Мощность тепловыделения при горении вторичных капель определялась с учетом их суммарной площади поверхности:

$$P_1=W_b \cdot S_1 \cdot Q_c. \quad (2.25)$$

Для негорючих жидкостей рассчитывалась тепловая мощность, т.е. поглощение теплоты на парообразование с учетом скорости испарения:

$$P_0=W_i \cdot S_0 \cdot Q_i. \quad (2.26)$$

Относительный прирост тепловой мощности можно определялся как разность P_1 и P_0 или отношения этих значений. При использовании второго подхода имеем:

$$P_1/P_0=S_1/S_0, \quad (2.27)$$

т.е. отношение площадей свободной поверхности жидкости до и после разрушения капель определяет интегральный параметр. Основная особенность технологий вторичного измельчения капель жидкостей состоит в существенном увеличении площади поверхности жидкости для интенсификации испарения воды (например, при выпаривании примесей, использовании газопарокапельных теплоносителей, использование в промышленных теплоэнергетических устройствах) и выгорания топлив.

Следует отметить, что при проведении статистического анализа характеристик взаимодействия капель воды в составе аэрозоля,

смешивающегося со встречным газовым потоком, использовалась методика расчета числа столкновений с одним из трех вариантов последствий к общему числу столкновений. В таком случае вычислялись значения относительных вероятностей коагуляции, разлета и дробления капель: P_1 , P_2 , P_3 , соответственно. При анализе влияния группы основных факторов на значения P_1 , P_2 , P_3 рассматривалось не менее 50 столкновений капель при идентичных условиях. Всего изучено более 1000 взаимодействий капель для обеспечения удовлетворительной статистики.

2.3. Свойства исследованных топлив

Для учета влияния вязкости и поверхностного натяжения жидкости использовались растворы с различными значениями поверхностного натяжения, плотности и вязкости. Свойства составов приведены в таблице 2.1. Реологические свойства составов измерялись с помощью вискозиметра Brookfield DV3T LV при комнатной температуре жидкости (20–23 °C). В стандартный набор вискозиметра входит 4 шпинделя для измерения разновязкостных жидкостей ($\mu=0.001\text{--}6000$ Па·с), скорость вращения шпинделей варьируется в диапазоне 10–250 об/мин [93]. Погрешность измерений в соответствии с ГОСТ Р 53708-2009 [94] составила $\pm 1\%$.

Для измерения вязкости жидкости приготовленный состав помещался в специализированный цилиндр, который устанавливался в вискозиметр. Для каждого состава выбирался шпиндель. Для низковязких жидкостей использовался наибольший шпиндель, для высоковязких – наименьший. Регистрация параметров проводилась в программном обеспечении RheocalcT. Данная программа обеспечивает автоматическое управление и сбор данных. Также имеется возможность создания математических моделей [95]: Bingham, Casson, Casson NCA/CMA, Power Law, IPC Paste, Herschel-Bulkley, Thix Index.

Измерение поверхностного натяжения жидкостей проводилось методом отрыва кольца (метод дю Нуи) [96] с помощью тензиометра К6 фирмы KRUSS при температуре 20 °С. Калибровка прибора осуществлялась с помощью измерения поверхностного натяжения бидистиллированной воды (поправочный коэффициент равен 0.995).

Из анализа результатов исследований, приведенных в главе 1, сделан вывод о том, что наиболее широко используемыми жидкими топливами в промышленных теплоэнергетических установках и системах являются (табл. 1.1): мазут, дизель, отработанные масла, угольные суспензии. В лабораторных условиях проведение исследований с такими составами не возможны, так как при нагреве последних выделяются летучие газы, которые задымляют помещение и являются пожароопасными. В связи с этим для исследований разработаны растворы, эмульсии и суспензии со свойствами, близкими к типичным топливам промышленных тепловых установок. Измеренные значения поверхностного натяжения представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Свойства использованных в экспериментах жидкостных составов.

№	Наименование состава	Начальная температура T , °С	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м	Динамическая вязкость μ , Па·с
1	Вода	20/80	998/965	0.07269 / 0.06259	0.001 / 0.00036
2	Раствор глицерина (25 об%)	20	1060	0.06937	0.002239
3	Раствор глицерина (50 об%)	20	1126	0.066	0.006301
4	99.5 об% вода, 0.5 об% Твин-80	20	998	0.0474	0.001
5	49.5 об% вода, 0.5 об% Твин-80, 50 об% глицерина	20	1126	0.0474	0.006301

6	74.5 об% вода, 0.5 об% Твин-80, 25 об% глицерина	20	1060	0.0474	0.002239
7	Угольная суспензия (5 мас% Бурый уголь)	20/80	1030/997	0.07269 / 0.06259	0.0011 / 0.00046
8	Угольная суспензия (15 мас% Бурый уголь)	20/80	1063/1033	0.14538 / 0.12518	0.0023 / 0.000603
9	Угольная суспензия (30 мас% Бурый уголь)	20/80	1126/1096	0.2472 / 0.200288	0.00329 / 0.000846
10	ОВУТ (10 мас% Бурый уголь, 10 мас% трансформаторное масло)	20	995.9	0.09462	0.0034
11	ВУТ (10 мас% Бурый уголь)	20	1046.5	0.10903	0.0017
12	Эмульсия трансформаторное масло (15 об%)	20/80	980.345 / 947.735	0.06473 / 0.054505	0.004162 / 0.000768
13	Эмульсия трансформаторное масло (30 об%)	20/80	962.69 / 930.47	0.056763 / 0.04642	0.006923 / 0.001176
14	Эмульсия трансформаторное масло (50 об%)	20/80	939.15 / 907.45	0.046145 / 0.03564	0.01065 / 0.00172
15	Эмульсия трансформаторное масло (70 об%)	20/80	915.61 / 884.43	0.0355527 / 0.02486	0.014287 / 0.002264
16	Трансформаторное масло	20/80	880.3 / 849.9	0.0196 / 0.00869	0.01981 / 0.00308
18	Бурый уголь 15 мас%+ Касторовое масло 15 мас%	20/80	982.445 / 953.885	0.119244 / 0.101448	0.004788 / 0.000912
19	Бурый уголь 30 мас%+ Касторовое масло 25 мас%	20/80	1064.575 / 1034.475	0.1903 / 0.152389	0.007175 / 0.001304
20	Касторовое масло	20/80	960 / 910	0.0354 / 0.0177	0.949 / 0.049
21	Эмульсия касторовое	20/80	986.6 / 948.5	0.061503 /	0.28568 /

	масло (30 об%)			0.049123	0.014952
23	Эмульсия дизеля (90 об% дизель)	20	878.7	0.015	0.0013
24	Раствор полиэтиленгликоляПЭ Г 6000 (20 мас%)	20	1058	0.07567	0.0108
25	Раствор Неонола АФ9-12 (0.5 об%)	20	998	0.04125	0.001
Известные данные					
26	Вода [97]	20	998	0.07269	0.0014
27	Раствор глицерина (40 об%) [97]	20	1104	0.0685	0.00501
29	Молочная эмульсия (40 об%) [97]	20	1094	0.0469	0.083
30	Глинозем [98]	20	758	0.026	0.000128
31	Ксантан [97]	20	–	–	0.0043
32	Дизель [6,99–103]	20	817	0.02825	0.00294
33	W10 [6,99–103]	20	840	0.0275	0.0046
34	W30 [6,99–103]	20	876	0.0275	0.015
35	Этанол [6,99–103]	20	789	0.02203	0.0012

Для приготовления композиционных топлив в качестве основных компонентов использовалась угольная пыль, отходы углеобогащения и нефтепереработки. Приготовление суспензий и эмульсий осуществлялось в лабораторных условиях при температуре 20 °С, давление 101.3 кПа и влажности 80%. При помощи аналитических весов VIBРАНТ 84RCE (дискретность 10^{-5} г) осуществлялось взвешивание компонентов. Для измельчения угля использовалась роторная мельница Pulverisette 14 (скорость вращения ротора 6000-20000 об/мин). Время работы мельницы составляло 10–20 минут, далее полученные образцы просеивались на севе РЛ-1 с комплектом сит (ГОСТ Р 51568-99). Характерный размер частиц угольной пыли составлял 80–100 мкм. Приготовление композиционных топлив проводилось при помощи гомогенизатора MPW–302 с двумя установленными наконечниками.

Межфазное натяжение жидкости измерялось сталагмометром СТ-2, на границы дизеля с эмульгатором – вода [104]. Прибор представляет собой стеклянный цилиндр, который наполняется дизелем. На конце стеклянного цилиндра находится U-капилляр, через который проходит топливо. Конец такого капилляра располагается в воде. Капли состава вытекают в воду. Скорость капель регулируется винтовым зажимом. С помощью микрометра, расположенного в верхней части прибора, определяется объем капли. Проводились измерения количества и размеров капель, рассчитывалось среднее значение $\Delta a_{\text{ср}}$. Для вычисления межфазного натяжения полученные значения подставлялись в формулу [96]:

$$\sigma_0 = k(\rho_1 - \rho_2) \cdot \Delta a_{\text{ср}}, \quad (2.28)$$

где $k=994.2$ – константа сталагмометра; $\rho_1=1 \text{ г/см}^3$ – плотность воды; $\rho_2=0.828 \text{ г/см}^3$ – плотность дизельного топлива. Для изменения межфазного натяжения использовался эмульгатор D_cD [95]. При его создании использовались: дистиллят талового масла (ДТМ); диэтаноламин (ДЭА); триэтаноламин (ТЭА); дизель марки «Л». Измеренные значения межфазного натяжения для трех исследованных составов приведены в табл. 2.2.

Смешение компонентов эмульсий происходило в ультразвуковой ванне «Сапфир 2.8» в течение 2–5 минут. На первом этапе подготовки эмульсии к дизельному топливу добавлялся эмульгатор D_cD в концентрации 0.08 г/л и 1.6 г/л, далее происходило перемешивание в течение 2 минут. Затем добавлялось 10 об% воды, и эмульсия смешивалась в течение 5 минут.

Для оценки устойчивости (расслаиваемости или стабильности) полученной обратной эмульсии использовался капельный тест [105]. Для этого капля эмульсии сбрасывалась на поверхность воды. Считалось, что условие капельного теста выполнено, если эмульсия не примешивается с водным объёмом. Поэтому поверхностное натяжение выбиралось равным значению этого параметра для дизеля.

Таблица 2.2. Свойства дизельной эмульсии.

Наименование состава	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м	Динамическая вязкость μ , Па·с	Межфазное натяжение σ_0 , Н/м
10 об% вода, 90 об% дизель	828	0.0275	0.00259	0.04257
10 об% вода, 90 об% дизель, 0.08 г/л эмульгатор D _C D	828	0.0275	0.00252	0.02249
10 об% вода, 90 об% дизель, 1.6 г/л эмульгатор D _C D	828	0.0275	0.00243	0.00341

Выводы по второй главе

1. Проведен анализ существующих методик исследования вторичного измельчения капель жидкости и композиционных топлив, применяемых в системах и агрегатах, использующих тепло. В соответствии с целью исследования выбраны перспективные схемы вторичного измельчения капель жидкости и композиционных топлив: соударение между собой, с твердой поверхностью, с воздушным потоком, микро-взрывной распад.

2. Разработаны методика проведения экспериментов и экспериментальный стенд для исследований вторичных измельчений капель жидкостей и композиционных топлив.

3. Разработана методика регистрации характеристик измельчения исходных капель, позволяющая регистрировать скорости движения, размеры, углы атаки, количество вторичных фрагментов.

4. Выполнен выбор и анализ топливных компонентов, используемых в качестве основных для систем генерации и трансформации энергоносителей. Разработана методика измерения свойств жидкости: поверхностного и межфазного натяжения, вязкости, плотности.

5. Разработанная методика экспериментальных исследований позволяет определять количество и размеры вторичных фрагментов жидкости при

измельчении композиционных топлив. С ее применением возможно прогнозирование характеристик вторичного измельчения капель топлив в промышленных теплоэнергетических системах.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние формы капель на характеристики взаимодействия при их столкновении

При обобщении результатов опытов, выполненных с применением схемы, представленной на рис. 3.1а, строились карты режимов столкновений в системах координат $\beta(We)$ и $B(We)$. Угловые параметры β_1 , β_2 , β_3 рассчитывались для углов α , γ и θ . Связь углов α и γ рассчитывалась по формулам при $U_{d2} > U_{d1}$: $\sin(\alpha) = X/U_{d2}$, $\sin(\gamma) = X/U_{d1}$. При применении угла θ использовались формулы: $b = X \sin(\theta)$, $X = R_{d1} + R_{d2}$.

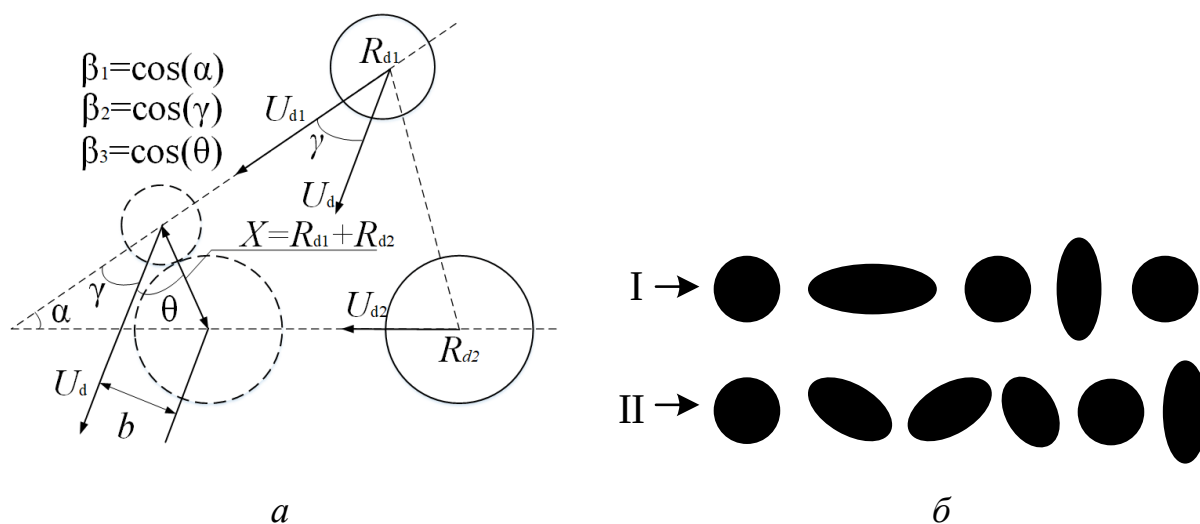
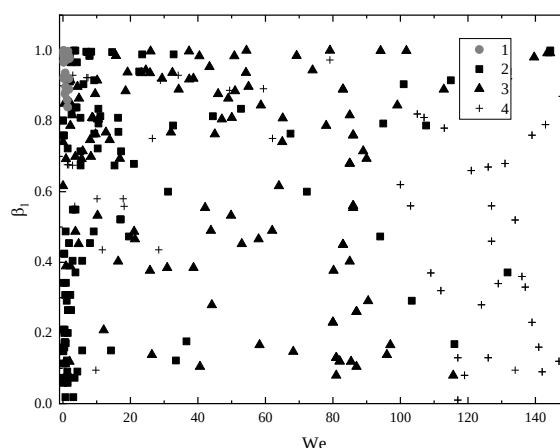
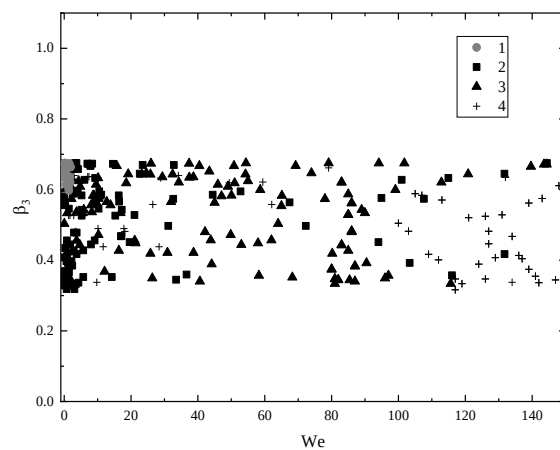
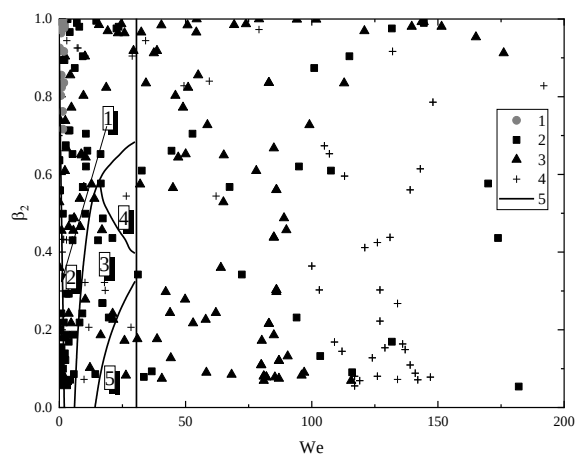
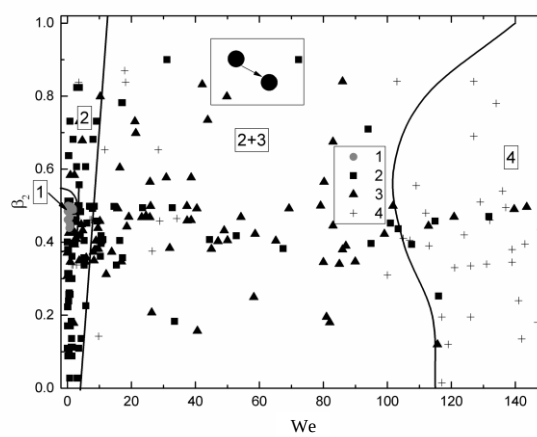
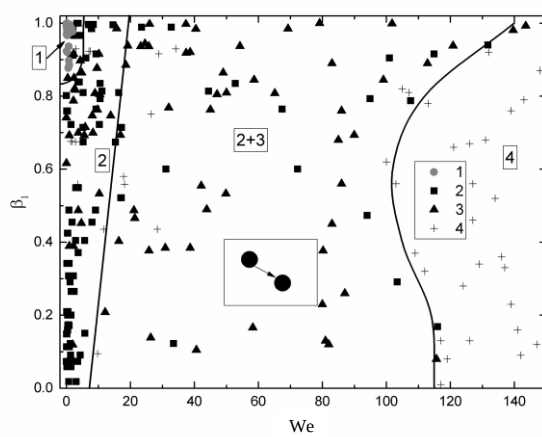
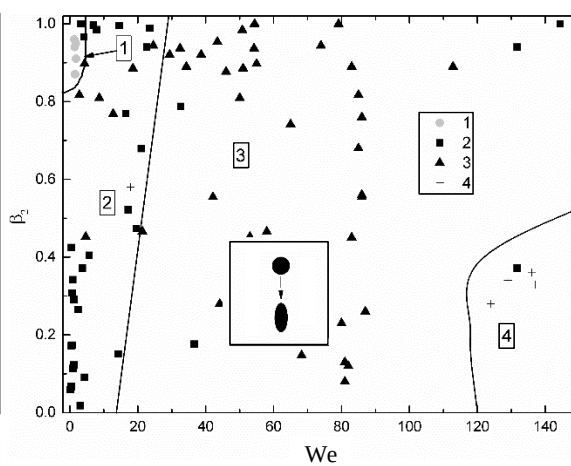
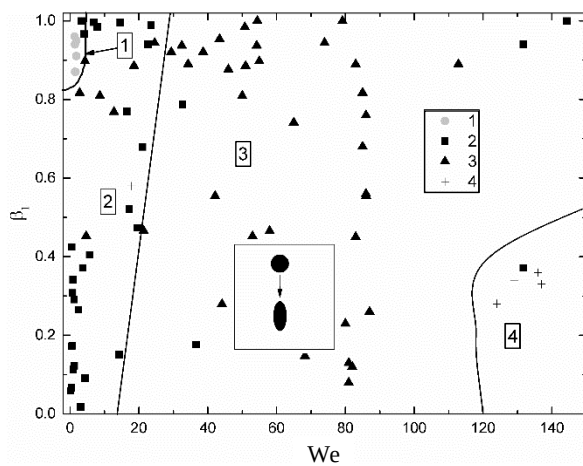


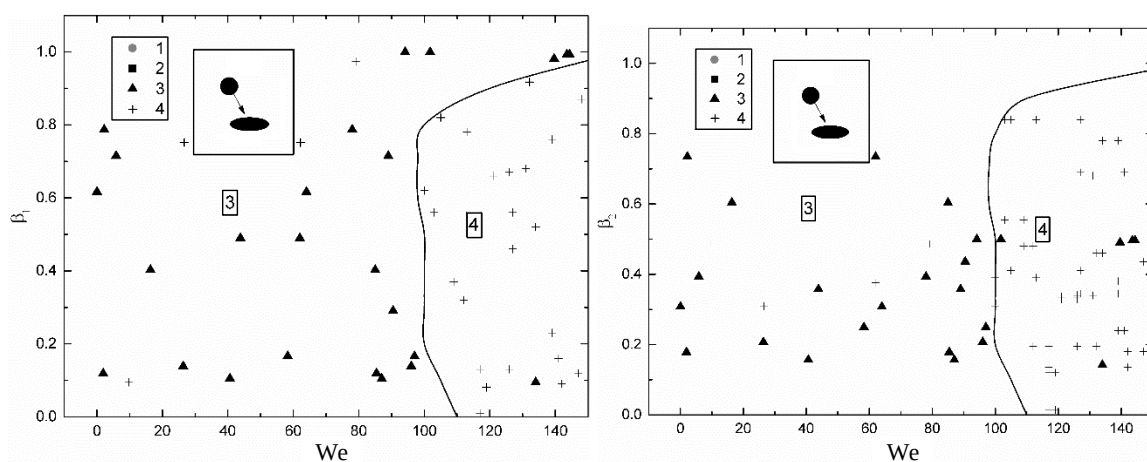
Рисунок 3.1. Схема регистрации (в соответствии с постановкой [104,105]) столкновения капель (а), типичные формы капель (по аналогии с опытами [13]) при деформации в газовом потоке (б): (I – трансформация капли в процессе свободного падения; II – трансформация капли в процессе вращения вокруг своей оси).

Для иллюстрации влияния безразмерных угловых (β_1 , β_2 , β_3) и линейного (B) параметров взаимодействия капель на режимы соударений (рис. 3.2, 3.3) получены соответствующие карты с учетом известных подходов [68,106–110]. Добавлены данные других авторов (показаны на рис. 3.2а, 3.3а), обобщенные в [68,106,109]. При анализе экспериментальных

данных, процитированных в обзорных статьях [68,106,109], установлены недетерминированные условия реализации отскока, коагуляции, дробления и разлета. В [68,106,109] показаны многочисленные экспериментальные точки с разными схемами взаимодействия практически во всех областях параметров. По большинству тех или иных схем взаимодействия выделены соответствующие им области (рис. 3.2*a*, 3.3*a*). В диссертационной работе показано (рис. 3.2*a*, 3.3*б*), что если не разделять (т.е. не выполнять соответствующую выборку кадров) формы (сфера, эллипсоид, условный жидкий диск) взаимодействующих капель, то довольно сложно выделить области однозначного доминирования режимов коагуляции, дробления или разлета в диапазоне средних значений числа Вебера (от 15 до 60). Лишь при фильтрации соударений капель с учетом конфигураций поверхности можно получить области (диапазоны) изменения основных параметров (β , We), в которых будут устойчиво реализовываться исследованные схемы взаимодействия (рис. 3.2*б–г*, 3.3*в–д*).

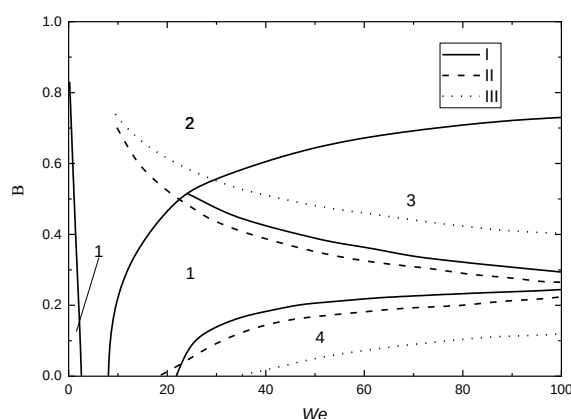


*a**b**c*

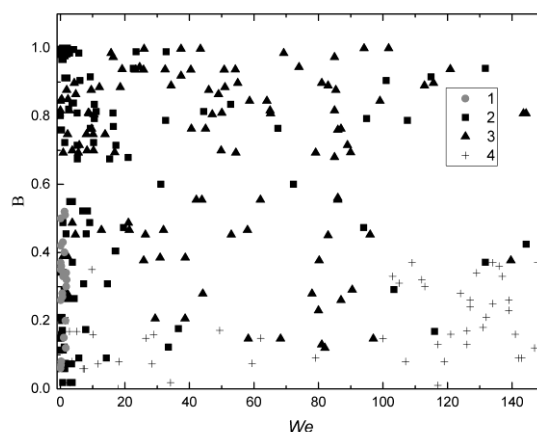


2

Рисунок 3.2. Карты режимов соударения капель [111] (отскок (1), коагуляция (2), разлет (3), дробление (4), данные [109]) при использовании угловых параметров взаимодействия (рассчитанных через углы α , γ , θ): *а* – карты режимов для β_1 , β_2 , β_3 (рассчитанные через углы α , γ , θ); *б* – экспериментальные данные для капель вида «сфера – сфера»; *в* – экспериментальные данные для капель вида «сфера – эллипсоид»; *г* – экспериментальные данные для капель вида «сфера – условный жидкий диск». Показаны области в соответствии с обзорной статьей [104]: 1 – медленная коагуляция; 2 – отскок; 3 – быстрая коагуляция; 4 – рефлексивное разделение; 5 – разделение с растяжением.



а



б

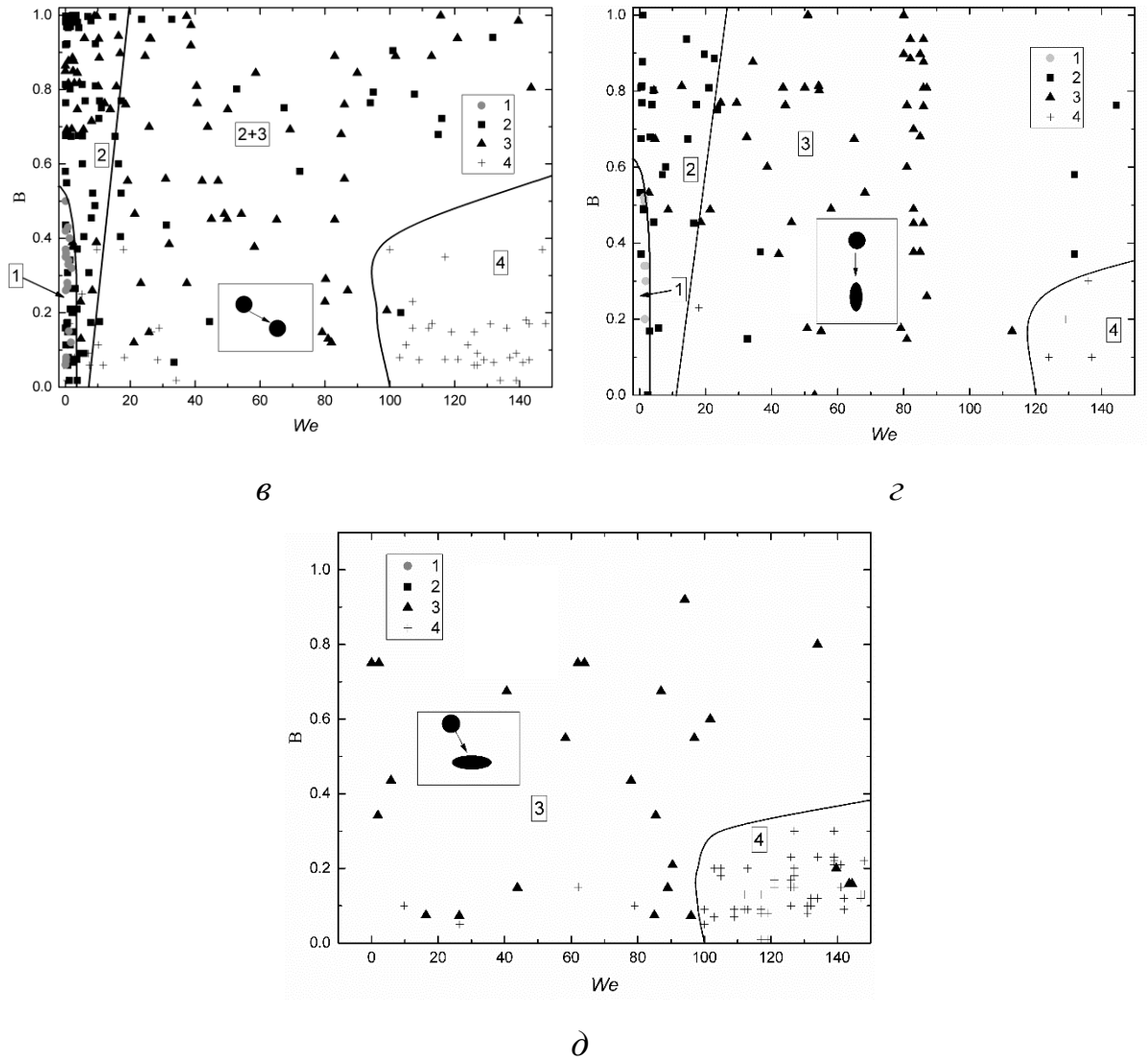


Рисунок 3.3. Карты режимов соударения капель (отскок (1), коагуляция (2), разлет (3), дробление (4)) при использовании линейного параметра взаимодействия [111]: *a* – данные [68,107], *б* – экспериментальные данные для всех типов капель, *в* – «сфера–сфера», *г* – «сфера–эллипсоид»; *д* – «сфера–условный жидкий диск». Показаны области (аналогичны большинству современных исследований, рассмотренных в [68,107]): 1 – коагуляция; 2 – отскок; 3 – разделение с растяжением; 4 – рефлексивное растяжение. Надписи на совмещенных областях: I – данные [10]; II – данные [7] при соотношении размеров капель 1; III – данные [7] при соотношении размеров капель 2.

Анализ рис. 3.2, 3.3 показывает, что во всех исследованных диапазонах изменений β , B и We режимы соударений капель со схемами «сфера–сфера», «сфера–эллипсоид», «сфера–условный жидкий диск» существенно отличаются. Проведенные эксперименты показали, что основное отличие состоит в доминировании одного или двух видов столкновений капель в форме сферы, эллипсоида и условного жидкого диска. В частности, для взаимодействующих сфер доминируют коагуляция и отскок. В случае сталкивающихся эллипсоидов чаще регистрировались разлет и коагуляция, а для условных жидких дисков характерно дробление. Эти закономерности обусловлены разными аэродинамическими силами, действующими 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 [112]. Это приводит к неустойчивости поверхности капель несферической формы [112] даже при меньших (по сравнению со сферами) значениях скоростей движения и размерах (соответственно, числах Вебера). Например, на рис. 3.2г, 3.3д показано, что разлет регистрировался даже при $We < 5$. Для сферы соответствующие критические (переходные между коагуляцией и разлетом) значения We составляли, как правило, 12–15, а эллипсоидам были характерны средние переходные значения We относительно сферы и условного жидкого диска.

При столкновении капель в форме эллипсоидов зарегистрированы условия устойчивой коагуляции во всем диапазоне изменения углов столкновений (при этом времена релаксации эллипсоидов в этом режиме взаимодействия существенно выше, чем сферы) (рис. 3.2в, 3.3г). Этот неочевидный результат показывает, что положение эллипсоидов относительно друг друга или сферической капли практически не влияет 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 используют термины: «частичная фрагментация», «полный распад»).

Для мишеней – условных жидких дисков можно отметить близкие к выделенным для эллипсоидов закономерности. Но с ростом угла между траекториями движения регистрировался устойчивый переход от разлета к дроблению в диапазоне средних чисел We (не выше 100). Это связано с тем, что условный жидкий диск, по сути, представляет структуру из большого количества водных цепочек, которые утончаются при повышении скорости движения (поперечные размеры растут, а продольный – толщина снижается). Снаряд при попадании в такие цепочки пробивает их и проходит с сохранением своего начального размера и формы, т.е. реализуется типичный разлет сталкивающихся фрагментов жидкости. При малых углах атаки сфер и условных 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 возрастает. Это интенсифицирует дробление обеих капель (рис. 3.2г, 3.3д). Следует отметить, что на 3.2г, 3.3д хорошо видно, что даже в диапазоне малых размеров капель и относительных скоростей движения (соответственно, $We < 10$) не зарегистрированы отскоки и коагуляция. В этом диапазоне We чрезвычайно сложно создать условия существенной трансформации поверхности капли до придания ей формы условного жидкого диска. Если удавалось обеспечить разные формы капель: условный жидкий диск, эллипсоид, сфера, то при $We < 10$ всегда регистрировался только разлет (рис. 3.2г, 3.3д). Во всех остальных случаях даже при придании начальной формы капли в виде условного жидкого диска вследствие малых размеров и относительных скоростей движения она трансформировалась перед взаимодействием в сферу или эллипсоид. Как следствие, такие взаимодействия были представлены на рис. 3.2а, б, 3.3б, в. В целом дископодобные формы капель при $We < 20$ слабоустойчивы. Поэтому на рис. 3.2г, 3.3д в этом диапазоне

изменения числа Вебера достаточно ограниченное количество экспериментальных точек.

При анализе влияния углов α и γ (безразмерных параметров β_1 и β_2) на характеристики исследованных режимов взаимодействия можно отметить, что чем меньше значения данных углов, тем выше вероятность отскока и коагуляции капель. Чем выше значения α и γ , тем интенсивнее взаимодействие с разделением капель на фрагменты (разлет и дробление). При этом в случае применения параметра β_2 экспериментальные точки соответствуют более узкому диапазону его изменения на рис. 3.2 (хорошо соответствуют данным [109]), чем при использовании β_1 . Последовательность режимов и характерные переходные границы в целом сохраняются вне зависимости от используемого подхода при вычислении углового параметра (β_1 и β_2).

В отличие от [109] в диссертационных исследованиях переходы между разлетом и дроблением происходили при больших значениях We (выше 90). Это обусловлено несколькими причинами: учетом условий реализации только одного режима соударения (в [109] допускались даже неединичные случаи реализации разлета и коагуляции в областях, которые принимались, как области устойчивого дробления); применением двух камер для контроля соударения капель в одной плоскости (в [109] этот фактор не обсуждался); разномасштабным вкладом значений скорости движения и размеров капель в значение числа Вебера; несколько отличающимися от [109] подходами к регистрации относительной скорости движения капель. Но так как только в [109] приведены обобщенные данные для β_2 , то анализ этих данных необходим для сравнения карт соответствующих режимов. В целом можно сделать вывод об удовлетворительном соответствии карт режимов взаимодействия на рис. 3.2.

Аналогичные заключения можно сделать при сравнении результатов экспериментов на рис. 3.3а и 3.3б–д с использованием безразмерного линейного параметра взаимодействия капель B и сопоставлении с данными

[68,107]. Условие $B=0$ может выполняться при лобовом (соосном) встречном или сонаправленном столкновении капель. Значение $B=1$ может быть 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 $B \rightarrow 0$ реализуются в основном коагуляция (малые скорости движения) или дробление (большие скорости движения). На рис. 3.3 показаны диапазоны изменения чисел Вебера, соответствующие переходам между отскоком, коагуляцией, разлетом и дроблением при разных значениях B .

Если допускать неединичные (например, 4–5) экспериментальные точки, соответствующие разлету или коагуляции капель, а также не разделять по формам последних карты взаимодействия (рис. 3.2а, 3.3б), то границы перехода к дроблению смещаются к числам Вебера 40–60, а разлета к 15–20, что хорошо соответствует данным, обобщенным в обзорных статьях [68,107,109] и приведенным на рис. 3.2а, 3.3а. Но без учета формы капель сложно достоверно определить условия максимальной фрагментации последних. В диссертационной работе ставилась задача определения более точных границ переходов от одного режима к другому, т.е. с исключением неединичных случаев реализации одновременно двух режимов в соответствующей области карт $\beta(We)$ и $B(We)$.

Аналогично экспериментам [63] в диссертационной работе установлено, что во всем диапазоне варьирования угла атаки реализуются взаимодействия, завершающиеся полной или частичной фрагментацией (дроблением) капель. Такие условия регистрировались при больших размерах (0.5–1 мм) и скоростях движения (7–10 м/с) хотя бы одной из капель. При этом несферическим каплям соответствовали меньшие значения размеров R_{d1} , R_{d2} и скоростей U_{d1} , U_{d2} . Этот результат можно считать очевидным, но установлены количественные отличия диапазонов углов столкновений капель в форме сфер, условных жидких дисков и эллипсоидов, в которых доминируют отскок, коагуляция, разлет и дробление (рис. 3.2, 3.3).

Для больших значений скоростей движения (более 7 м/с) и размеров (более 0.5 мм) каплей (соответственно, числа Вебера выше 50) характерны не только взаимодействия с их дроблением, как можно было ожидать. Большое число соударений зарегистрировано в режиме разлета и (или) коагуляции (рис. 3.2, 3.3). Этот результат можно объяснить влиянием углов столкновений и форм капель, которые не учитываются при расчете чисел Вебера.

Удовлетворительное соответствие данным опытов [63] можно отметить лишь при $We > 50$ (рис. 3.2, 3.3). При меньших значениях We отличия параметров, отражающих переходные условия между коагуляцией и разлетом, а также к дроблению, лежат в пределах 20–30%. Это результат обусловлен вкладом углов столкновений и форм взаимодействующих капель. В отличие от опытов [63] во всех диапазонах изменения числа Вебера регистрировались разные схемы взаимодействия (при углах 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 также разлета и дробления (снарядов и мишеней).

Анализ результатов выполненных экспериментов показал, что оценка условий и последствий разрушения или слияния двух капель воды при их столкновениях с использованием только числа Вебера (как, например, в [63]) в условиях несовпадения векторов скорости их движения недостаточна. Если ориентироваться на известные положения теории подобия, то можно сделать вывод о том, что 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. Последний фактор, не входящий в выражения для числа Вебера, так же, как и форма капель, как показали результаты экспериментов (рис. 3.2, 3.3), играет не менее важную

роль, чем четыре вышеперечисленных. 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. 3.4 приведены типичные 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 от эксперимента к эксперименту число новых капель меняется существенно (на 20–30%), а суммарная площадь поверхности – незначительно (менее 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) после и до взаимодействия S_1/S_0 .

На рис. 3.4 хорошо видно, что значения S_1/S_0 для We_1 несколько выше, чем в случае We_2 . Это обусловлено принятым (в соответствии с классическими представлениями, например [63]) условием, что снарядом считается капля, имеющая большую скорость перед столкновением. Важно отметить хорошую корреляцию установленных зависимостей $S_1/S_0(We_1)$ и $S_1/S_0(We_2)$. Как и следовало ожидать, при соударении капель несферической формы значения S_1/S_0 существенно выше, чем при схеме “сфера–сфера” во всем диапазоне изменения чисел Вебера и углов атаки. Это обусловлено доминированием эффектов разлета и дробления. Также вполне очевидным можно считать рост S_1/S_0 при повышении We (рис. 3.4). Особое значение имеют установленные количественные оценки диапазонов изменения S_1/S_0 как функции от We при разных конфигурациях поверхности капель.

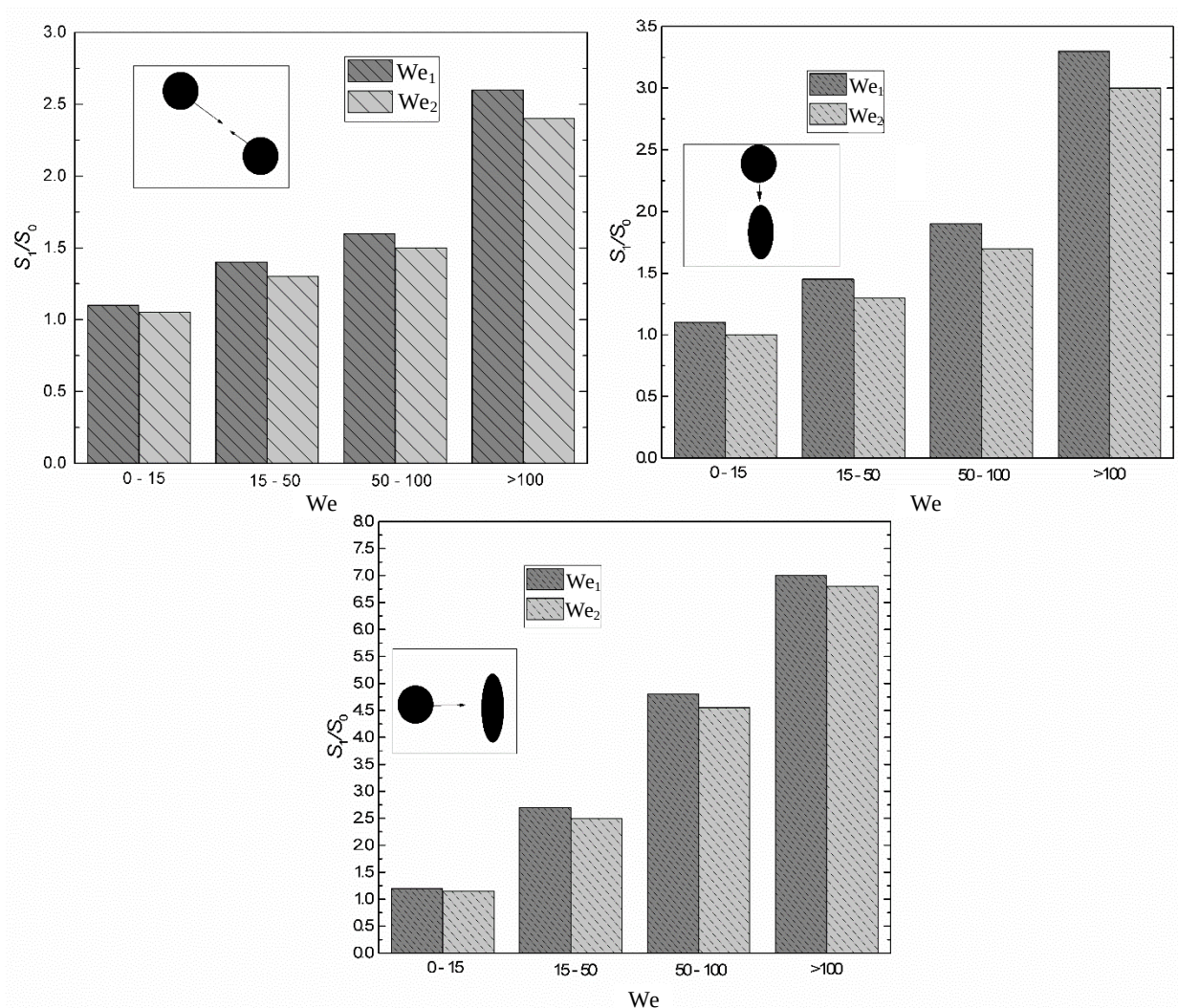


Рисунок 3.4. Средние значения площади поверхности жидкости при разных числах Вебера с учетом всех зарегистрированных столкновений по углам взаимодействия и разделением по формам капель («сфера–сфера»; «сфера–эллипсоид»; «сфера–условный жидкий диск») [111]: We_1 – рассчитанное число Вебера относительно «капли-снаряда»; We_2 – рассчитанное число Вебера относительно «капли-мишени».

Результаты выполненных исследований показывают (рис. 3.4), что площадь поверхности жидкости можно увеличить в несколько раз (до 10) при разных условиях взаимодействия и формах капель. При этом масштабы увеличения S_1/S_0 в целом сопоставимы с ранее установленными при повышении скоростей движения капель (т.е. за счет аэродинамического

фактора, способствующего их сплющиванию, надуванию, разрыву водных цепочек и формированию аэрозоля [65]), а также при перегреве неоднородных капель (суспензий, эмульсий, растворов, несмешиваемых жидкостей по типу «вода в дизеле» или «дизель в воде») [113,114]. Лишь для эмульсий с существенно отличающимися температурами кипения (на более чем 100–150 °С) 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 опытах [113,114] и диссертационной работе факторов (тепловой – перегрев, аэродинамический – ускорение, контактный – соударение между каплями или с преградой) достаточно эффективно способствует повышению отношения S_1/S_0 (рис. 3.4). Этот результат важен для развития тепломассообменных технологий, в которых требуется интенсификация фазовых превращений за счет так называемого вторичного (непосредственно в технологических камерах и агрегатах) измельчения капель. Последнее можно организовать за счет совместного влияния трех рассмотренных факторов. При этом важно учитывать расходы энергии на ускорение капель, их столкновения или смешивание неоднородных составов. В первом приближении менее затратными представляются технологии вторичного измельчения капель, основанные на их столкновениях между собой, так как нет необходимости в дополнительном подводе тепловой энергии, а также существенного ускорения потоков. За счет варьирования углов атаки, форм, размеров и концентрации капель можно обеспечить значения $S_1/S_0 > 5$.

3.2. Влияние параметров мишени и снаряда на характеристики взаимодействия капель

Проведенные эксперименты показали, что роль мишени и снаряда при соударении двух капель между собой может оказывать существенное

влияние на реализуемые режимы соударения, положения границ на режимных картах и интегральные характеристики процесса дробления при образовании вторичных фрагментов. Процесс соударения капель жидкости изучался при температуре воздуха и жидкости (воды) около 20 °С. На рис. 3.5 приведены режимные карты процесса взаимодействия капель.

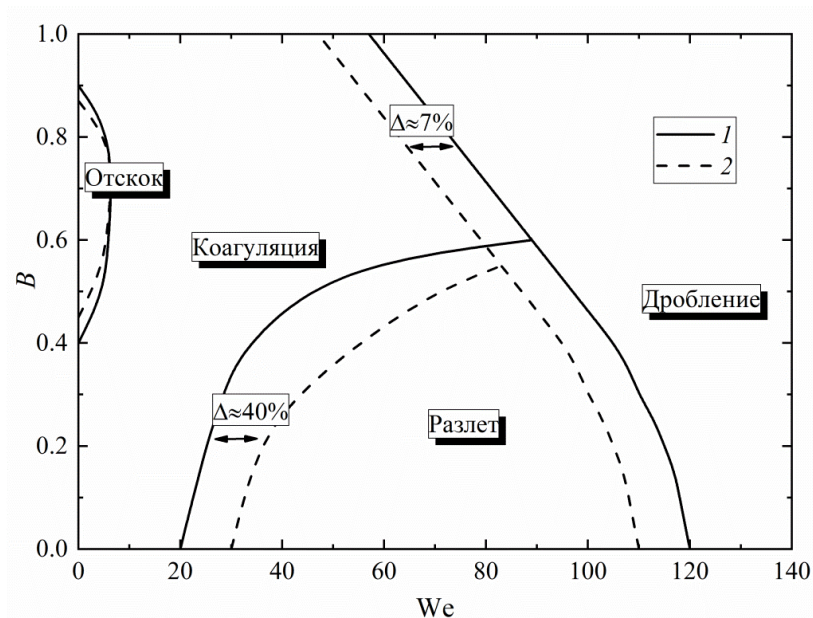


Рисунок 3.5. Карта режимов взаимодействия с использованием безразмерного линейного параметра и числа Вебера, построенная при использовании параметров капли с разной ролью [115]: 1 – снаряд, 2 – мишень.

На карте режимов учтена зависимость безразмерного линейного параметра взаимодействия от числа Вебера. Такая зависимость одновременно позволяет учесть влияние размеров капель, результирующей скорости взаимодействия, плотности и поверхностного натяжения жидкости. Линейный параметр взаимодействия позволяет оценить центричность соударения. Последний косвенным путем учитывает угол атаки капель за счет измеренного расстояния между результирующими векторами скорости взаимодействия, отложенными из центров капель.

При построении карты режимов проводились вычисления значений We с учетом размеров «капли-снаряда» и «капли-мишени». Анализируя

полученные зависимости (рис. 3.5), можно отметить, что для «капель-снарядов» режимы разлета и дробления сдвигаются в сторону меньших критических значений чисел Вебера (характеризуют переходы между режимами на картах).

Значения Вебера для границ коагуляция/разлет уменьшились относительно мишени примерно на 20–25%, а значения We для границы разлет/дробление, наоборот, увеличились на 5–7%. Это связано с тем, что скорость движения снаряда выше скорости перемещения мишени. При увеличении результирующей скорости взаимодействия капля нелинейно возрастают значения We . С другой стороны, за счет большей скорости взаимодействия, «капля-снаряд» при соударении с «каплей-мишенью» разрушает ее. Тем самым, если рассматривать процесс взаимодействия относительно «капли-мишени», то дробление наступает раньше по критическому значению числа Вебера. При этом «капля-снаряд» незначительно разрушается по сравнению с мишенью. Как следствие, происходит расширение зоны режима разлета и сужение зоны дробления для снаряда. Изменение роли капли с мишени на снаряд практически не влияет на режим отскока, так как предельные результирующие скорости взаимодействия близки друг к другу, и диапазон параметра линейного взаимодействия не изменяется. Такие же диапазоны показаны в [116]. За счет уменьшения критического числа Вебера относительно «капли-снаряда» в режиме разлета уменьшается критическое значение, соответствующее границе коагуляции, но лишь при $0 < B < 0.6$. И, наоборот, размеры области коагуляции увеличиваются при $0.6 < B < 1$ за счет роста критического значения числа Вебера для режима дробления при изучении влияния роли «капли-снаряда». При достижении числа We значений более 120 ослабевает влияние роли капли на карту режимов, что объясняется устойчивым процессом дробления во всем диапазоне безразмерного параметра взаимодействия ($0 < B < 1$).

При столкновении одинаковых по размерам капель жидкости границы дробления, разлета, разделения с растяжением перешейка и рефлексивного разделения смещаются в сторону меньших значений We . Размеры области отскока увеличиваются за счет смещения границы в сторону больших значений We . Таким образом, диапазоны We для коагуляции являются самыми малыми при максимальном значении отношения размеров взаимодействующих капель ($\Delta=0.9-1$). Для $\Delta=0-0.2$ область коагуляции самая большая, а границы дробления, разлета, рефлексивного разделения и разделения с растяжением перешейка сдвинуты в сторону больших значений числа Вебера.

Для более точной идентификации положения границ режимов взаимодействия целесообразно учесть роль мишени и снаряда в математических выражениях, описывающих границы переходов на картах. По приведенным на рис. 3.5 кривым критических переходов между режимами получены аппроксимационные выражения. Полученные при аппроксимации математические выражения имели общий вид полинома второго порядка:

$$We = a_2 \cdot B^2 \cdot Oh^{m_2} \cdot \Delta^{n_2} + a_1 \cdot B \cdot Oh^{m_1} \cdot \Delta^{n_1} + a_0 \cdot Oh^{m_0} \cdot \Delta^{n_0}; Oh = 0.0052 \quad (3.1)$$

Данные зависимости учитывают роли снаряда и мишени в процессе взаимодействия капель. Коэффициенты аппроксимационных выражений делились на соответствующие коэффициенты, учитывающие влияние числа Онезорге (как критерия, характеризующего свойства жидкости) и отношение размеров (как критерия, характеризующего кинетику взаимодействия). В результате получены математические зависимости для мишени и снаряда. Отличием данных выражений является разное значение коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 для «капли-мишени» и «капли-снаряда», которые приведены в табл. 3.1.

При проведении экспериментов установлено, что начальные параметры капель (размеры и скорость движения) оказывают определяющее влияние на интегральные характеристики вторичных фрагментов, т.е. их распределения по размерам, а также отношение площади свободной поверхности

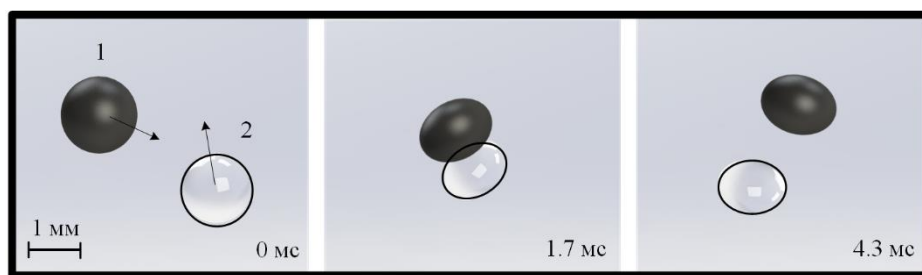
образованных капелек к аналогичному параметру исходных капель до соударения. На рис. 3.6 приведены типичные кадры видеogramм выполненного эксперимента, на которых показано довольно большое количество образованных вторичных фрагментов и существенное различие их размеров (полидисперсный состав).

Таблица 3.1. Коэффициенты выражений для критических чисел Вебера при переходах (в индексах при We указаны названия границ) между режимами соударений, учитывающие роль мишени и снаряда.

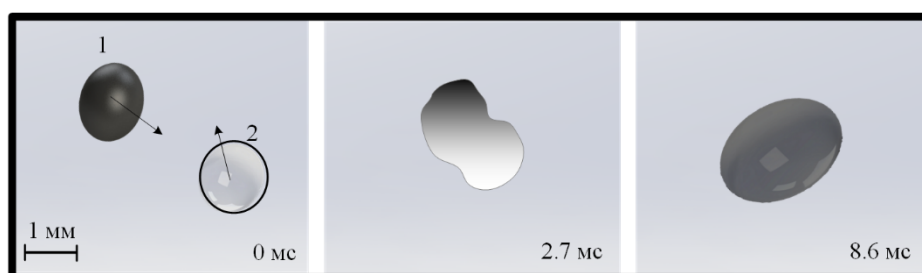
	α_2	m_2	n_2	α_1	m_1	n_1	α_0	m_0	n_0	
Мишень										
$We(Oh, B)_{BO/CO}$	-34.25	-1/4	3/4	58.73	-1/5	3/4	-22.2	-1/7	3/4	$0.3 < B < 1$
$We(Oh, B)_{CO/DI}$	0.0013	-3/2	-1/3	-0.0567	-4/3	-1/3	0.097	-4/3	-1/4	$0 < B < 1$
$We(Oh, B)_{CO/SE}$	$192.6 \cdot 10^{-7}$	-3	-2/3	$3.07 \cdot 10^{-5}$	-3/2	-2	0.805	-2/3	-1	$0 < B < 0.7$
Снаряд										
$We(Oh, B)_{BO/CO}$	-34.25	-1/4	3/4	58.73	-1/5	3/4	-22.2	-1/7	3/4	$0.3 < B < 1$
$We(Oh, B)_{CO/DI}$	0.00145	-3/2	-1/3	-0.05465	-4/3	-1/3	0.103	-4/3	-1/4	$0 < B < 1$
$We(Oh, B)_{CO/SE}$	$198.6 \cdot 10^{-7}$	-3	-2/3	$4.82 \cdot 10^{-5}$	-3/2	-2	0.46	-2/3	-1	$0 < B < 0.7$

Число Вебера позволяет учитывать влияние сил инерции и поверхностного натяжения, а также как размеры и результирующую скорость взаимодействия капель. Такой параметр обобщает все основные характеристики соударения двух капель, поэтому использовался для оценки условий измельчения. На рис. 3.7 приведены зависимости количества образованных вторичных капель от их радиусов с выделением роли (мишень и снаряд) капель, т.е. выполнена выборка капелек, образованных при разрушении мишени или снаряда. Анализируя рис. 3.7а, можно отметить, что

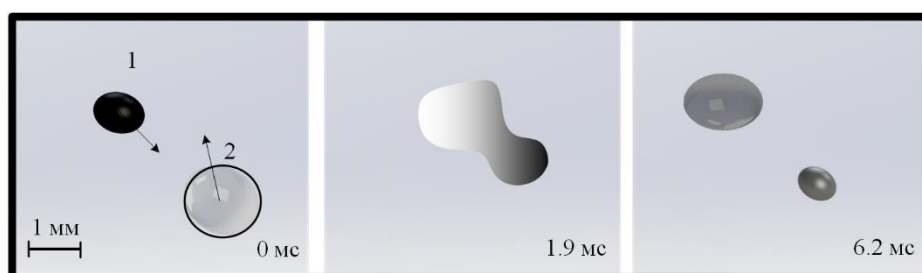
при увеличении числа Вебера возрастает количество вторичных фрагментов и, следовательно, одновременно уменьшается их средний радиус.



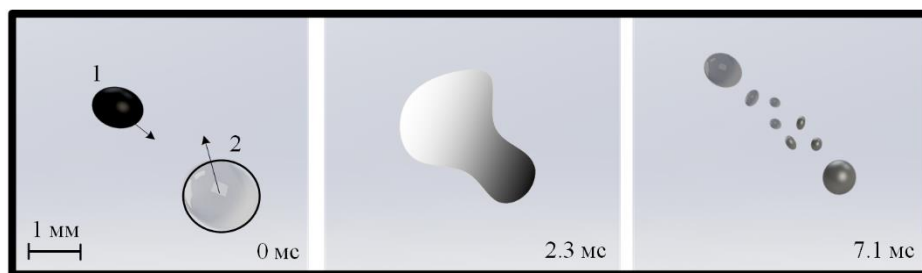
a



б



в



г

Рисунок 3.6. Типичные кадры регистрации процессов взаимодействия капель (1 – снаряд, 2 – мишень) в разных режимах [115]: *a* – отскок, *б* – коагуляция, *в* – разлет, *г* – дробление.

Сравнивая роль мишени и снаряда (рис. 3.7), видно, что общая тенденция роста количества образованных фрагментов в процессе дробления

и снижение их размеров сохраняется. За счет того, что скорость движения снаряда выше скорости перемещения мишени, разрушение последней начинается при меньших числах Вебера, что иллюстрирует рис. 3.7б. В частности, для идентичных чисел Вебера (около 100) количество вторичных фрагментов с радиусом примерно 0.05 мм для капли мишени больше практически на 70%. Такая же тенденция сохраняется и при дальнейшем росте числа Вебера, но расхождения по числу вторичных капель снижаются. Так, например, при $We \approx 150$ количество фрагментов с радиусом 0.05 мм от мишени и снаряда отличается не большее, чем на 30–35%.

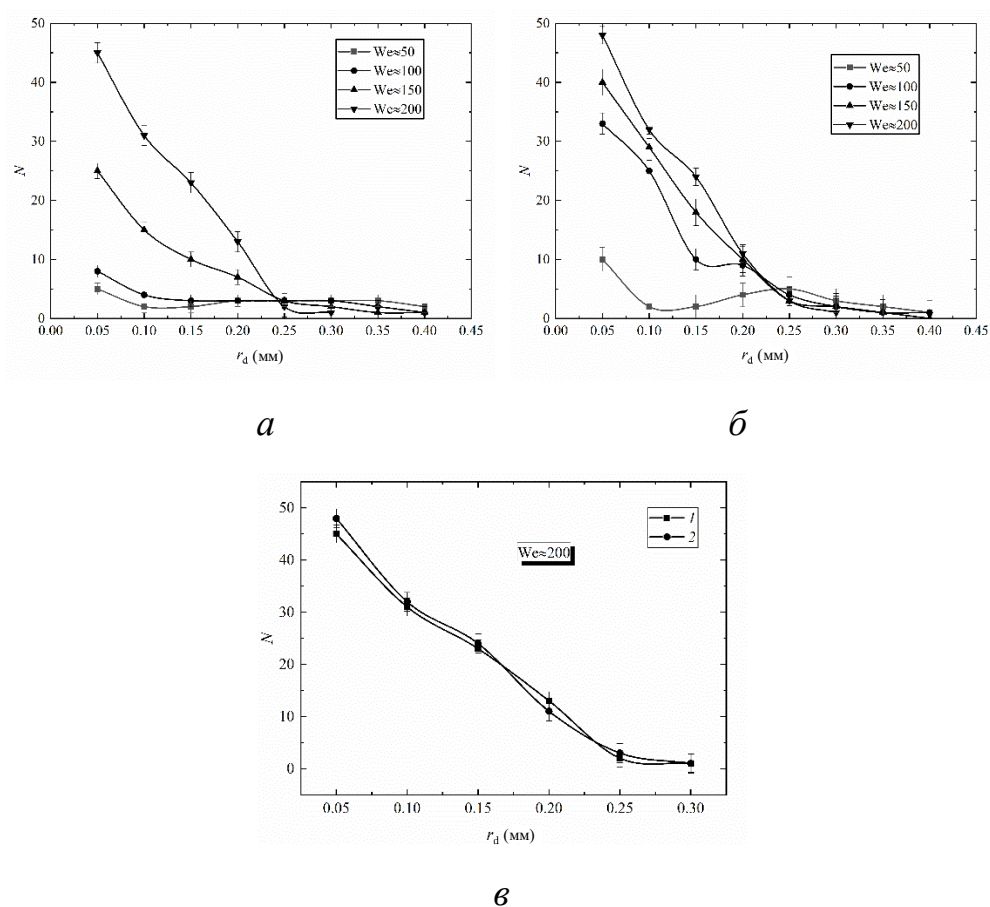


Рисунок 3.7. Распределения вторичных фрагментов [115] по размерам с учетом роли (*а* – от снаряда, *б*– от мишени) исходных капель при $50 < We < 200$; *в*– сравнение распределений капель вторичных фрагментов, образующихся при разрушении от мишени (1) и снаряда (2) при $We \approx 200$.

При достижении условия $We > 190$ роль мишени и снаряда становится слабой, так как при таком числе Вебера достигаются критические значения скоростей движения обеих капель. Обе исходные капли распадаются практически одинаково. Это приводит к устойчивому дроблению, что иллюстрирует рис. 3.7в.

Важной особенностью является снижение максимального радиуса образованных вторичных фрагментов до значения 0.3 мм при увеличении значений числа Вебера больше 190. Для оценки эффективности процесса измельчения исходных капель в настоящей работе применяется отношение площади свободной поверхности образованных вторичных фрагментов к аналогичному параметру для исходных капель. Также для наглядного представления уменьшения размеров фрагментов, образованных при соударении капель друг с другом, используется (рис. 3.8) отношение радиусов вторичных фрагментов к исходным R_d . Представлены зависимости безразмерных интегральных характеристик процесса дробления двух соударяющихся капель в зависимости от числа Вебера с разделением снарядов и мишеней, а также без выделения роли капель. На рис. 3.8а можно видеть, что при $We = 50-150$ влияние роли капли вносит огромный вклад в показатель эффективности измельчения капель (S_1/S_0). Так, например, мишень при числе Вебера около 50 уменьшается практически в 4 раза, а снаряд же в 3.6 раза. При рассмотрении одновременно двух капель (без выделения роли мишени и снаряда) значения r_d/R_d и S_1/S_0 являются средними (относительно мишени и снаряда). При увеличении числа Вебера до 160 этот эффект ослабевает. При дальнейшем повышении значения We эти отличия укладываются в пределах доверительного интервала экспериментальных данных. Следовательно, можно сделать заключение, что влияние роли (мишень или снаряд) капли существенно лишь в диапазоне $50 < We < 150$.

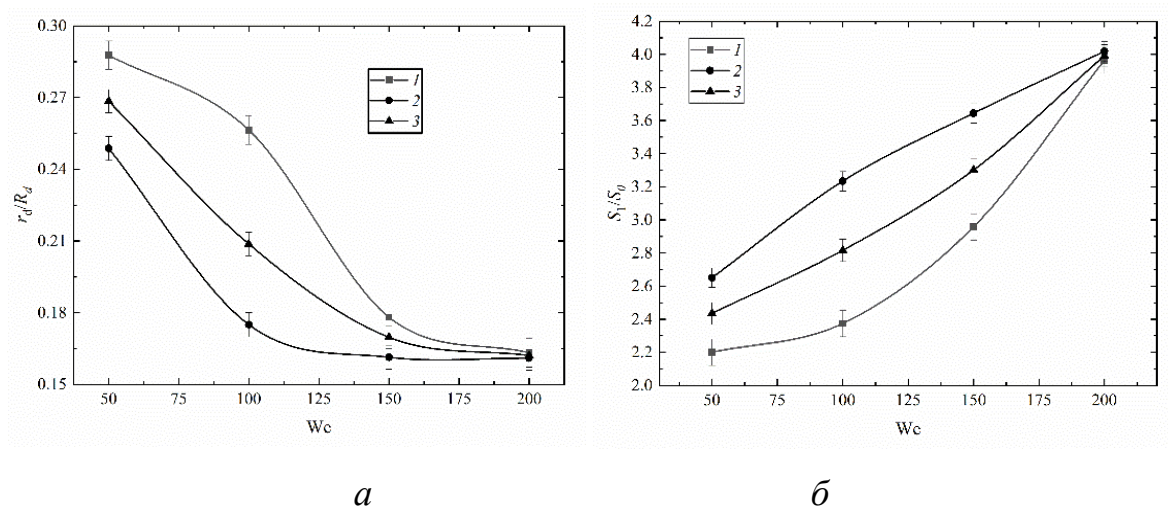


Рисунок 3.8. Безразмерные характеристики измельчения капель при их взаимодействии [115]: *а* – отношения радиусов образованных фрагментов к радиусам исходных капель; *б* – отношения площади свободной поверхности после процесса дробления к начальной площади поверхности двух капель. При вычислениях учитывались вторичные фрагменты от: 1 – снаряда, 2 – мишени, 3 – снаряда и мишени.

Для использования рассмотренной в диссертационной работе методики разделения капель на мишень и снаряд наиболее важной является характеристика отношения площади свободной поверхности вторичных фрагментов к аналогичной площади поверхности исходных капель, а также эффективный показатель измельчения (r_d/R_d) для широкого диапазона варьирования числа Вебера (50–200). На основе проделанных экспериментальных исследований можно выдвинуть гипотезу о наиболее эффективном вторичном измельчении капельного потока при $We > 150$. При таком числе Вебера начальные радиусы капель варьировались от 0.6 мм до 1 мм, а скорость взаимодействия изменялась от 2.5 м/с до 3.5 м/с. За счет малых диапазонов начальных размеров капель и изученных в диссертационной работе их интегральных характеристик можно повысить эффективность работы промышленных теплоэнергетических устройств, в

основе работы которых лежат процессы тепломассообмена капельных потоков в газовой среде.

При проведении экспериментальных исследований установлена ключевая особенность образования вторичных фрагментов. При соударении капля за счет большой скорости взаимодействия снаряд разбивает мишень, при этом ему характерны незначительные трансформации поверхности (для чисел Вебера 100–150). Как следствие, «капля-мишень» измельчается в несколько раз, а снаряд при этом уменьшается в размерах лишь на 5–10%. С увеличением числа Вебера до 200 снаряд претерпевает разрушение до 60% от начального объема, а мишень до 90%. При числах Вебера от 50 до 100 снаряд практически не измельчается, а объем капли мишени уменьшается на 10–20%. При $We > 100$ видно смещение слоев мишени и снаряда при взаимодействии и интенсифицирует отрыв фрагментов жидкости от основных капель. Доля измельченного объема жидкости составляет от 10% до 70%. С ростом числа Вебера эта доля растет, но не достигает 80% от начального объёма, так как часть начальных капель имеет относительно невысокие скорости движения и распадается вследствие относительно невысоких сил инерции.

При анализе влияния начальных размеров капель на вторичные фрагменты выявлено, что процесс дробления инициируется при меньших числах Вебера, когда $\Delta > 0.3$, но количества образованных фрагментов при этом меньше, чем у $\Delta \approx 1$. Такая зависимость объясняется тем, что каплю, обладающую меньшим размером, сложнее разрушить, и фрагменты образуются более крупные.

Часто в литературе режим дробления разделяют на дробление с растяжением перешейка и рефлексивное [103]. Влияние таких режимов на образование вторичных фрагментов рассмотрено в [117], но без разделения роли (мишень и снаряд) капли. В диссертационной работе для оценки влияния роли «капель-мишеней» и «капель-снарядов» проведено разделение режима дробления на с растяжением перешейка и рефлексивное.

Установлено, что «капля-мишень» образует наибольшее количество вторичных фрагментов при режиме дробления с растяжением перешейка, когда линейный параметр взаимодействия стремится к единице. Т.е. «капля-снаряд» пробивает «каплю-мишень», при этом образуя большое количество фрагментов со средним радиусом 0.1 мм. Такой эффект объясняется большей скоростью снаряда относительно мишени. В случае рассмотрения влияния «капель-снаряда» на интегральные характеристики дробления максимальное количество частиц достигается при рефлексивном измельчении, за счет того, что при этом режиме удар является более упругим. При рассмотрении обеих капель одновременно наибольшее количество фрагментов образуется при режиме дробления с растяжением перешейка. Это обусловлено интенсивным измельчением мишени и попутной фрагментацией снаряда, который изменяет форму в процессе полета, тем самым становиться не сферичным.

Результаты выполненных исследований представляют интерес для группы практических приложений. Они позволяют сделать вывод о том, что для повышения эффективности дробления капель при смешении двух струй нецелесообразно одновременно увеличивать их скорости движения. Проведенные опыты показали, что достаточно увеличить скорость движения одной капли, которая является снарядом, что приведет к интенсивному дроблению второй капли – мишени. За счет увеличения скорости движения одной из капель и выбора угла атаки возрастет результирующая скорость взаимодействия, а, следовательно, и число Вебера. Этот эффект позволит снизить энергетические затраты, необходимые для работы теплопередающих и теплоиспользующих установок, что приведет к увеличению полезной работы. Результаты исследований позволяют выделить наиболее эффективные условия измельчения капель при учете их роли (мишень и снаряд).

3.3. Влияние скоростей движения и размеров исходных капель на расчет критических чисел Вебера для режимов соударений

В экспериментах [118–120], посвящённых исследованию столкновений двух капель (так называемых мишени и снаряда), выделяются пять режимов (последствий): 1) слияние (коагуляция) двух капель в одну более крупную; 2) отскок капель друг от друга (взаимодействие через газовую или паровую прослойку между каплями); 3) кратковременное слияние с последующим разрушением; 4) пробивание мишени снарядом с образованием нескольких крупных вторичных капель; 5) взрывное дробление первичных капель с образованием множества мелких вторичных капель. При этом авторы [118–120] по результатам своих исследований формулируют достаточно строгие диапазоны значений основного критерия – числа Вебера We , в которых прогнозируют лишь один из возможных режимов столкновения с нулевой вероятностью возникновения других.

Эксперименты с выборкой и анализом столкновений двух капель в аэрозольном потоке позволили выделить следующие режимы взаимодействия: коагуляция, отскок, разлёт, дробление на группу не менее 5 капель. При проведении настоящего исследования, а также более ранних опытов с анализом режимов взаимодействия двух капель в аэрозольном потоке было отмечено, что при определённых соотношениях размеров капель и их скоростей вероятность возникновения одного из режимов может являться преобладающей и не исключает возможности реализации других.

Также следует отметить и то, что схожим по описанию режимам взаимодействия капель в постановочных экспериментах и опытах с аэрозолем соответствуют разные диапазоны значений We . Представленные данные дают возможность сформулировать достаточно ограниченные диапазоны изменения значений We , которые бы соответствовали одному из выделенных режимов взаимодействия капель воды во всех проанализированных работах. Достоверно наблюдать отскок капель при

столкновении можно в условиях $We=0.35-0.5$. Вероятность коагуляции капель максимальна в диапазоне $We=1-7.5$; достоверно прогнозировать разлёт можно при $We=15-50$. Дробление капель чаще всего возникает при значениях $We>100$, однако даже в этих условиях вероятность такого режима по данным проведённых экспериментов составляет около 30%. Несоответствие экспериментальных результатов настоящей работы и авторов [46,118–120] объясняется разными подходами при планировании и проведении исследований: воспроизведение столкновений двух капель путём наведения «капли-снаряда» на «каплю-мишень» и более реалистичные условия взаимодействия капель, как элементов распылённой жидкости в газовом потоке. Условия в опытах со столкновением мишеней и снарядов [46,118–120] можно считать несколько идеализированными, исключаящими взаимное влияние множества соседних капель при движении в аэрозольном потоке (сложные траектории, меняющиеся концентрации и формы капель, смещения центров масс, накладывание траекторий движения, изменение скорости диффузии и конвекции, формирование температурных и аэродинамических следов, меняющиеся давления в окрестности капель и т.д.). Эксперименты [46] более приближены к реальным процессам, протекающим в аэрозольных технологиях. Однако и их результаты нельзя считать полностью учитывающими всю совокупность значимых факторов, влияющих на характеристики столкновений капель жидкостей при движении в газовых средах. Важнейшей характеристикой сталкивающихся капель является их форма, которая циклически меняется в процессе движения и может насчитывать до 10 разновидностей («шар», «блин», «эллипс», «зонт» и пр.). Вероятно, не менее существенное влияние на последствия столкновений капель оказывают и такие факторы, как угол между векторами их скоростей, концентрация капель в единице объёма, состав распылённой жидкости, наличие фазового перехода и др. Параметр B косвенно позволяет учитывать влияние концентрации капель в потоке на последствия их столкновений. Также можно предположить, что вклад скорости и размера капель (две

основных характеристики для вычисления параметра We) не равноценен при прогнозировании режимов их взаимодействия. Это предположение подтверждают данные, приведенные на рис. 3.9 и 3.10 – диапазоны возникновения каждого из четырех ключевых режимов взаимодействия существенно разнятся при варьировании скорости движения капель, постоянстве их диаметра (и наоборот).

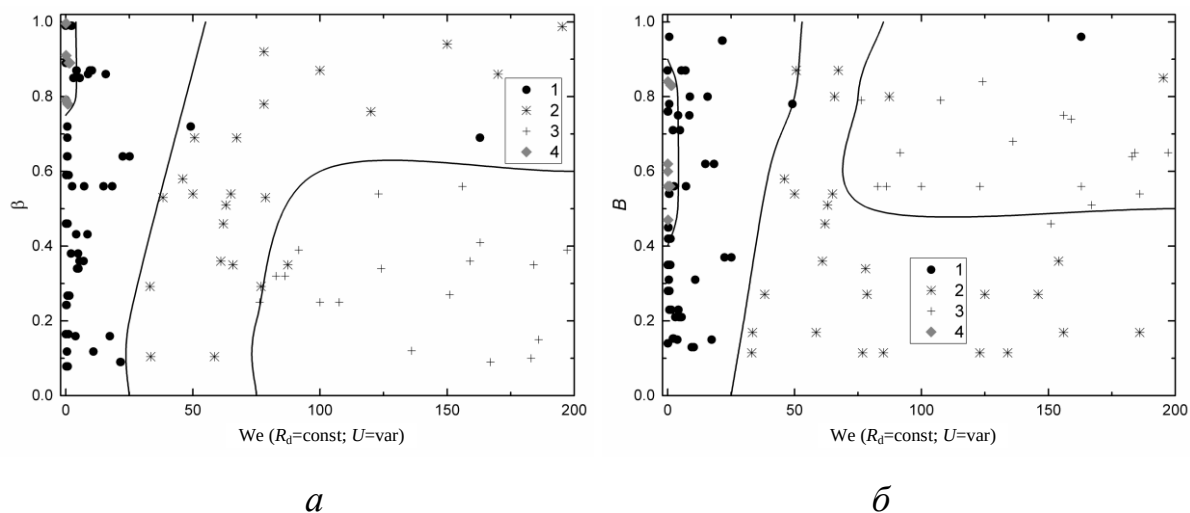


Рисунок 3.8. Карты углового (*а*) и линейного (*б*) параметров взаимодействия капель от критерия We при постоянстве характерного размера капель [121]: 1 – коагуляция; 2 – разлет; 3 – дробление; 4 – отскок.

Полученные экспериментальные результаты позволяют также сформулировать предположение о существенной роли соотношения скоростей U_{d1}/U_{d2} (также относительной скорости с учетом значений U_{d1} и U_{d2}) и радиусов R_{d1}/R_{d2} капель при их взаимодействии: при одинаковых We результатом столкновения крупных капель является коагуляция, а более мелких, но с большей скоростью – интенсивное дробление.

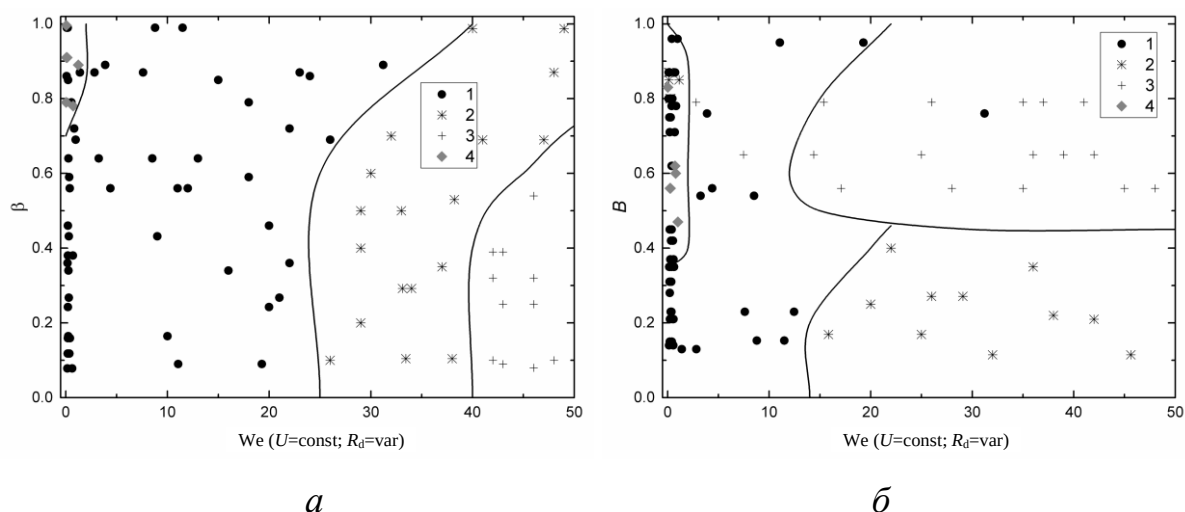


Рисунок 3.9. Карты углового (*а*) и линейного (*б*) параметров взаимодействия капель от критерия We при постоянстве скорости капель [121].

Для разработки достоверных прогностических моделей, позволяющих выполнять оценку вероятностей режимов столкновений капель в реальных технологиях, целесообразно исследовать детально все выделенные факторы. При распылении неоднородных жидкостей (растворов, эмульсий, суспензий), часто применяющихся в самых разных технологиях, количество факторов, которые необходимо учитывать при прогнозировании, существенно увеличится. Поэтому при проведении подобных исследований важно использовать подходы и методы, позволяющие наиболее полно оценить масштабы влияния всех значимых факторов, т.е. совместно применять как подходы с аэрозольными потоками, так и идеализированными столкновениями двух капель.

3.4. Экспериментальное определение последствий взаимодействия капель воды при смешении аэрозоля с нагретым газовым потоком

Анализ видеок кадров проведенных опытов позволил сделать вывод о в целом удовлетворительном соответствии схем соударения капель с данными, полученными при проведении экспериментов с двумя сближающимися индивидуальными каплями [63,118]. В частности, в потоке воздуха с

комнатной температурой (около 20 °С) при характерных (для мишеней и снарядов) значениях чисел Вебера от 0 до 150 установлены шесть вариантов последствий их взаимодействия. При $We < 2$ регистрировались условия слияния (устойчивой коагуляции) капель или их отскоков (взаимодействия через газовую прослойку между фрагментами жидкости без их прямого контакта). За счет высокоскоростной видеорегистрации установлено, что отскок происходил при интенсивном закручивании капель и образовании в их следе зоны разрежения, т.е. существенного падения скорости и давления газов. Коагуляция регистрировалась при трансформации поверхности капель, т.е. отклонении их формы от сферической. В таких условиях (особенно при нецентральной столкновении) капли сцеплялись за счет сил поверхностного натяжения. В случае же сферических капель чаще всего происходил отскок капель друг от друга. В опытах [63,118] такие условия объяснялись образованием газовой прослойки между каплями, на преодоление которой не хватало кинетической энергии последних. Скорее всего, данная гипотеза справедлива, так как вероятность отскоков капель существенно возросла при повышении температуры воздуха (особенно много таких столкновений регистрировалось в опытах с продуктами сгорания, имеющими температуру 800–850 °С). Но, к сожалению, даже при применении высокоскоростных камер, оптических методов регистрации и Шлирен-метода не удастся установить параметры газовых и паровых оболочек вокруг интенсивно прогреваемых и испаряющихся капель воды малых размеров (до 1 мм). Поэтому можно лишь за счет установленной в настоящей работе статистики столкновений с отскоками капель обосновать гипотезу [63,118].

При $2 < We < 15$ в условиях комнатной температуры воздуха доминировала коагуляция (слияние) капель. Кинетическая энергия последних достаточна для выдавливания газовой и паровой прослойки между каплями (и их последующего слияния). Процесс соударения завершается образованием единой капли с интенсивно колеблющейся конфигурацией поверхности и даже вращением. После прохождения расстояний в газовой

среде, больших (10–15) R_d образовавшаяся капля принимает форму, близкую сферической или каплевидной, и продолжает устойчивое движение.

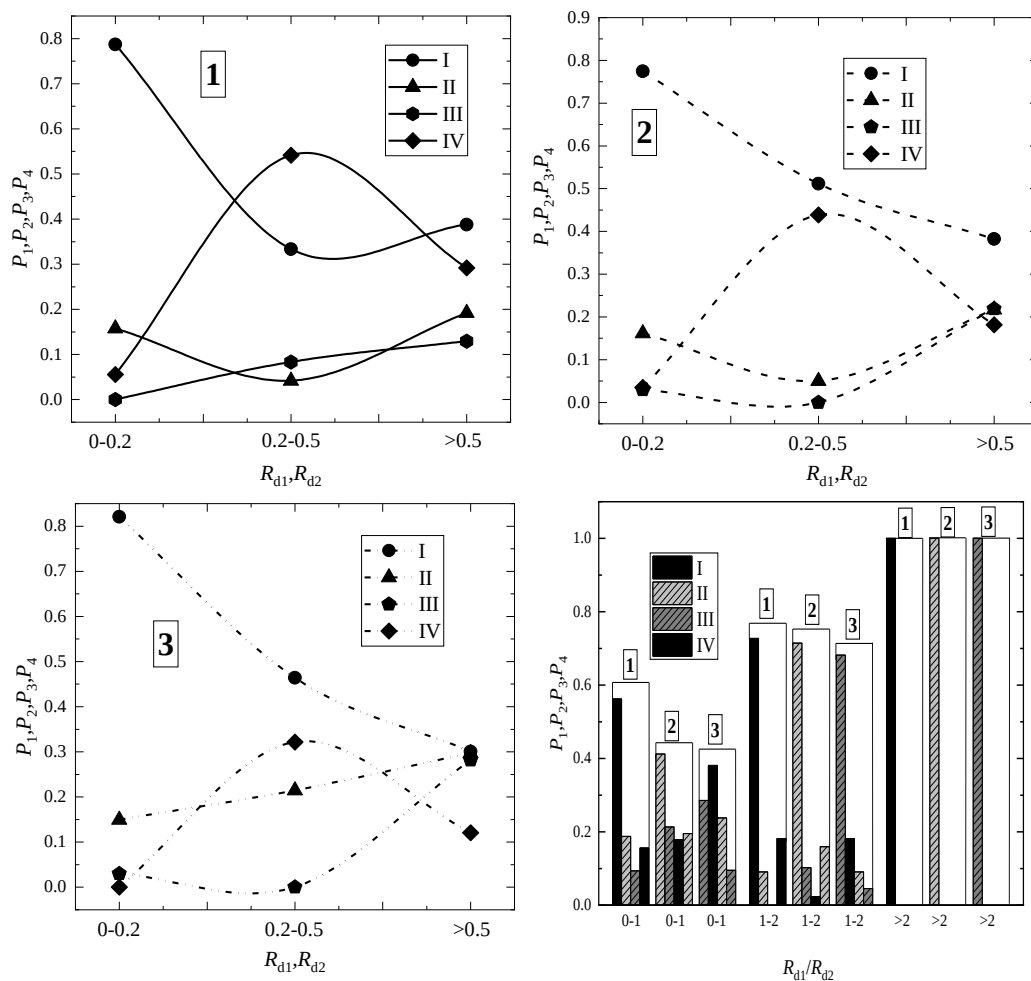
В диапазоне $15 < We < 50$ регистрировалось доминирование последствий взаимодействия капель в режиме разлета, т.е. соударения, при котором размеры двух участвующих капель хорошо соответствуют двум вновь образованным каплям. При $We > 50$ также доминировал разлет капель, но его реализация была несколько иной, чем при $15 < We < 50$. В частности, установлено, что при повышении чисел Вебера разлет происходил в режиме пробивания «капли–мишени». В целом после соударения оставались два крупных жидкостных фрагмента с размерами, соответствующими начальным, но, помимо этого, образовывались несколько мелких фрагментов. Физические причины таких отличий с учетом сил поверхностного натяжения, вязкости, инерции, трения до сих пор не установлены. Гипотезы [63,118] сформулированы более 30–40 лет назад, но до настоящего времени так и не были проведены эксперименты, обосновывающие или опровергающие соответствующие заключения. В диссертационной работе получены результаты опытов, которые обосновывают представления [63,118], но только для условия комнатной температуры воздушного потока. При нагреве газовой среды условия, характеристики и последствия взаимодействия капель существенно меняются. Далее будут выделены основные установленные закономерности.

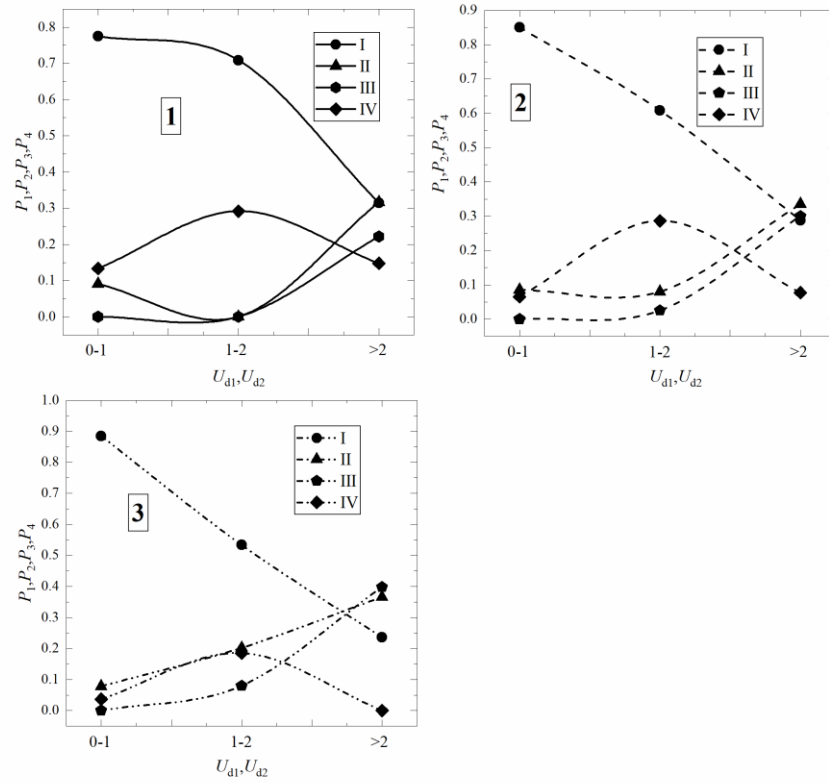
При $We > 100$ доминировали условия дробления капель с образованием капельного облака. В этом случае реализовывалась фрагментация сталкивающихся капель. При этом характеристики фрагментации (число новых капель, их размеры, траектории движения) существенно зависели не только от размеров и скоростей движения родительских капель, но и углов атаки и их форм. В частности, высокоскоростная видеорегистрация показала, что максимальное количество образующихся фрагментов жидкости с минимальными размерами соответствовало центральному столкновению несферических капель (например, блинов, эллипсоидов, парашютов). Если

сталкивались капли с такими формами не по центральной оси, а, например, по касательной или в боковой части, то фрагментация была частичной и соответствовала полному разрушению лишь зоны контакта. Условия кавитационного взаимодействия капель, рассмотренные в [63,118] не были зарегистрированы в проведенных экспериментах.

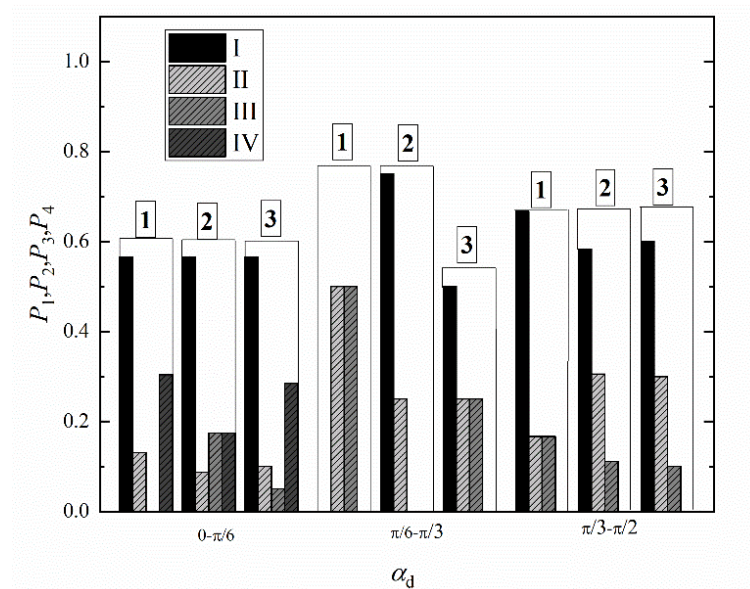
При повышении температуры и скорости движения газовой среды из шести рассмотренных выше вариантов взаимодействий капель регистрировались три: коагуляция, разлет, дробление. Условия отскока характерны лишь сонаправленному движению мелких (0.1–0.25 мм) капель с малой скоростью – до 2 м/с. Даже интенсивное испарение таких капель (эксперименты с применением бесконтактных методов Planar Laser Induced Fluorescence [122] показали, что температура поверхности таких капель достигнет 60–80 °С в течение 1.5–3 с при температуре воздуха от 300 до 800 °С) не позволяет создать устойчивую паровую оболочку при более высоких скоростях движения. Оценки экспериментальных данных по скоростям испарения [106] позволяют сделать вывод о том, что скорости парообразования могут достигать 0.05–0.15 кг/(м²с). Как следствие, максимальные линейные скорости оттока паров с учетом их плотности 0.6–0.9 кг/м³ будут достигать 0.08–0.25 м/с, что существенно ниже относительных скоростей движения капель в газовой среде (например, при 2–4 м/с). Поэтому отскок не реализовывался, а доминировала коагуляция. Также можно отметить, что образующаяся за счет прогрева и испарения вокруг капель паровая оболочка сжимала последние. Это существенно замедляло трансформацию поверхности капель, и их формы были близки к сферическим. Как следствие, соударения при высоких скоростях движения (более 7–8 м/с) и максимальных размерах (0.4–0.5 мм) капель завершались полной фрагментацией (разлетом). В диапазоне средних размеров и скоростей перемещения капель реализовывались условия устойчивого разлета капель.

На рис. 3.10 и 3.11 приведены типичные значения рассчитанных частот реализаций соударений капель для разных условий нагрева воздушного потока и продуктов сгорания с иллюстрацией переходных значений чисел Вебера (между отскоком, коагуляцией, разлетом и дроблением в соответствии с данными опытов [63,118])). Кроме того, дополнительно на рис. 3.11 представлены данные из ранних экспериментов [46].


$$a$$



б



в

Рисунок 3.10. Частота реализации последствий столкновений капель аэрозоля [123] от соотношения размеров (а), скоростей движения (б) и угла между траекториями (атаки) (в) движения последних в газовой среде с варьируемой температурой: 1 – $T_a=20^\circ\text{C}$, 2 – $T_a=200^\circ\text{C}$, 3 – $T_a=500^\circ\text{C}$: I – коагуляция; II – разлет; III – дробление; IV – отскок.

На основе рис. 3.10 и 3.11 можно сделать вывод о том, что в условиях даже комнатных температур выделенные выше границы переходов между отскоком, коагуляцией, разлетом и дроблением капель в соответствии с данными опытов [46,63,118], а также результатами теоретических и экспериментальных исследований [106–109,124] можно считать довольно условными. Это связано с тем, что при вычислении чисел Вебера учитываются лишь размеры и скорости сталкивающихся капель. Помимо этих двух параметров определяющее влияние оказывает угол атаки (рис. 3.10в). В диапазоне средних значений углов взаимодействия (от $\pi/4$ до $3\pi/4$) регистрировались практически равные вероятности всех трех исходов столкновений. При малых углах атаки доминировала коагуляция, а при больших (ближе к $\pi/2$) – дробление. Это влияние, как и реальной формы (относительно сферы) пока математически описать не удалось. Кроме того, значения переходных чисел Вебера для «капель–снарядов» и «мишеней» также существенно отличались (рис. 3.11). Данный фактор не учитывался в опытах [46,63,118], ограничивалось рассмотрением параметров снарядов. В [106–109,124] этот эффект учитывался, но при идеализированных условиях столкновений капель, т.е. с применением стендов и моделей, исключаяющих влияние соседних капель на условия их движения и взаимодействия в газовой среде.

Проведенные эксперименты показали, что чем выше температура газовой среды, тем выше вероятность коагуляции капель. Этот неочевидный результат обусловлен тем, что в диссертационной работе рассмотрены условия встречного смешения аэрозоля с разогретым потоком газов. Высокотемпературные газы существенно тормозят капли, движущиеся во фронте. Все последующие капли догоняют впереди идущие и коагулируют вследствие малых относительных скоростей (как правило, не более 2 м/с) взаимодействий.

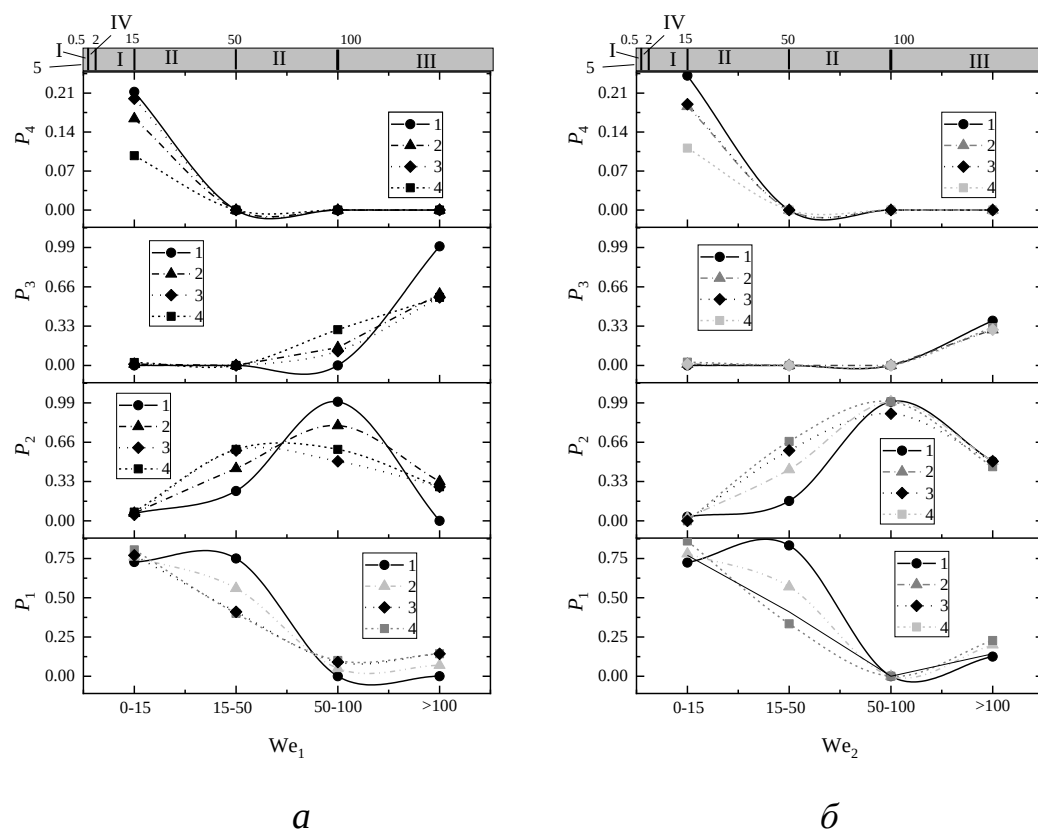


Рисунок 3.11. Частота реализации последствий столкновений капель аэрозоля (P) от чисел Вебера для мишеней и снарядов (a) и мишеней (b) в газовой среде с варьируемой температурой [123]: 1 – $T_a=20$ °C, 2 – $T_a=200$ °C, 3 – $T_a=500$ °C; 4 – данные [9, 10]. P_1 – коагуляция; P_2 – разлет; P_3 – дробление; P_4 – отскок; I – коагуляция; II – разлет; III – дробление; IV – отскок.

Установленные относительные вероятности P_1 , P_2 , P_3 хорошо соответствуют данным [46] в плане реализации разных последствий столкновений в широком диапазоне изменения чисел Вебера. Однако если анализировать численные значения P_1 , P_2 , P_3 при разных температурах нагрева газов, то разница может быть существенной во всем диапазоне изменения We . Это очень важно для корректного прогнозирования изменения структуры и компонентного состава газопарокапельного потока при нагревании. К примеру, на рис. 3.12 приведены вычисленные значения суммарной площади свободной поверхности жидкости (воды) вследствие взаимодействия капель при разных значениях We и температурах нагрева. С

их применением можно выполнять оценки, насколько возрастают значения относительных площадей при фрагментации сталкивающихся капель, а также сохраняются значения S_d при слиянии или разлете последних.

При анализе рис. 3.10 и 3.11 можно отметить, что получено в целом удовлетворительное соответствие с данными опытов [106–109] по влиянию скорости и размеров сталкивающихся капель (выражается через число Вебера), а также параметров взаимодействия (I и β), учитывающих расстояние между каплями в сравнении с суммой их размеров и углом атаки. В серии опытов и расчетов, рассмотренных в статьях [106–109], определены диапазоны изменения чисел Вебера, в которых устойчиво происходят коагуляция, разлет и дробление. Установленные в настоящей работе диапазоны, рассмотренные выше, отличаются (шире) от данных [106–109] в среднем на 18–32%. При этом аналогично опытам [106–109] регистрировались разные варианты последствий соударений капель при идентичных условиях потока, что обосновывает вероятностный характер этих процессов. Основные причины связаны с единовременным влиянием слишком большой группы факторов и эффектов, которые невозможно описать одним критерием, например, числом Вебера.

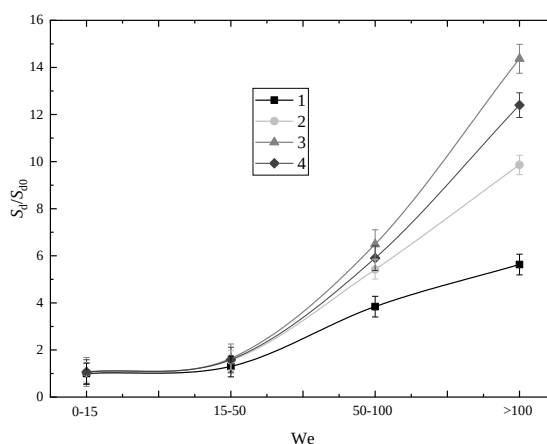


Рисунок 3.12. Возможное количество и суммарные площади поверхности капель после столкновений при разных условиях нагрева во всем диапазоне изменения We для «капель – снарядов» [123]: 1 – $T_a=20$ °C, 2 – $T_a=200$ °C, 3 – $T_a=500$ °C.

С данными [106–109] можно проводить сравнение лишь по числам Вебера, так как в этих работах выполнено обобщение для капель жидкостей и твердых частиц. Следует отметить, что в настоящей работе рассмотрены условия кратковременного смешения аэрозольного и газового потоков, при которых капли находятся в условиях нагрева не более 2–3 с и затем уносятся из области смешения. В реальных технологиях время существования капель в разогретой газовой среде может быть различным. Наиболее интересным развитием настоящей работы является изучение влияния времени нагрева капельного аэрозоля на условия взаимодействия его элементов. В таких условиях можно детально рассмотреть влияния процессов парообразования капель с одновременным применением оптических методов Planar Laser Induced Fluorescence и Laser Induced Phosphorescence, позволяющими контролировать температуру газов и жидкости. В таких условиях будет возможно учесть группу одновременно протекающих процессов, влияющих на вероятности исходов столкновений, в частности, уменьшение размеров и количество капель при испарении.

3.5. Экспериментальное определение последствий взаимодействия капель воды в газовом потоке при разной степени турбулизации

На рис. 3.13 приведены рассчитанные значения относительных вероятностей коагуляции, разлета и дробления взаимодействующих капель воды при средних (для исследованного диапазона чисел Рейнольдса). Выполнена оценка характерных чисел Лапласа ($\gg 1$) и Стокса ($\ll 1$) для иллюстрации того, что в проведенных экспериментах основное внимание необходимо уделить соотношению сил инерции и поверхностного натяжения жидкости (роль вязкости и дисперсной фазы мала). Поэтому критериальную обработку результатов опытов можно проводить с применением We взаимодействующих капель. Скорее всего, важно сконцентрировать внимание на поведении обеих сталкивающихся капель, т.е. мишеней и

снарядов (рис. 3.13). При этом важно иметь большую статистику (не менее 50–100 соударений) с идентичными последствиями при одинаковых условиях, чтобы формировать заключения о достоверности результатов и их воспроизводимости.

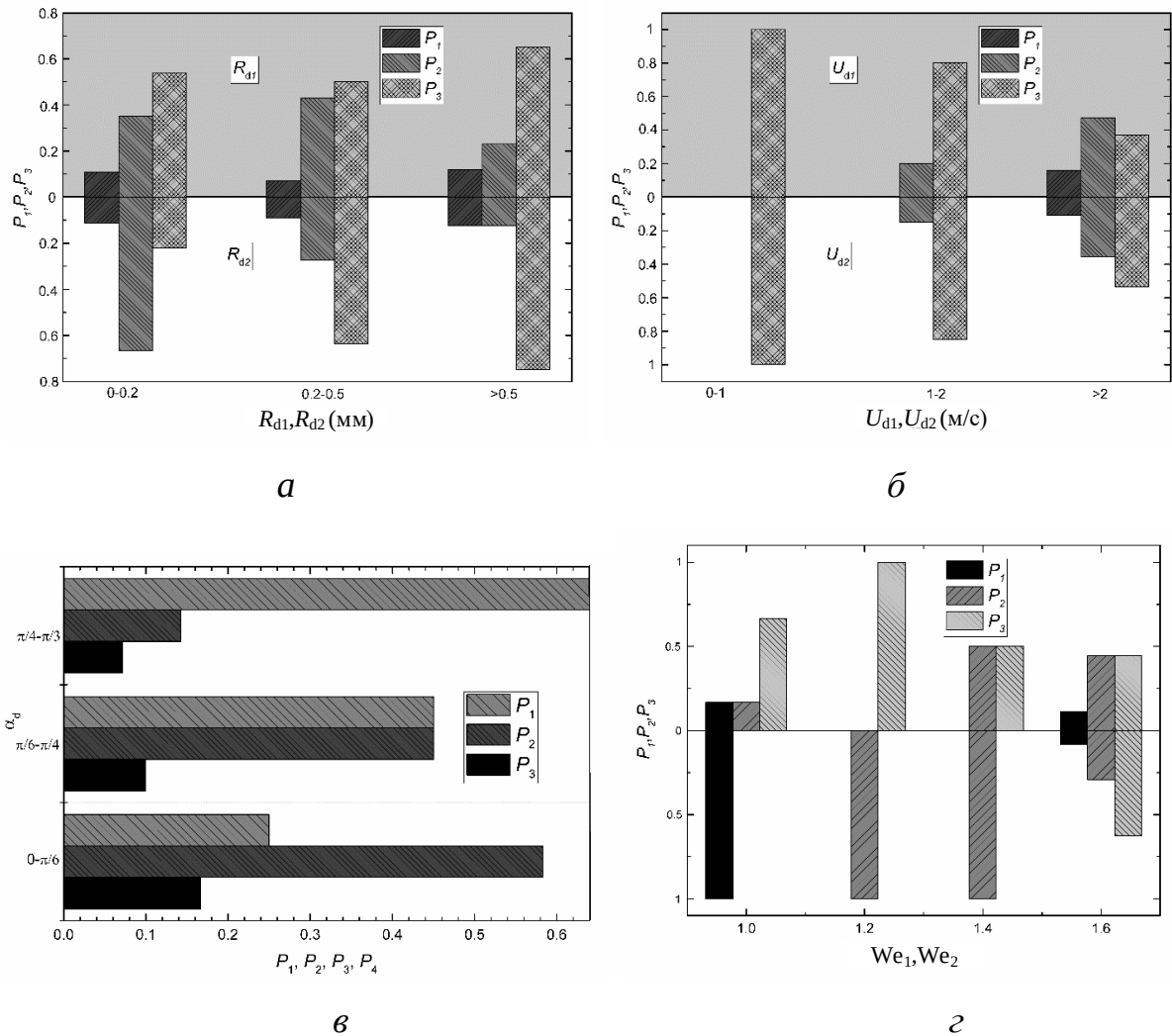


Рисунок 3.13. Влияние основных факторов на вероятность последствий столкновений капель в газовых средах (размеры, скорости, углы атаки, числа Вебера для мишеней и снарядов) при $Re \approx 2400$ [116]: *а* – размеры; *б* – скорости; *в* – углы атаки; *г* – число Вебера.

В проведенных экспериментах такие задачи выполнялись с акцентом на разные условия впрыска аэрозолей и вдува воздуха для того, чтобы обеспечить большое число столкновений капель с варьируемыми параметрами взаимодействия.

При анализе рис. 3.13 можно отметить в целом удовлетворительную корреляцию полученных результатов с данными, полученными в опытах с двумя каплями [118] и при регистрации столкновений в составе аэрозоля [46,91]. Хорошая корреляция достигнута как в диапазонах чисел Вебера, в которых доминируют условия коагуляции, дробления и разлета, так и по последовательности переходов между этими вариантами последствий взаимодействия капель. Однако, если анализировать переходные значения чисел Вебера (0–1.5 – отскок, 1.5–15 – коагуляция, 15–50 – разлет, 50–100 – разлет и дробление, выше 100 – дробление в режиме взрывного распада с образованием облака мелких жидкостных фрагментов), например, с коагуляции к разлету или с разлета к дроблению, то в проведенных экспериментах установлены значения, отличающиеся на 25–35% относительно данных [46,91]. В идеализированных условиях экспериментов с двумя каплями [118] были установлены несколько меньшие значения предельных чисел Вебера, так как по сути одна капля ударялась о другую. В опытах со смешением аэрозоля и продуктов сгорания [46,91] использована большая статистика (рассматривались выборки из не менее 50 соударений при идентичных условиях). Но в экспериментах [118] и [46,91] не было разделения результатов опытов по углам атаки. В реальных условиях угол взаимодействия и конфигурация поверхности капель оказывают влияние на последствия столкновений (в частности, на рис. 3.13 показаны принципиальные отличия значений P_1 , P_2 , P_3 для диапазона изменения угла взаимодействия от 0 до $\pi/2$).

Если сравнивать влияние размеров, скоростей движения и углов атаки на последствия столкновений капель, то более масштабно влияет скорость. Соответствующая тенденция особенно заметна в диапазоне средних скоростей движения – от 3–4 до 7–8 м/с. До 3 м/с влияние довольно слабое, а выше 8 м/с практически все столкновения завершаются дроблением капель (значения We более 100).

Анализ кадров видеogramм показал (рис. 3.14), что для условий интенсивной турбулизации газового потока процессы взаимодействия двух капель сопровождаются существенным вращательным движением последних (закручиванием относительно своего центра масс). Это приводит к частым столкновениям вращающихся капель в режиме касательных взаимодействий. Как следствие, достаточно часто регистрировались процессы разлета капель с частичной фрагментацией сталкивающихся жидкостных фрагментов, т.е. в отличие от традиционного представления о процессах разлета образовывались не две капли с размерами, соответствующими начальным размерам родительских капель, а еще от 2 до 5–7 мелких фрагментов. При высоких скоростях линейного перемещения капель и вращения размеры отлетающих фрагментов возрастали, и, как следствие, режим разлета переходил в дробление (кратное измельчение) первичных капель.

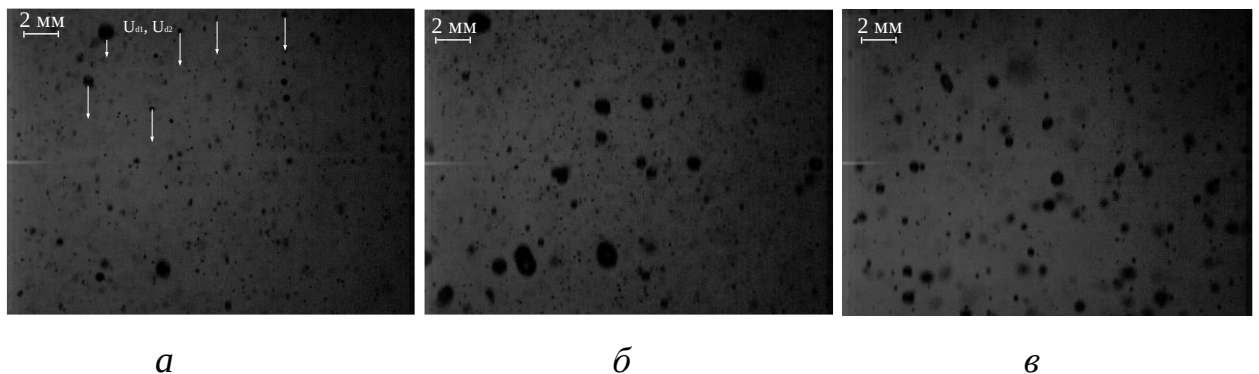


Рисунок 3.14. Типичные кадры видеogramмы со столкновениями капель воды в газовой среде при ламинарном и турбулентном режимах движения газового потока [116]: *а* – $Re=1100$; *б* – $Re=2400$; *в* – $Re=2800$.

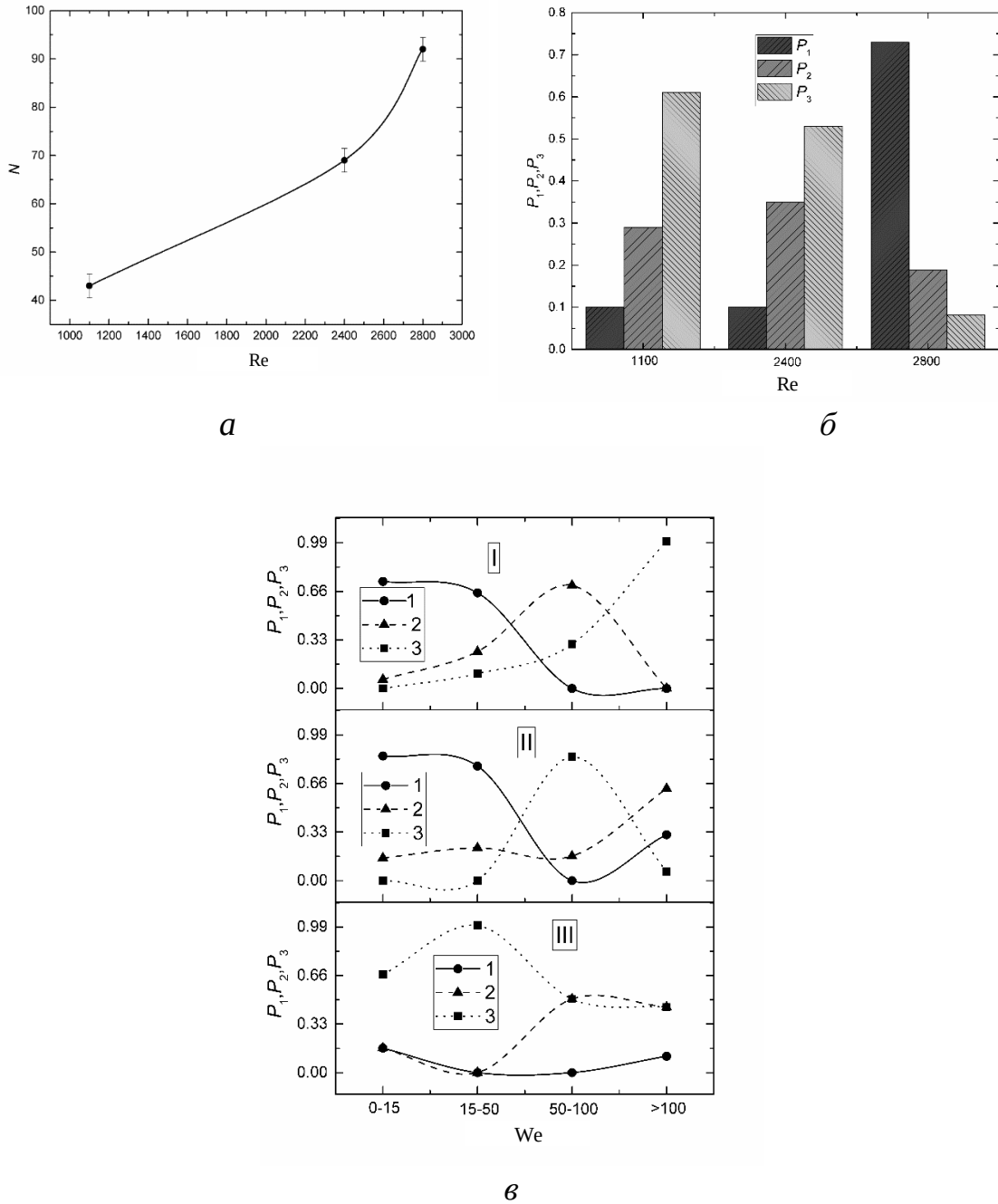


Рисунок 3.15. Влияние степени турбулизации газового потока на общее число столкновений (*a*) и частоты реализации последствий столкновений капель в газовых средах (*б, в*) [116].

На основе рис. 3.15 можно отметить существенные отличия зависимостей значений P_1, P_2, P_3 от размеров R_d , скоростей движения U_d , углов α_d и We для снарядов и мишеней. Этот результат иллюстрирует важность учета параметров обеих капель при критериальной обработке и

обобщении результатов опытов (традиционно, например, в [65,125] основное внимание уделяют параметрам «капли – снаряда», так как она имеет максимальную скорость и размеры; кроме того, за счет варьирования параметров снаряда варьируются значения основных параметров в целом в системе взаимодействующих капель).

Степень турбулизации газок капельного потока существенно влияет на суммарное число столкновений (рис. 3.15). Этот результат можно в целом считать вполне очевидным, так как происходит закручивание фрагментов жидкости в разных направлениях, образуются контуры завихрений потока, часть капель увлекается соответствующими газовыми течениями и попадает в так называемые вращательные воронки. Траектории движения вновь поступающих капель существенно отличаются от первых. Как следствие, вероятность их пересечения существенно возрастает. Можно было предположить, что в таких условиях практически все соударения будут завершаться дроблением капель. Однако статистический анализ результатов регистрации взаимодействий капель позволил получить несколько иные зависимости (рис. 3.15). Их характер обусловлен разными схемами столкновений капель: встречно, сбоку, сонаправлено. Можно сделать вывод о том, что определяющее влияние оказал угол атаки. Таким образом, в зависимости от расположения распылительных устройств даже в условиях интенсивной турбулентности газового потока можно обеспечить условия устойчивой коагуляции. При сонаправленном впрыске аэрозолей практически каждое третье-четвертое столкновение завершалось коагуляцией, несмотря на разные параметры и турбулентность газового потока. В случае же бокового взаимодействия капель регистрировались условия, хорошо соответствующие результатам экспериментов [118] с вращательными и вибрационными капиллярами (как по физике протекающих процессов, так и по диапазонам изменения чисел Вебера). Если же рассматривать встречное столкновение капель, то количество таких

взаимодействий существенно снижается при турбулизации газовых потоков за счет закручивания последних.

Полученные результаты можно использовать для прогнозирования изменения структуры и компонентного состава газопарокапельных потоков за счет реализации процессов взаимодействия капель (в рамках широких диапазонов изменения ключевых параметров: $R_d=0.1\text{--}1$ мм, $U_d=0\text{--}10$ м/с, $\gamma_d=0.001\text{--}0.002$ м³ капле жидкости в 1 м³ газа, $U_g=0\text{--}10$ м/с). В частности, по результатам обработки видеogramм оптическими методами можно с учетом установленных скоростей движения и средних размеров капель спрогнозировать вероятности столкновений капель и, соответственно, размеры и концентрацию новых капель, полученных при коагуляции, разлете или дроблении (рис. 3.16, 3.17). При дополнительном рассмотрении результатов экспериментов [65,125] можно дополнить прогностический аппарат учетом условий нагрева капель или газового потока, а также разнородных составов капель.

Если проводить сравнение измельчения капель жидкостей вследствие перегрева до температур кипения (например, в [11,13,114,126]), то значительный и тем более кратный рост площади поверхности жидкости в газовой среде за счет измельчения капель можно обеспечить лишь в системе с существенно неоднородными каплями жидкости. При этом компоненты данных капель должны иметь значительно отличающиеся температуры кипения и концентрации компонентов. Например, в [11,13,114,126] показано, что для измельчения капель, содержащих воду и масло или воду и дизель, необходимо нагревание неоднородных капель до температур от 630 до 830 °С. При максимальных температурах нагрева при конвективном, кондуктивном или радиационном нагреве можно обеспечить взрывной (в течение времени менее 1 с) распад капли с образованием облака мелких фрагментов жидкости, и площадь поверхности жидкости (S_1 относительно начального значения S_0) возрастает в 30–120 раз. Встречное распыление аэрозолей не позволит обеспечить такое значительное повышение данного

параметра, но в 5–10 раз увеличить соответствующие площади поверхности жидкости можно. Для группы реальных технологий этого вполне достаточно. Расходы на реализацию такого подхода измельчения существенно ниже, чем при вскипании компонентов жидкостей, изученном в [11,13,114,126].

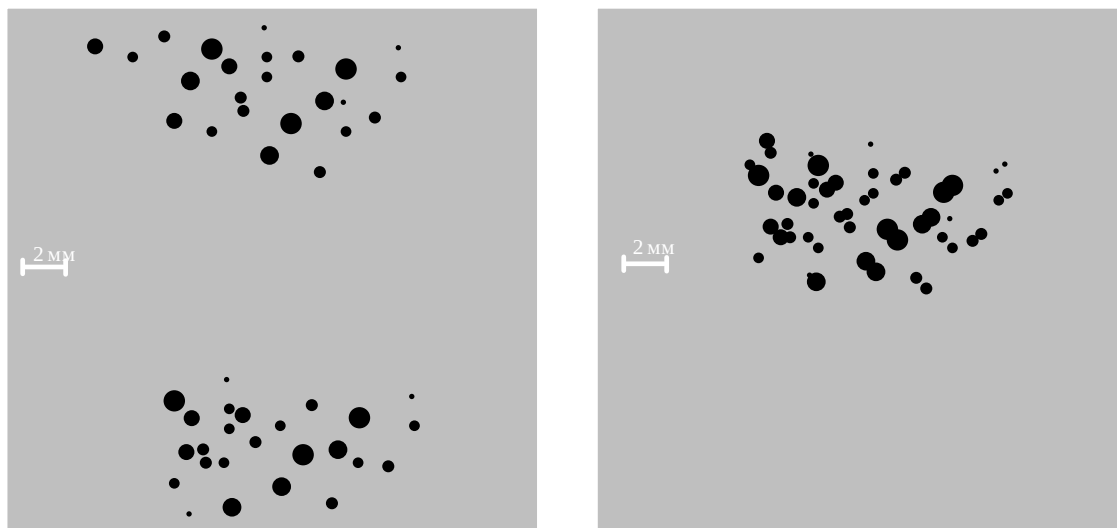


Рисунок 3.16. Видеограммы и результаты их обработки с типичными изменениями структуры и состава газопарокапельного потока вследствие столкновений капель

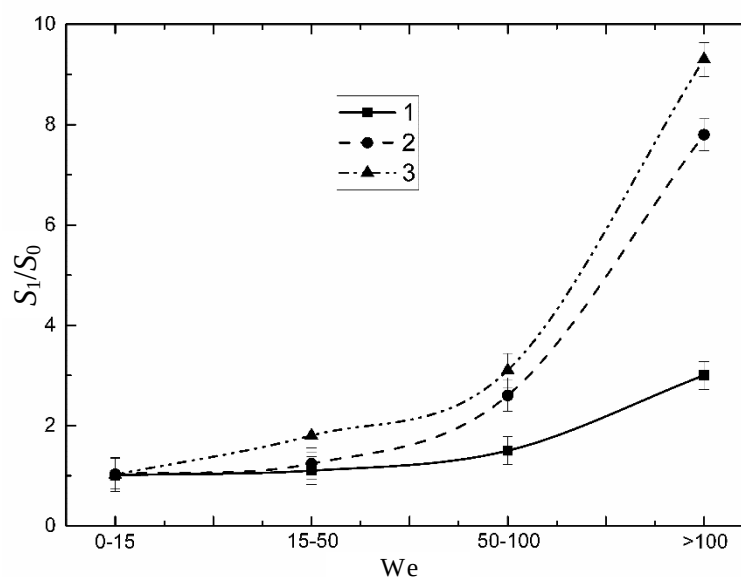


Рисунок 3.17. Значения суммарной площади поверхности жидкости, вычисленные по результатам столкновений капель при разной степени турбулизации потока [116]: 1 – $Re = 1100$; 2 – $Re = 2400$; 3 – $Re = 2800$.

Получено удовлетворительное соответствие с данными опытов [106,127–129] по влиянию скорости и размеров сталкивающихся капель (выражается через число Вебера), а также параметров взаимодействия (I и β), учитывающих расстояние между каплями в сравнении с суммой их размеров и углом атаки. Основное отличие состоит в том, что в настоящей работе впервые установлено влияние Re для натекающего потока на относительные вероятности последствий столкновений капель.

Результаты прогнозирования параметров газопарокапельных потоков (рис. 3.16, 3.17) представляют большой интерес для повышения эффективности газопарокапельных технологий, так как становится возможным обеспечить требуемый компонентный состав (за счет контролируемой коагуляции, разлета и дробления) соответствующих потоков. Наиболее перспективными приложениями применения результатов экспериментов можно считать теплообменные технологии испарения и конденсации в теплоэнергетических трактах, узлах, блоках и агрегатах. Для развития этих приложений важной задачей развития диссертационной работы является переход к опытам с многокомпонентными капельными аэрозолями и воспроизведением условий интенсивных фазовых превращений и химического реагирования.

3.6. Экспериментальное определение характеристик вторичного измельчения капель воды с газовыми пузырьками

При обработке полученных видеограмм выделены отличительные особенности взаимодействия капель дистиллированной воды без нагрева, а также нагретой до состояния кипения и газонасыщенной жидкости, которые продемонстрированы на рис. 3.18. Анализ видеограмм (рис. 3.18) проведенных опытов с каплями трех типов жидкостей показал, что имеются существенные отличия условий и закономерностей взаимодействия капель практически во всех четырех режимах соударений. В частности, при

рассмотрении режимов коагуляции и отскока установлено несколько важных особенностей в сравнении с соударением капель воды без пузырьков (рис. 3.18а). Капли с пузырьками паров (рис. 3.18б) и CO_2 (рис. 3.18в) достаточно существенно трансформируются относительно сферической формы. Поэтому площадь их контакта при соударении больше, чем при рассмотрении капелек без пузырьков. Однако вследствие наличия данных пузырьков в капле ее эффективная плотность ниже. Как следствие, кинетическая энергия каждой из соударяющихся капель ниже, чем в случае капель без пузырьков. Поэтому при сопоставимых значениях числа Вебера капли с пузырьками отскакивают друг от друга, а не коагулируют, как капли без пузырьков. Также достаточно важную роль играет фактор выхода паров воды и CO_2 из капли вследствие выдавливания жидкостью. Чем интенсивнее деформация поверхности капли и выше скорость ее движения, тем выше скорости внутрикапельной конвекции. Это приводит к тому, что пузырьки закручиваются в капле, они перемещаются от центра к поверхности вследствие меньшей плотности по сравнению с жидкостью и выходят из капли. Как следствие, в малой окрестности поверхности капли формируется парогазовая смесь, давление которой выше, чем окружающего воздуха. Этот фактор приводит к тому, что сближающиеся капли замедляют относительное движение перед соударением. Как следствие, при малых значениях числа Вебера капли не коагулировали, а отскакивали друг от друга. При этом в случае наличия пузырьков в отскакивающих каплях последние принимали формы, существенно отличающиеся от сферы, и имели малые скорости движения. Поэтому маловероятна их последующая фрагментация в процессе свободного падения.

При анализе же кадров видеogramм с режимами разлета и дробления капель, насыщенных пузырьками пара или CO_2 , установлено, что для данных капелек характерны условия формирования большего количества вторичных капелек (рис. 3.18б, в). Можно выделить несколько причин. Во-первых, положение пузырьков в каждой из капель крайне непостоянное. Это

приводит к существенному изменению плотности, вязкости и поверхностного натяжения жидкости на разных участках зоны контакта и слоях соударяющихся капель. Нередко регистрировались условия существенного измельчения одного из слоев и практически монолитное состояние двух и, наоборот. Во-вторых, отрывающиеся жидкостные фрагменты также содержали пузырьки. Поэтому они с обволакивающим слоем жидкости в виде цепного характера быстро фрагментировали, создавая группу мелких капелек.

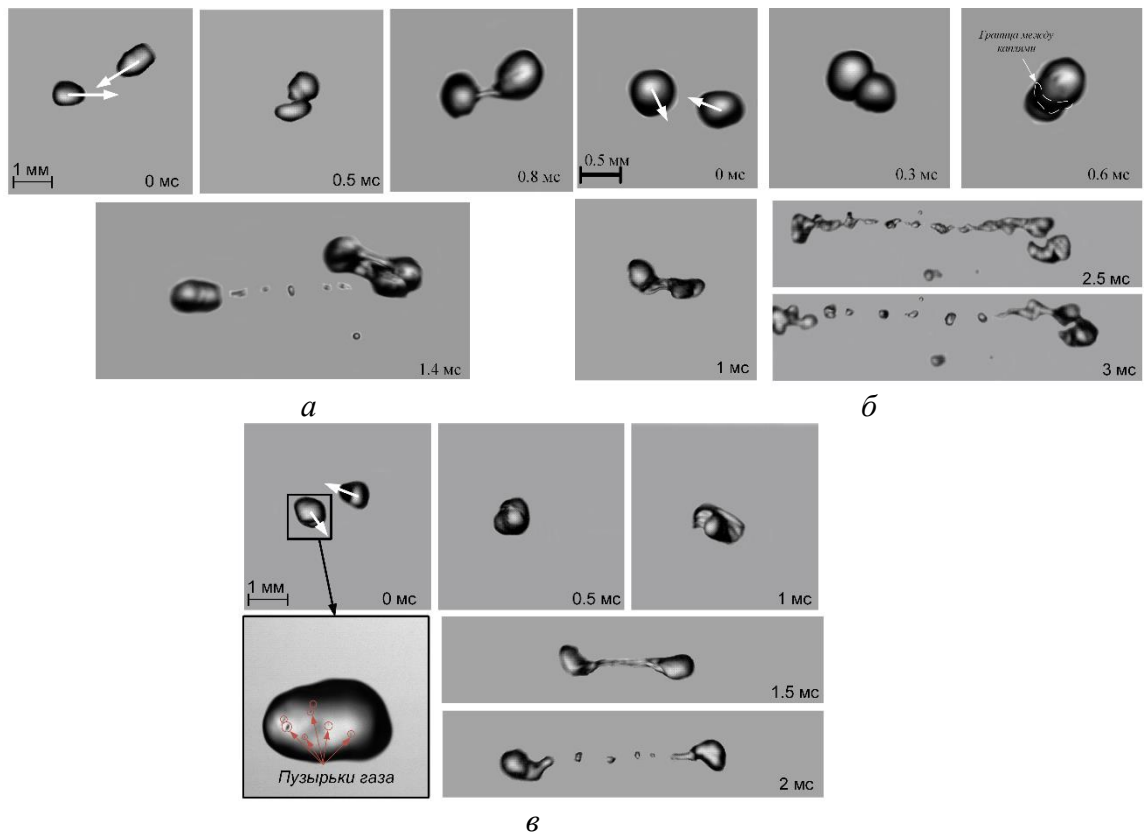


Рисунок 3.18. Кадры видеogramм проведенных опытов [130]: а – дистиллированная вода при $T_d \approx 20^\circ\text{C}$; б – дистиллированная вода при $T_d \approx 90^\circ\text{C}$ (с паровыми пузырьками); в – газонасыщенная вода при $T_d \approx 20^\circ\text{C}$ (с пузырьками CO_2).

В-третьих, существенно отличались условия фрагментации капель, содержащих пузырьки пара и пузырьки CO_2 . Пузырьки пара, высвобождаясь с поверхности капли, увлекали за собой определенные слои жидкости и

создавали большую группу мелких капель. Скорее всего, вследствие конденсации данный процесс усиливался, как показано на рис. 3.18б.

Следует отметить, что при детальном рассмотрении контактирующих слоев соударяющихся капель установлены условия смещения слоев с разной во времени скоростью. Это обусловлено непостоянной плотностью капель вследствие наличия пузырьков. Также регистрировались случаи отскока, схлопывания и коагуляции пузырьков в составе как соударяющихся, так и вторичных капель, что дополнительно интенсифицировало их трансформацию и последующую фрагментацию. Общая закономерность видеограмм опытов с пузырьками пара и CO_2 состоит в том, что слои жидкости во вторичных каплях содержат меньше пузырьков вследствие их достаточно интенсивного вытеснения слоями жидкости при возрастающем давлении в соударяющихся каплях. Поэтому при рассмотрении кадров опытов с несколькими взаимодействиями одних и тех же капель после 3–5 соударений в их составе не регистрировались пузырьки.

Установленные при анализе кадров видеограмм отличия в количестве вторичных капелек (рис. 3.18) при соударениях исходных обусловлены несколькими причинами. Во-первых, пузырьки снижают плотность слоев жидкости, в которых они присутствуют. Соответственно, они трансформируют как исходные, так и вторичные капли относительно сферической формы. Как следствие, возрастают действующие силы аэродинамического сопротивления. Во-вторых, межфазное и поверхностное натяжение жидкости снижаются. Это приводит к тому, что при меньших внешних и внутренних напряжениях обеспечиваются условия интенсивной трансформации жидкостных слоев. В-третьих, вследствие выхода пузырьков с поверхности капли определенная доля жидкости устремляется за ними в виде оболочки. На кадрах видеограмм они представляют такие же вторичные капельки, что и без пузырьков. Но при рассмотрении треков движения вторичных капель регистрировались интенсивные дополнительные трансформации именно вторичных капелек, содержащих пузырьки.

Последние схлопывались, и вторичные капли становились еще мельче. В-четвертых, нагрев жидкости до температуры, близкой к кипению, способствовал снижению плотности, вязкости и поверхностного натяжения. Как следствие, даже и без фактора формирования паровых пузырьков количество вторичных фрагментов было бы выше. Скорее всего, разница между количеством вторичных капель для кривых 2 и 3 на рис. 3.19 и показывает в первом приближении роль двух факторов: наличия пузырьков; снижения плотности, вязкости и поверхностного натяжения. В-пятых, фактор нагрева жидкости интенсифицировал процесс испарения капель (особенно мелких вторичных).

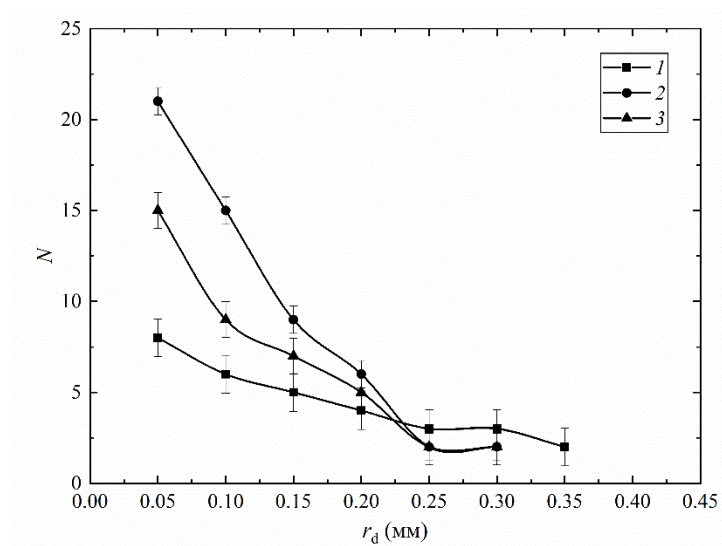


Рисунок 3.19. Распределения вторичных капелек по размерам [130]: 1 – дистиллированная вода при $T_d \approx 20$ °C; 2 – дистиллированная вода при $T_d \approx 90$ °C (с паровыми пузырьками); 3 – газонасыщенная вода при $T_d \approx 20$ °C (с пузырьками CO_2).

Соответственно, средний размер вторичных капель становился меньше и вследствие влияния данного фактора. Но, несмотря на это, суммарная площадь поверхности жидкости оставалась выше, чем в случае соударения капель воды без нагрева. Можно предположить, что скорее всего в высокотемпературных газопарокапельных камерах вследствие высоких

скоростей парообразования размеры вторичных капель будут существенно уменьшаться и их количество будет ниже, чем показано на рис. 3.19.

При рассмотрении данных на рис. 3.19 и 3.20 следует отметить сохраняющуюся тенденцию, состоящую в более интенсивном дроблении капель, содержащих пузырьки. Но если анализировать характер кривых, то важно отметить сохраняющуюся разницу между значениями S_1/S_0 для трех разновидностей капель во всем диапазоне изменения числа Вебера. Это обусловлено главным образом тем, что во всех режимах фрагментации капель пузырьки способствовали дополнительному измельчению. Как следствие, средний размер вторичных капель во всем диапазоне варьирования We в случае газо- или паронасыщенных капель был ниже, а суммарная площадь поверхности вторичных капель выше.

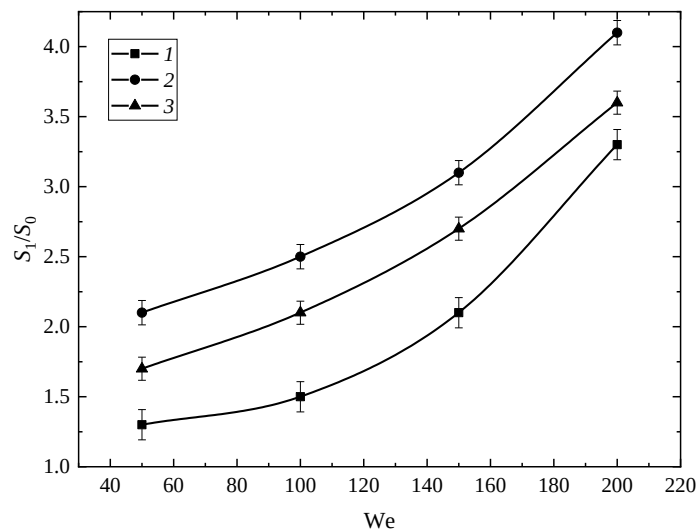


Рисунок 3.20. Зависимости отношения свободных площадей поверхности после и до измельчения от числа Вебера [130]: 1 – дистиллированная вода при $T_d \approx 20$ °C; 2 – дистиллированная вода при $T_d \approx 90$ °C (с паровыми пузырьками); 3 – газонасыщенная вода при $T_d \approx 20$ °C (с пузырьками CO_2).

Аналогично ранним экспериментам [131] установлено, что при $We > 200$ отношение S_1/S_0 достигает некоторого асимптотического значения, что иллюстрирует нерациональность дальнейшего роста числа Вебера при реализации технологий вторичного измельчения капель жидкостей даже в

условиях их насыщения пузырьками пара или CO_2 . Но, как и показано на рис. 3.20, эти асимптотические значения выше для разогретых капель, насыщенных пузырьками пара.

На картах режимов соударений (рис. 3.21) хорошо видно существенное отличие положения тройной точки (пересечение границ трех режимов: коагуляция, разлет и дробление) при сравнении характеристик соударений капель воды с пузырьками пара и CO_2 . Также достаточно существенно отличается положение границы отскока капель. Это обусловлено влиянием группы факторов, часть из которых была прокомментирована выше при описании установленных на кадрах видеogramм (рис. 3.18) особенностей. Дополнительно целесообразно отметить, что карты режимов в системе координат $B(We)$ позволяют проанализировать соотношение сил и совместное влияние группы факторов на характеристики процессов соударений. В частности, смещение вправо положения границ режимов соударений и тройной точки по координате We иллюстрирует доминирование сил инерции над силами поверхностного натяжения. В частности, на рис. 3.21 хорошо видно, что для дробления капель воды без насыщения пузырьками пара и CO_2 (вследствие большей плотности, вязкости и поверхностного натяжения) требуются большие силы инерции. Для перехода между режимами отскока и коагуляции капель воды с пузырьками пара и CO_2 также необходимо обеспечить рост сил инерции. Это обусловлено тем, что необходимо преодоление буферного парогазового слоя между сближающимися каплями, его разрушение, вытеснение газов из зоны контакта капель. Так как давление в пузырьках пара и CO_2 выше давления окружающего воздуха, то для преодоления данной парогазовой области необходимо увеличивать результирующие скорости движения капель. Также важно отметить существенно немонотонный характер кривых $B(We)$ – границ режимов соударений капель, насыщенных пузырьками пара и CO_2 , в отличие от опытов с каплями дистиллированной воды. Это главным образом обусловлено влиянием фактора существенной несферичности капель,

насыщенных пузырьками пара и CO_2 . Чаще всего они имели форму тела вращения, даже более сложной по геометрии, чем эллипсоид или условный жидкий диск. Соответственно, при вычислении среднего размера (по четырем измерениям диаметра в разных сечениях) в серии опытов регистрировался рассев значений среднего радиуса, который учитывался при вычислении значения числа Вебера. Поэтому каждая вершина выпуклости и вогнутости для кривых $B(\text{We})$ – границ режимов соударений соответствовала результатам обработки серии опытов.

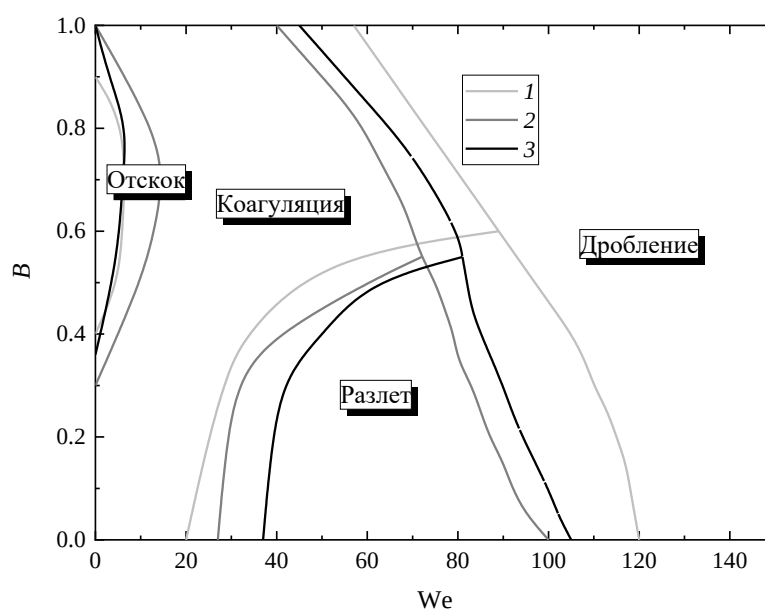


Рисунок 3.21. Карта режимов соударений капель [130]: 1 – дистиллированная вода при $T_d \approx 20^\circ\text{C}$; 2 – дистиллированная вода при $T_d \approx 90^\circ\text{C}$ (с паровыми пузырьками); 3 – газонасыщенная вода при $T_d \approx 20^\circ\text{C}$ (с пузырьками CO_2).

Целесообразно сравнить результаты диссертационной работы с результатами других авторов. Так, по результатам [132] можно сделать вывод о том, что режим коагуляции доминирует в диапазоне We 20–50. Режимы дробления и разлета наблюдаются во всем диапазоне We , однако отличаются значениями линейного параметра. Для дробления B лежит в интервале от 0.3 до 1, а для разлета – от 0 до 0.3. Анализ рис. 3.21 показывает, что в целом результаты, полученные в настоящей работе и опытах [125], близки.

3.7. Влияние вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкости на режимы и последствия столкновений капель

При увеличении вязкости жидкости зарегистрировано относительно небольшое смещение границ переходов к дроблению и разлету от режима коагуляции в сторону больших чисел Вебера (рис. 3.22). Так, граница разлета для капель воды начинается при числе Вебера, равном 40, в то время как для раствора глицерина критическое число Вебера при разлете начинается с 50. Граница дробления для раствора глицерина также имеет довольно небольшое смещение относительно капель воды ($\Delta \approx 6\%$) в сторону роста значений We . При этом наблюдается снижение значения безразмерного линейного параметра взаимодействия для тройной точки (пересечение границ коагуляции, разлета и дробления). Так, при минимальной вязкости тройная точка соответствует значению $B \approx 0.6$, в то время как при увеличении вязкости ее положение смещается до $B \approx 0.5$. Довольно существенное снижение критического (переходного между режимами) значения безразмерного линейного параметра взаимодействия B наблюдается для границы отскока. Капли раствора глицерина отскакивают при меньших значениях B относительно капель воды. Но можно заметить, что увеличение содержания глицерина в растворе не приводит к дальнейшему смещению границы отскока по критическим значениям безразмерного линейного параметра, т.е. изменение критического значения We имеет асимптотический характер. Установленную особенность можно объяснить тем, что режим отскока происходит при довольно малых числах Вебера (менее 5) и, соответственно, небольших значениях относительной (результатирующей) скорости движения капель (как правило, не выше 1.5 м/с). При таких условиях силы инерции существенно ниже сил поверхностного натяжения. Изменения вязкостных сил за счет варьирования концентрации глицерина в составе водяного раствора не могут существенно изменить баланс сил. Преобладание сил поверхностного натяжения остается.

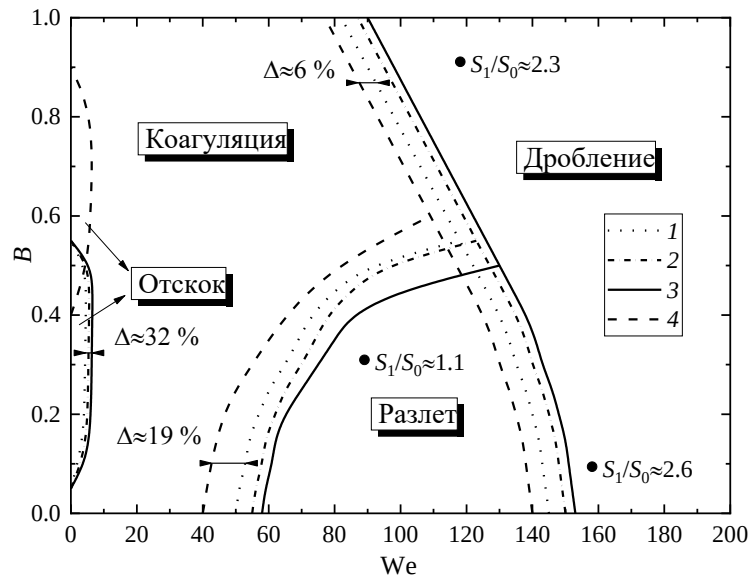


Рисунок 3.22. Влияние вязкости жидкости на границы переходов между областями, соответствующими различным режимам соударений капель [133]: 1 – 10 об% глицерина, 90 об% вода; 2 – 25 об% глицерина, 75 об% вода; 3 – 50 об% глицерина, 50 об% вода; 4 – вода. Дополнительно указаны типичные значения отношения площадей поверхности жидкости при измельчении вследствие соударений S_1/S_0 .

При увеличении вязкости жидкости регистрировалось образование более крупных по размеру вторичных фрагментов, что хорошо видно на рис. 3.23. Чем выше вязкость начальной жидкости, тем более крупные фрагменты образуются в ходе вторичного распада капель. Фрагменты быстро принимают сферическую форму. Вязкостные силы преобладают над вращательными силами в капли, минимизируя длительности и амплитуду изменения форм вторичных фрагментов в циклах деформации [112]. Чем выше вязкость, тем меньше диапазоны изменения продольных и поперечных размеров вращающихся и трансформирующихся (вследствие растягивания и сжатия) капель [112]. Это способствует более быстрым переходам в рамках цикла деформации по последовательности [112]: сфера – эллипсоид – сфера – блин – сфера. Поэтому после соударения не происходит дальнейшей фрагментации, так как капли имеют сферическую форму, что не позволяет

реализовывать разделение на более мелкие части. За счет этого увеличивается количество крупных фрагментов ($r_d > 0.2$ мм), а маленьких, наоборот, снижается.

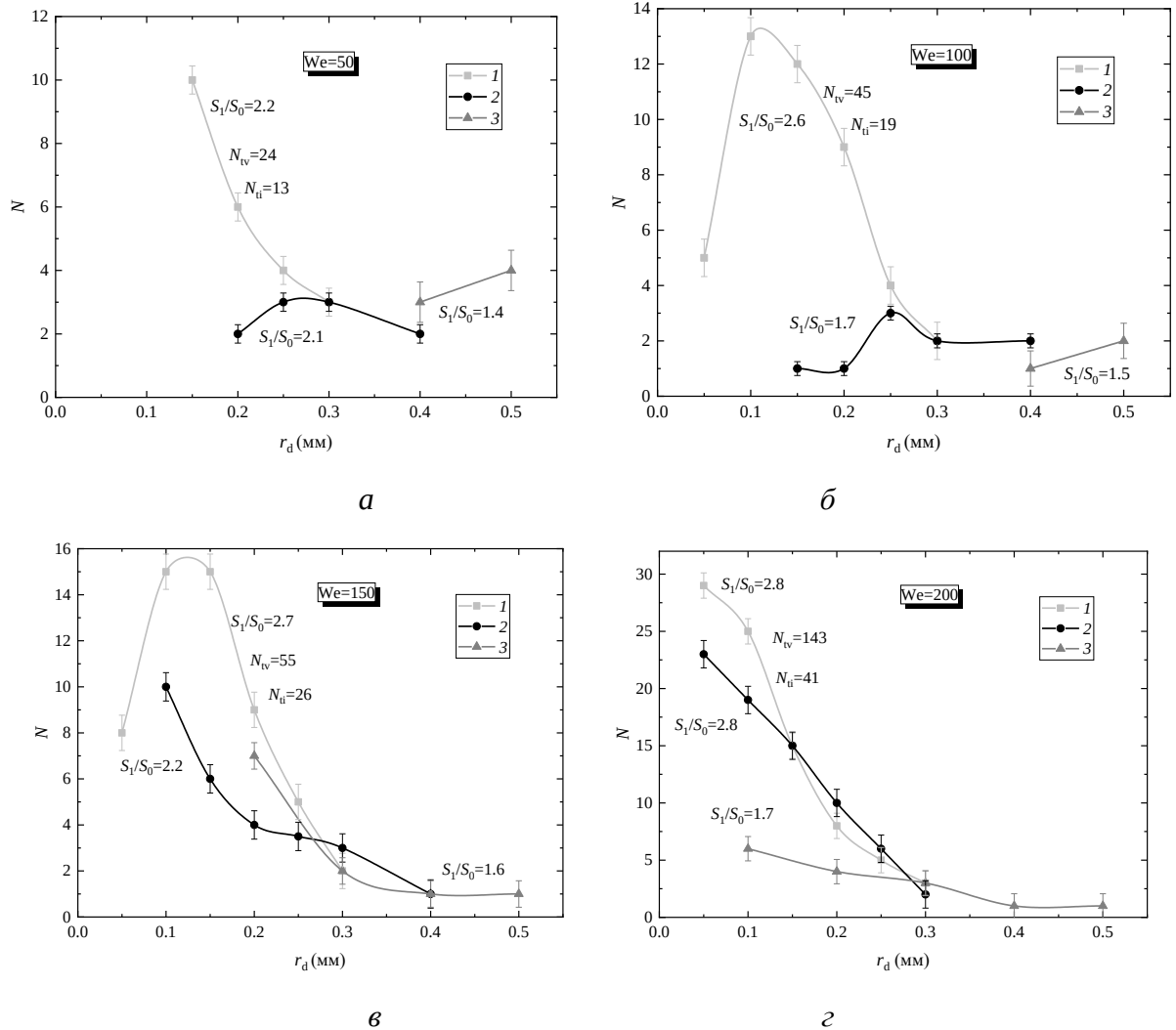


Рисунок 3.23. Распределения образованных фрагментов жидкости по размерам при $R_d=0.3–0.7$ мм и $U_{rel}=0.9–3.5$ м/с и использовании составов с варьируемой вязкостью жидкости [133]: 1 – 10 об% глицерина, 90 об% вода; 2 – 25 об% глицерина, 75 об% вода; 3 – 50 об% глицерина, 50 об% вода.

Такое явление приводит к снижению отношения площади свободной поверхности жидкости после и до фрагментации. Таким образом, проведенные эксперименты обосновали, что для интенсивной вторичной фрагментации каплей целесообразно использовать жидкостные составы с малой вязкостью. Это заключение справедливо во всем использованном

широком диапазоне (до 200) варьирования интегрального параметра – числа Вебера.

В тоже время выполненная видеорегистрация при высоких результирующих (относительных) скоростях движения капель (соответственно, при $We > 150$) позволила установить довольно неочевидный результат. Последний заключается в том, что при высоких значениях We отличия размеров вторичных фрагментов при использовании составов с разной вязкостью становятся незначительными. При этом в некоторых экспериментах даже средние размеры вторичных фрагментов были несколько ниже при изучении соударений капель с большей вязкостью. Этот неочевидный результат обусловлен тем, что чем выше вязкость, тем значительнее силы внутреннего трения, и с большей кинетической энергией снаряд взаимодействует с мишенью. Это приводит к тому, что снаряд пробивает мишень с формированием перешейка между ними, который и распадается с образованием большой совокупности вторичных фрагментов. Поэтому можно сделать вывод о больших перспективах использования в промышленных теплоэнергетических устройствах, в которых снаряды представлены жидкостями с существенно большей вязкостью по сравнению с мишенями.

В ходе изучения влияния поверхностного натяжения жидкости (рис. 3.24) на положение границ переходов между режимами соударений капель установлено, что с уменьшением поверхностного натяжения в два раза граница дробления смещается в сторону меньших значений числа Вебера на $\Delta \approx 67\%$. Аналогичный эффект зарегистрирован и для границы разлета, смещение которой составило $\Delta \approx 63\%$. Такое положение границ объясняется снижением предельного (критического) значения кинетической энергии, необходимой для преодоления сил поверхностного натяжения капель.

Довольно интересным представляется неравномерное смещение границ переходов между режимами в диапазоне $0 < B < 1$ (рис. 3.24). Установленные особенности важны, с точки зрения прогнозирования условий существенных

и незначительных изменений карт режимов соударений при рассмотрении жидкостей с разными свойствами. Используя приведенные на рис. 3.24 границы переходов, можно выполнять оценки потенциального варьирования не только критических значений B и We , но и изменения вида карт режимов соударений.

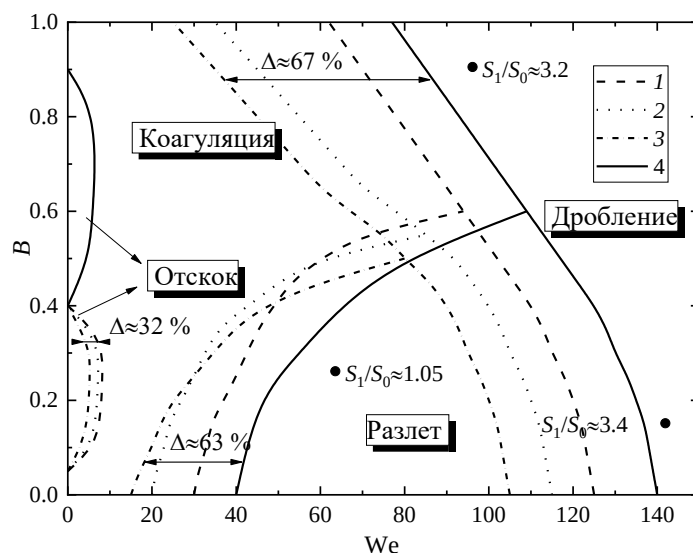
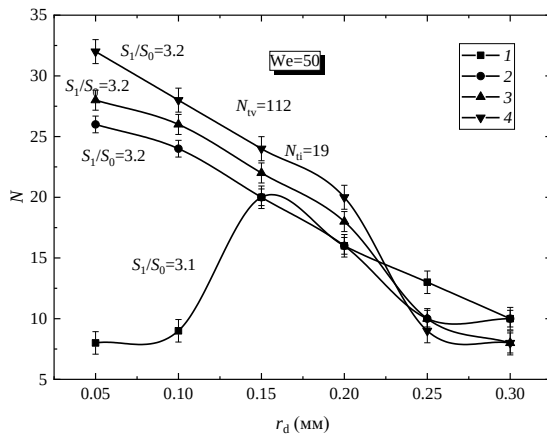


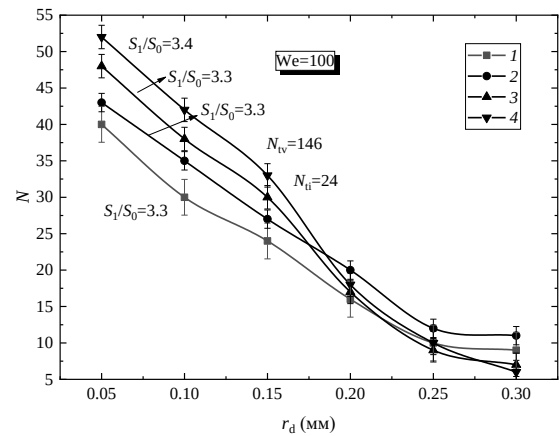
Рисунок 3.24. Влияние поверхностного натяжения жидкости на границы переходов между областями, соответствующими различным режимам соударений капель [133]: 1 – 0.5 об% Твин-80, 99.5 об% вода; 2 – 0.5 об% твин-20, 99.5 об% вода; 3 – 0.5 об% Неонол, 99.5 об% вода; 4 – вода.

На рис. 3.25 приведены распределения размеров образованных капель по размерам. Установлено, что с уменьшением поверхностного натяжения увеличивается количество образованных фрагментов. Это связано с переходом части энергии, расходуемой на преодоление сил поверхностного натяжения, в кинетическую. Чем выше значения результирующей (относительной) скорости движения капель, тем слабее становятся данные эффекты, так как кинетическая энергия в зоне контакта капель и так имеет очень высокие значения. Поэтому (рис. 3.25d) при фиксированных радиусах капель и результирующей скорости наблюдается рост количества фрагментов при понижении поверхностного натяжения.

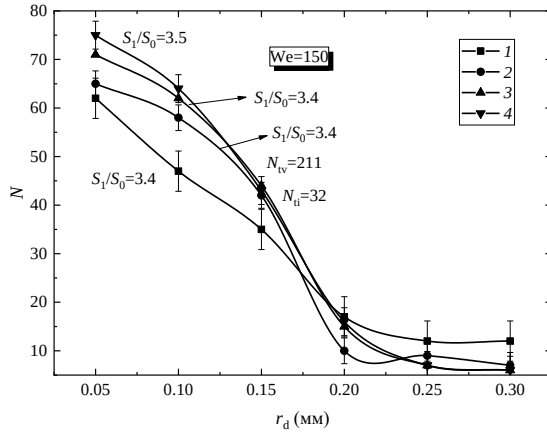
Целесообразно отметить некоторые синергетические эффекты, зарегистрированные в опытах с каплями жидкостей при варьировании их поверхностного натяжения. Они состоят в том, что снижение поверхностного натяжения жидкости вызывает ряд существенных изменений в системе «две соударяющиеся капли — газовая среда». Во-первых, при понижении поверхностного натяжения ослабевают силы, сдерживающие приповерхностные слои.



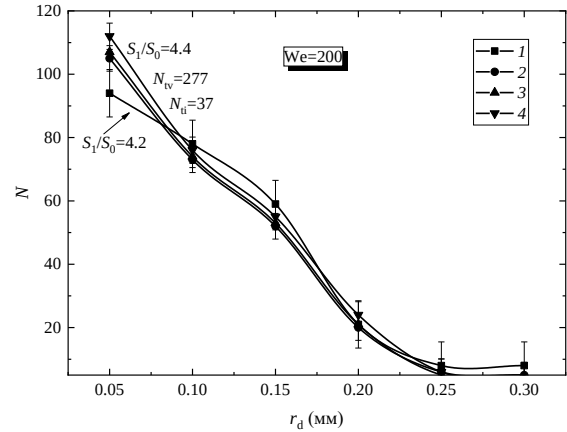
а



б



в



г

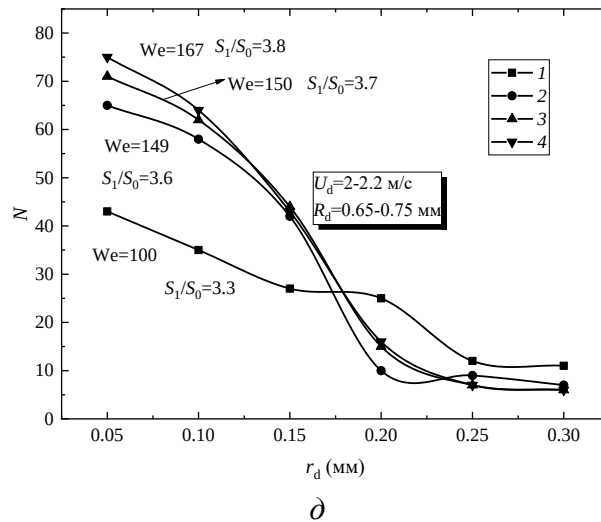


Рисунок 3.25. Распределения образованных фрагментов жидкости по размерам при $R_d=0.6-1$ мм и $U_{rel}=0.6-3.5$ м/с и использовании составов с варьируемым поверхностным натяжением [133]: 1 – вода; 2 – 0.5 об% Твин-20, 99.5 об% вода; 3 – 0.5 об% твин-80, 99.5 об% вода; 4 – 0.5 об% Неонол, 99.5 об% вода.

Последние имеют волнообразную структуру и наполняются пузырьками воздуха, которые интенсивно фрагментируют при контакте с соседней каплей. Во-вторых, вследствие уменьшения поверхностного натяжения происходит существенная трансформация поверхности капли относительно сферической формы. Как правило, капли принимают формы эллипсоидов, жидких дисков, парашютов. В таком состоянии капли крайне неустойчивы в газовой среде, и для их разрушения достаточны относительно небольшие аэродинамические силы. Поэтому они начинают интенсивно фрагментировать еще до соударения с соседней каплей, а процесс взаимодействия лишь дополнительно увеличивает степень измельчения жидкостных фрагментов. В-третьих, снижение поверхностного натяжения способствует росту как продольных и поперечных размеров трансформирующихся капель жидкости, так и длительности циклов деформации. При соударении капель на разных стадиях цикла деформации регистрировались эффекты закручивания формирующегося перешейка

между мишенью и снарядом. Это приводило не только к повышению интенсивности фрагментации самого перешейка, но и снаряда и мишени, так как от перешейка отрывались фрагменты с разными размерами, скоростями и траекториями движения и при соударении с окружающими капельками жидкости дополнительно их измельчали или закручивали. При таких условиях кинетическая энергия в зоне соударения каждой образованной капли существенно увеличивается. Как следствие, повышается частота дробления жидкостных фрагментов. При этом чаще всего регистрировался цепной характер.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что уменьшение поверхностного натяжения жидкости способствует не только понижению требуемых для вторичного измельчения значений скоростей движения и размеров капель, но и формированию мелкодисперсного жидкостного аэрозоля. В тоже время из анализа зарегистрированных распределений капель по размерам можно сделать вывод о том, что полидисперсная структура аэрозоля сохраняется во всех опытах.

Следует отметить, что как таковое свойство и термин «межфазное натяжение» имеет смысл вводить в рассмотрение лишь в многокомпонентных каплях, когда условия фрагментации последних зависят не только от приложенных снаружи сил инерции, но и межмолекулярных взаимодействий на границе раздела жидкостей. Чем выше межфазное натяжение, тем крепче межмолекулярные связи, и нередко для разрушения мультикомпонентных капель требуются даже существенно большие силы инерции, например, вызванные более высокими скоростями движения в газовой среде. В случае однокомпонентных капель фактор межфазного натяжения не рассматривается. Если принимать во внимание важный фактор, связанный с тем, что в большинстве газопарокапельных технологий используются растворы, суспензии и эмульсии, то целесообразно изучить потенциальное влияние межфазного натяжения на условия и характеристики соударений капель, а также сопоставить с влиянием поверхностного

натяжения. В настоящей работе диапазоны варьирования межфазного и поверхностного натяжения были выбраны сопоставимыми (значения σ и σ_0 пересекались, но все же интервал варьирования σ_0 был гораздо шире, так как это позволяет приблизить условия экспериментов к перспективным приложениям). В реальных технологиях можно обеспечивать условия доминирования одного из этих свойств над другим, например, использовать составы с существенно большим значением межфазного натяжения по сравнению с поверхностным. В таком случае капля будет существенно трансформироваться относительно сферической формы в процессе движения в газовой среде, но не распадаться на фрагменты из разных компонентов (т.е. наполняющих жидкостей). Если же, наоборот, межфазное натяжение будет значительно ниже поверхностного, то процессы расслоения в капле будут играть доминирующую роль. Как следствие, даже при относительно небольших приложенных к капле силах аэродинамического сопротивления возможная ее фрагментация с разделением жидкостных компонентов.

Как видно из рис. 3.26, наибольшее смещение границ переходов между режимами дробления и разлета относительно коагуляции зарегистрировано для капель эмульсии дизеля без добавления эмульгатора. Для границы, иллюстрирующей начало области режима дробления, смещение составило $\Delta \approx 84\%$, а для границы разлета $\Delta \approx 75\%$. При добавлении эмульгатора разлет и дробление начинаются при больших критических (переходных) значениях чисел Вебера относительно эмульсии без эмульгатора. Это обусловлено тем, что эмульгатор повышает стабильность эмульсии, укрепляет межмолекулярные связи, и для ее распада требуются большие силы энергии и, соответственно, выше переходные значения чисел Вебера. Добавление эмульгатора приводит к значительному росту диапазона варьирования We , соответствующего области режима отскока ($\Delta \approx 69\%$). Установленная особенность также объясняется большей стабильностью эмульсии (соответственно, меньшей расслаиваемостью).

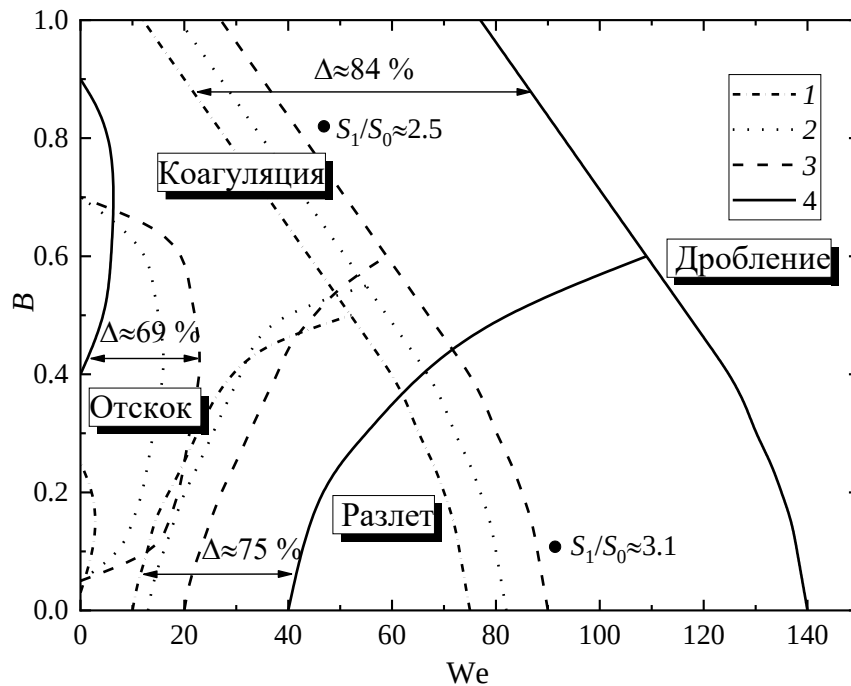
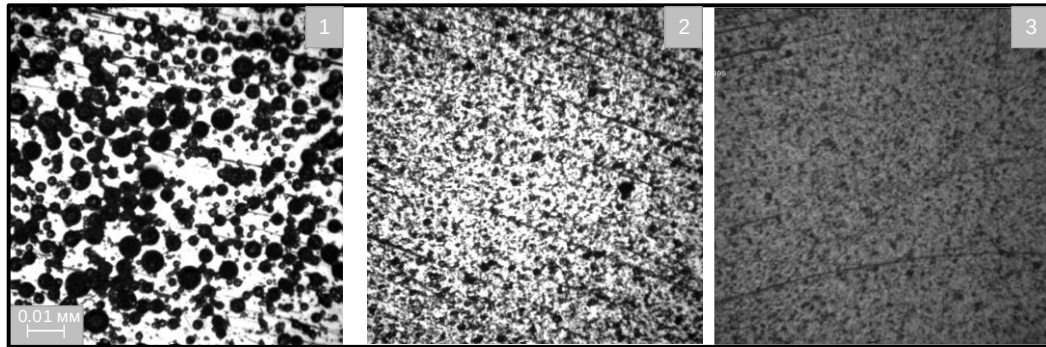


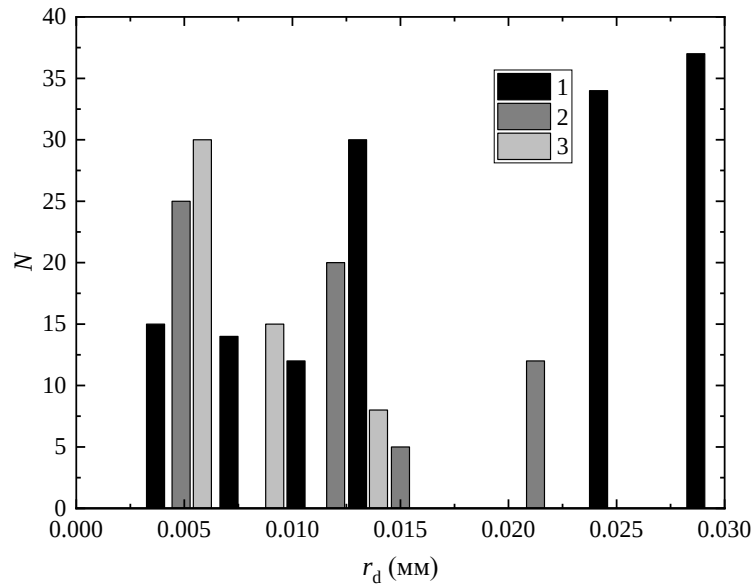
Рисунок 3.26. Влияние межфазного натяжения жидкости на границы переходов между областями, соответствующими различным режимам соударений капель [133]: 1 – 10 об% вода, 90 об% дизель; 2 – 10 об% вода, 90 об% дизель, 0.08 г/л эмульгатор D_cD ; 3 – 90 об% дизель, 10 об% вода, 1.6 г/л эмульгатор D_cD , 4 – вода.

Для изучения распределения размеров микро-капелек воды, находящихся в дизельном топливе, проведена дополнительная регистрация с использованием микроскопа (рис. 3.27). Хорошо видно, что структура капли существенно меняется вследствие действия стабилизирующей добавки. Раскадровка видеogramм с микроскопа показала, что дисперсность капелек воды в составе дизельной эмульсии существенно меняется. Эти изменения, главным образом, связаны с тем, что микрокапельки воды с течением времени начинают объединяться и, как следствие, укрупняться. Чем выше концентрация эмульгатора, тем медленнее происходят процессы агломерации капелек воды. На основе данных, полученных при видеорегистрации с использованием микроскопа, можно сформулировать предположение о том, что в процессе соударения также интенсифицируется агломерации капелек воды. Поэтому роль стабилизирующей добавки

значительна не только в определении границ переходов между режимами соударений капель по диапазонам варьирования параметрам B и числа We , но в определении дисперсности аэрозольного облака из вторичных капель.



а



б

Рисунок 3.27. Видеокадры микроскопного увеличения (а) и распределения размеров капелек воды в капле дизельной эмульсии [133]: 1 – 10% вода, 90% дизель; 2 – 10 об% вода, 90 об% дизель, 0.08 г/л эмульгатор D_cD ; 3 – 50 об% глицерина, 50 об% вода, 1.6 г/л эмульгатор.

Из рис. 3.28 видно заметное влияние межфазного натяжения на количество образованных частиц. Можно наблюдать, что при максимальном значении межфазного натяжения количество новообразованных фрагментов больше. При снижении натяжения количество фрагментов растет. Такой характер сохраняется при широком диапазоне числа Вебера от 50–200.

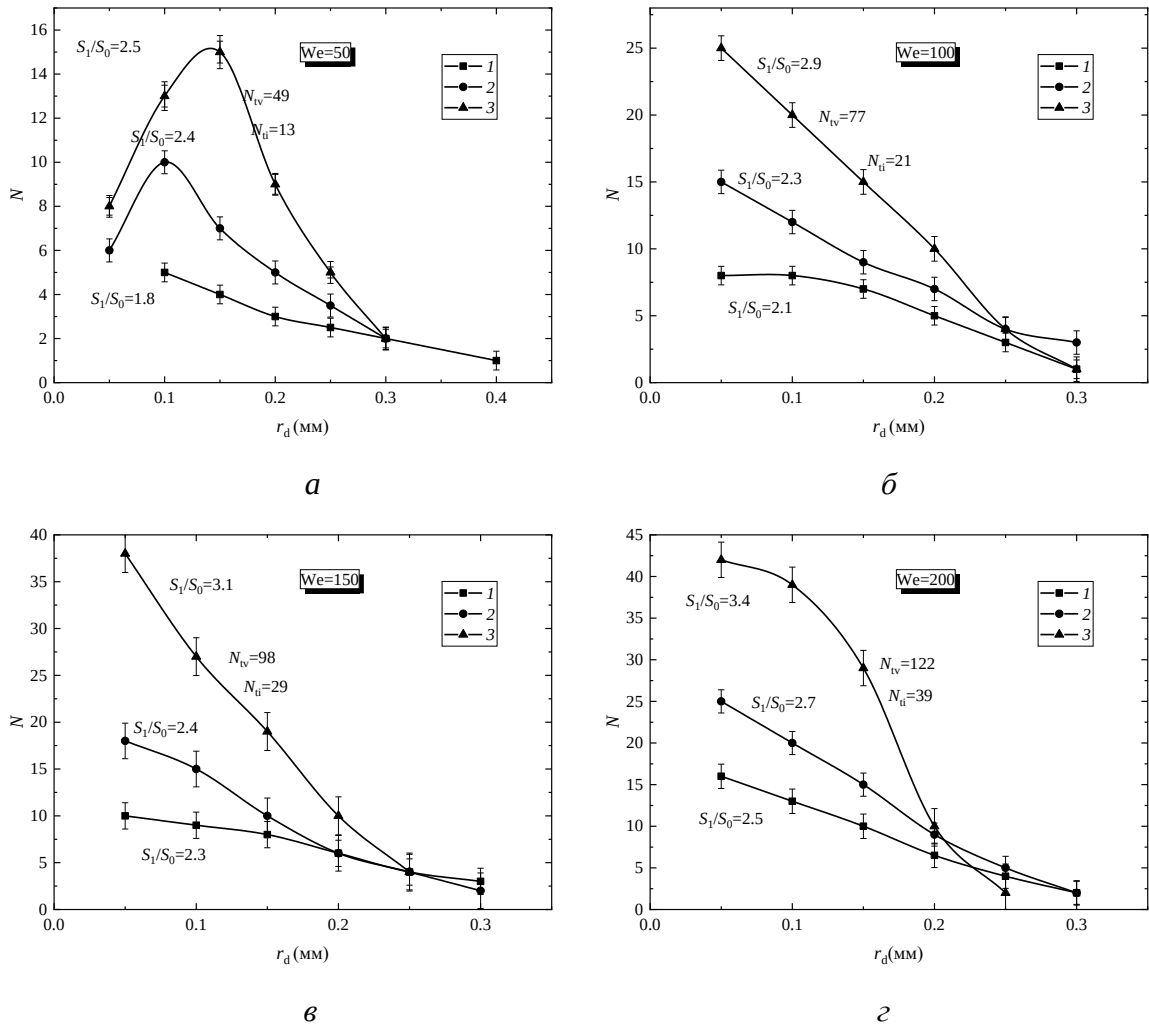


Рисунок 3.28. Распределения образованных фрагментов жидкости по размерам при $R_d=0.5–0.7$ мм, $U_{rel}=0.6–3.5$ м/с и использовании составов с варьируемым межфазным натяжением [133]: 1 – 10 об% вода, 90 об% дизель; 2 – 10 об% вода, 90 об% дизель, 0.08 г/л эмульгатор D_cD; 3 – 50 об% глицерина, 50 об% вода, 1.6 г/л эмульгатор. Дополнительно указаны типичные значения отношения площадей поверхности жидкости при измельчении вследствие соударений S_1/S_0 .

Анализируя рис. 3.27 и 3.28, можно сделать вывод, что чем меньше размер капель воды внутри дизельной эмульсии, тем с меньшими размерами образуются вторичные фрагменты в режиме дробления. Тем самым увеличивается площадь раздробившихся капель.

На рис. 3.29 приведены результаты обобщения данных в виде $We(Oh)$ и проведена граница между режимами коагуляции и дробления. С увеличением числа Онезорге увеличивается критическое значение числа Вебера, при котором начинается режим дробления. Максимальное значение критического числа Вебера наблюдается для раствора глицерина (50 об% глицерин, 50 об% вода). Таким образом, на рис. 3.29 удалось продемонстрировать интегральные характеристики исследованных процессов, т.е. объединить экспериментальные данные, полученные для всех использованных жидкостных составов. На основе этих данных можно сделать несколько выводов. В частности, вследствие достаточно монотонного перехода кривой, разделяющей режимы соударений, от диапазона малых значений чисел Онезорге к большим (рис. 3.29), можно прогнозировать сохранение аналогичного характера границ на карте $We(Oh)$ для любых других жидкостных составов капель. Рис. 3.29 позволяет прогнозировать необходимые и достаточные условия по переходу между режимами для жидкостей с разными свойствами (вязкость, плотность, поверхностное и межфазное натяжение).

Проведенные эксперименты с варьированием вязкости, поверхностного и межфазного натяжения показали, что у технологий первичного и вторичного измельчения существенно неоднородных по компонентному составу капель имеются большие резервы по повышению эффективности. В частности, без существенного увеличения результирующей скорости движения капель или первичного распыления жидкости можно обеспечить формирование мелкодисперсного аэрозоля с заданными размерами вторичных фрагментов. При этом в качестве регулирующих воздействий рационально использовать подход со смешением жидкостных струй с разными компонентными составами – для обеспечения мишеней и снарядов с разными свойствами (вязкость, плотность, поверхностное и межфазное натяжение).

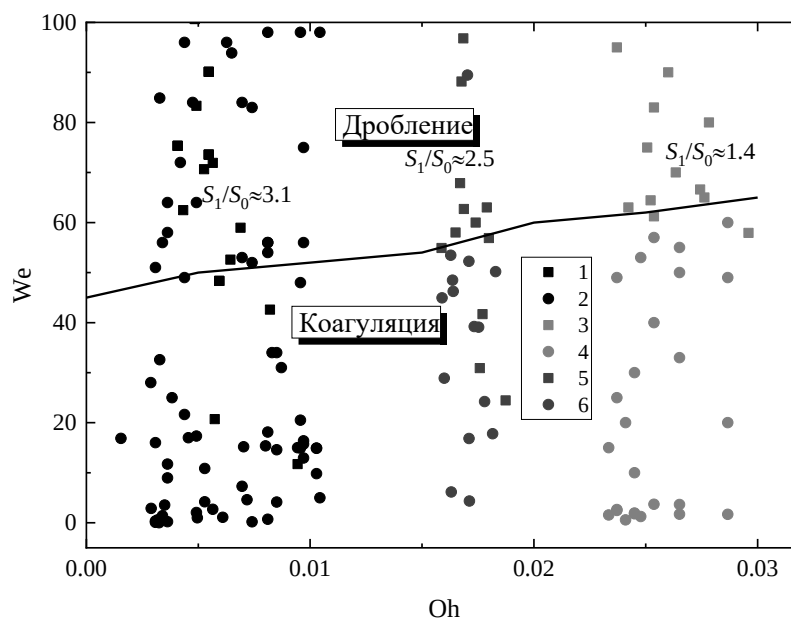


Рисунок 3.29. Влияние основных свойств жидкости на границу перехода между коагуляцией и дроблением: 1, 2 – вода; 3, 4 – 50 об% глицерина, 50 об% вода; 5, 6 – 10 об% вода, 90 об% дизель; 1, 3, 5 – дробление; 2, 4, 6 – коагуляция.

При обобщении результатов исследований важно отметить ключевые особенности, которые развивают ранние результаты, полученные другими авторами. В частности, можно отметить, что в диссертационной работе впервые продемонстрировано влияние трех рассмотренных ключевых свойств жидкости на границы переходов между режимами соударений и количество образующихся жидкостных фрагментов, а также площадь их суммарной поверхности в сравнении с исходной площадью межфазной («жидкость – газ») поверхности. При сопоставлении установленных масштабов влияния свойств жидкостей на границы режимов соударений и характеристики вторичных фрагментов можно прогнозировать их соответствующие изменения в других работах, в которых изучались либо критические значения чисел Вебера, либо размеры и концентрация вторичных фрагментов.

Авторы [19] изучали влияние вязкости, плотности и поверхностного натяжения жидкости на двойные столкновения капель жидкостей. Основным

отличием в результатах с диссертационной работой является образование вторичных фрагментов лишь из одной жидкости. Это объясняется тем, что в [19] изучались столкновения несмешивающихся жидкостей. В результате экспериментов установлено, что различия в поверхностном натяжении приводят к инкапсулированию глицерина в масле. Также для состава с добавлением глицерина 50% наблюдалось два результата столкновений: коагуляция (сохранение единого жидкостного агломерата) и частичная коагуляция (слияние и последующее разделение на фрагменты). При варьировании вязкости (снижении) получено, что предел устойчивости смещается в сторону более низких скоростей. Увеличение вязкости приводит к сдвигу предела стабильности в режимах взаимодействия.

По результатам экспериментов [134] сделано заключение о том, что даже небольшое изменение вязкости приводит к смещению области рефлексивного разделения заметно вправо и вверх на карте режимов. Кроме того, отмечено влияние вязкости и поверхностного натяжения на нижнюю границу отскока. Основными отличиями экспериментов [134] от настоящих экспериментальных исследований являются: диапазон вязкостей (1.2–28.2 мПа·с) и размеров капель (365–385 мкм), а также скоростей движения капель (в диапазоне 0.5–3.5 м/с), в результате чего максимальное число Вебера не превышало 180.

Влияние вязкости и межфазного натяжения на кинетику одного из режимов взаимодействия капель (коалесценции) рассмотрено в [93]. Отмечено, что влияние межфазного натяжения на время коагуляции заметно при малых скоростях движения ($<10^{-2}$ м/с). При больших же скоростях значение межфазного натяжения не оказывает существенного влияния. В диссертационной работе также установлены условия, при которых вязкость, межфазное и поверхностное натяжение оказывают незначительное влияние на карты режимов соударений и распределения по размерам вторичных фрагментов. Если обобщить по всем опытам, то можно выделить диапазон

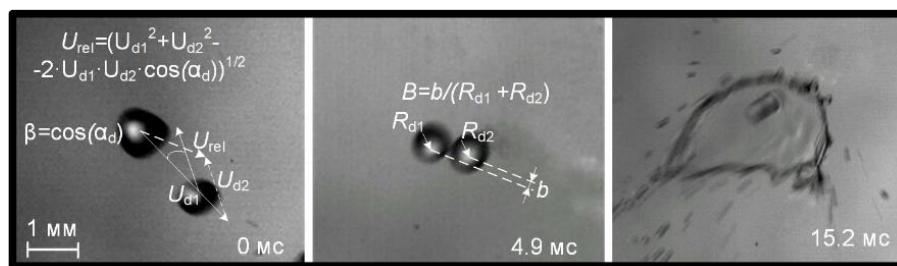
($We > 150$), когда силы инерции несколько доминируют, что все остальные факторы являются малозначимыми.

Можно сделать вывод о том, что в ранних исследованиях при изучении влияния вязкости, поверхностного и межфазного натяжения авторы анализировали только одно свойство жидкости и часто оценивали его влияние на один из режимов взаимодействия (чаще всего на коагуляцию). Более того, недостаточно экспериментальных данных по влиянию данных параметров на интегральные характеристики образующихся вторичных фрагментов. В диссертационной работе использовались жидкости с различным одним параметром и фиксированными двумя. Таким образом, удалось определить влияние каждого свойства жидкости на режимы взаимодействия и интегральные характеристики вторичных фрагментов по отдельности. Кроме того, выделен режим, при котором в результате соударения капель всегда образуется больше двух фрагментов, что важно при изучении технологий вторичного измельчения.

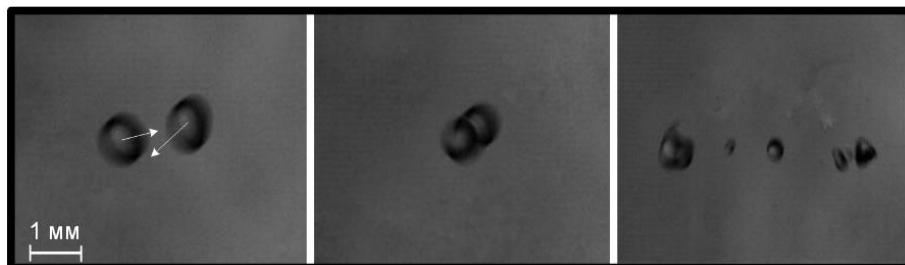
3.8. Экспериментальное исследование столкновений однокомпонентных и многокомпонентных капель топлив

При соударении капель эмульсии (трансформаторное масло 30 об%, вода 70 об%) (рис. 3.30d) и воды наблюдалось дробление с образованием небольшого перешейка, который вследствие растягивающих и вязкостных сил распадался на небольшое число жидкостных фрагментов (как правило, 2–3). Такое дробление происходило при скоростях движения капель от 0.5 до 1 м/с. При росте скорости движения капель (выше 1.1 м/с) количество образовавшихся фрагментов вследствие дробления увеличивалось до 7–10. В процессе соударения капель жидкости при малых скоростях движения капель эмульсии (до 0.5 м/с) и больших скоростях движения капель воды (до 1.3 м/с) регистрировался разлет, коагуляция и дробление (с образованием до 4–5 фрагментов). При увеличении скорости движения капли эмульсии на основе

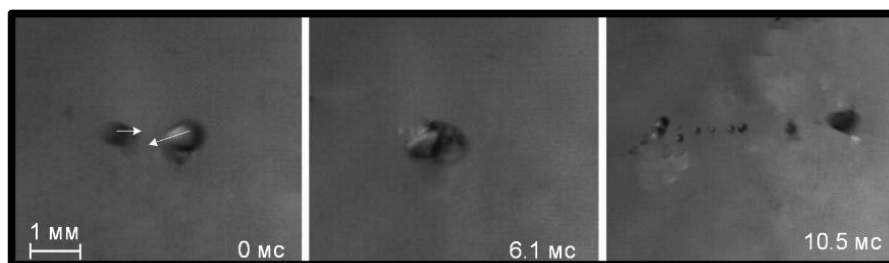
воды и трансформаторного масла до 1.5 м/с и уменьшении скорости движения каплей воды до 0.5 м/с коагуляция происходила редко, а при дроблении увеличивалось число образующихся жидкостных фрагментов (до 10–15). Этот результат объясняется высокими значениями сил инерции, действующими на каплю эмульсии, ее малым (относительно воды) поверхностным натяжением и высокой вязкостью. При малой скорости движения (до 1 м/с) капля жидкости доминирование процесса коагуляции явно смещено в сторону масляной эмульсии. Видеограммы показали, что капля эмульсии условно затягивает (поглощает) каплю воды и, как следствие, происходит устойчивая коагуляция.



а



б



в

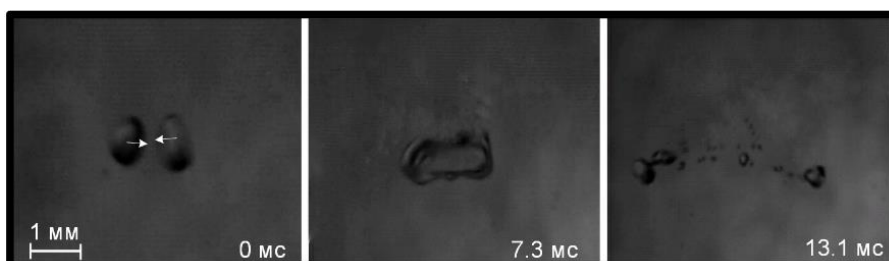
*з**д**е*

Рисунок 3.30. Типичные кадры взаимодействий капель по схемам [131]: *а* – «дизель–дизель»; *б* – «дизель–вода»; *в* – суспензия (уголь К 30 мас%, вода 70 мас%) – вода при $T \approx 20$ °С; *з* – «суспензия–вода» при $T \approx 80$ °С; *д* – «эмульсия–эмульсия» (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода) при $T \approx 20$ °С; *е* – «эмульсия–эмульсия» (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода) при $T \approx 80$ °С.

В случае с нагретыми составами (80 °С) масляной эмульсии и воды дробление происходило следующим образом. При столкновении капля образовывались кольца, которые почти сразу же распадались на большое число фрагментов (не менее 20–25). Последние коагулировали, и итоговое количество капель не превышало 10–15. Так же было замечено, что при малых углах атаки (до 30°) увеличивалось число соударений в режиме коагуляции по сравнению с относительно холодными (20 °С) составами. Это

обусловлено тем, что поверхностное натяжение и вязкость жидкостей снижаются в несколько раз (например, для воды при повышении температуры с 20 до 80 °С в 1.5–2.5 раза), что способствует коагуляции капель даже при соударении с углом атаки менее 30°.

При соударении капель эмульсии (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода) друг с другом процесс дробления протекал в виде двух типов взаимодействий. Первый представлял собой образования кольца с хорошо идентифицируемыми контурами, которое в дальнейшем разрывалось, формировались мелкие фрагменты жидкости. Их количество составляло 20–25. Второй тип дробления характеризовался образованием перешейка. Количество образованных капель при таком разрушении составило 15–20.

Дробление капель жидкости при взаимодействии суспензии (уголь К 30 мас%, вода 70 мас%) (рис. 3.30г) и воды происходит также с образованием перешейка, который быстро распадается, но вследствие меньшей вязкости по сравнению с трансформаторным маслом количество образующихся капель при разрушении перешейка образуется больше (до 6–8). Роль капли угольной суспензии (мишень или снаряд) при взаимодействии с водой почти не влияет на количество образующихся фрагментов и исход взаимодействия. Определяющее значение имеет относительная скорость движения. При увеличении температуры составов коагуляция практически не происходила. При этом возрастало количество разлетов и дробления. При дроблении нагретых капель жидкости с относительной скоростью движения выше 1.3 м/с образуется большое число фрагментов (не менее 8–12). При нагревании составов начинает проявляться разница роли капли угольной суспензии: при малых скоростях (до 0.5 м/с) капля суспензии образуется меньше фрагментов при дроблении (3–5), чем в другом случае, когда скорость движения капель суспензии больше, чем скорость движения капель воды. В последнем случае количество образовавшихся жидкостных фрагментов достигает 5–7. Дробление нагретых составов суспензий и воды также происходит с образованием кольца и быстрым его разрушением. Капли

суспензий при соударении друг с другом образуют вследствие дробления не менее 10 фрагментов.

В отличие от составов на основе трансформаторного масла и угольной суспензии дробление капель дизеля при соударении происходит с образованием кольца даже при невысоких ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах жидкости (рис. 3.30а). Кольцо при этом распадается на большее число фрагментов (не менее 20–25). Наибольшее число образовавшихся фрагментов наблюдается при большом угле атаки (от 50°). При угле атаки меньше 50° количество образующихся фрагментов уменьшается до 5–10. Условия разлета соударяющихся капель данной жидкости не зарегистрированы. В случае соударений капель дизеля с водой количество раздробившихся фрагментов уменьшается (до 3–6), а режим дробления происходит с образованием перешейка. При ударе капли воды в каплю дизеля, т.е. при малой скорости движения капли дизеля (до 0.5 м/с) происходит дробление с образованием 3–4 фрагментов. При ударе капли дизеля в каплю воды (скорость капли воды до 0.5 м/с) количество образующихся жидкостных фрагментов увеличивается до 4–6 (рис. 3.30б). Время дробления при этом увеличивается примерно на 15–25%. При взаимодействии капель дизеля и воды зарегистрирован режим разлета, а количество экспериментов с коагуляцией существенно уменьшилось.

В случае взаимодействия эмульсии касторового масла (30%) и воды наибольшее количество капель образуется, когда капли воды выступают в роли мишени (скорость до 0.7 м/с) – до 7 фрагментов (рис. 3.30е). В обратном случае, когда капля воды выступает в роли снаряда, а капля касторового масла в роли мишени, количество образующихся фрагментов при дроблении снижается до 3–4. При встречном движении капель эмульсии и воды количество образующихся фрагментов возрастает в среднем до 15–20. Разлет у данных составов почти не наблюдается. Касторовое же масло дробится в основном с образованием кольца, которое распадается в среднем на 10–12 фрагментов.

Таким образом, при соударении однородных капель жидкости с малым поверхностным натяжением по сравнению с водой образуется большее количество мелких фрагментов. Особенно это характерно для дизеля и при нагреве всех участвующих в соударении капель. В частности, количество образующихся фрагментов при соударении капель дизеля и воды в среднем на 15 меньше, чем при соударении капель дизеля друг с другом. Можно сделать вывод об определяющей роли поверхностного натяжения и вязкости составов на условия и характеристики взаимодействия соударяющихся капель. Однако если эти свойства для однородных и неоднородных составов незначительно отличаются, то существенного роста числа образующихся фрагментов жидкости вследствие соударений исходных капель можно добиться за счет применения суспензий. Выбор материала твердых частиц (размеры, концентрация в капле, плотность, температуропроводность, гидрофильность, гидрофобность, поглощение излучений и др.) будет оказывать специфическое влияние на структуру и тепломассоперенос в капле [65,78,135]. Эти процессы приводят к значительной трансформации поверхности капли. Соответственно, могут быть интенсифицированы процессы измельчения капель любых составов при их взаимодействии с каплями суспензий.

Использованы типичные карты режимов (рис. 3.31–3.34), на которых можно достаточно наглядно продемонстрировать влияние сил инерции, поверхностного натяжения, вязкости, угла атаки и прицельного расстояния между каплями. На каждой из карт продемонстрированы характерные (относительные) сдвиги (в виде значений с единицей измерения %) границ перехода между коагуляцией к разлету и далее к дроблению. Условия отскока для всех составов реализовывались при малых числах Вебера (до 4). Лишь предварительный нагрев капель способствовал заметному смещению границ перехода к отскоку, так как интенсифицировалось испарение и формирование вокруг капель достаточно большой паровой области, которая препятствовала сближению последних и отталкивала их друг от друга.

Хорошо видно (рис. 3.31–3.34), что при смене роли (мишень, снаряд) между каплями суспензий и воды или между каплей дизеля и воды заметно смещаются границы переходов между режимами. Это обусловлено изменяющимися соотношениями основных действующих сил (особенно хорошо заметно в системах координат $We(Oh)$ и $Re(Ca)$, так как учитываются соотношения сил вязкости, поверхностного натяжения и инерции).

При этом в целом можно отметить удовлетворительную корреляцию результатов опытов (рис. 3.31–3.34) с данными [98,105,136], полученными при изучении характеристик взаимодействия капель воды, молока и других жидкостей. В случае использования капель одинаковых составов в опытах с соударением фрагментов жидкостей можно достаточно достоверно прогнозировать режимы и характеристики взаимодействия капель.

Анализ рис. 3.31–3.34 позволил отметить ряд закономерностей, установленных при соударениях капель с существенно отличающимися характеристиками компонентов. Например, поверхностное натяжение типичных композиционных топлив ниже (в 2.5–4 раза) по сравнению с водой (при идентичных температурах). Как следствие, можно сформулировать гипотезу о доминировании условий измельчения капель эмульсий при столкновениях по сравнению с коагуляцией и дроблением капель воды в идентичных условиях. Определяющее влияние может оказывать добавка стабилизатора или ПАВ в составе эмульсий, а также типичных жидких топлив (например, дизеля). Они, как правило, снижают поверхностное натяжение на межкомпонентной границе для лучшего перемешивания и сохранения стабильного состава. Эффективные (средние) значения плотности эмульсий меньше, чем воды, а индикаторы вязкости значительно выше. Это способствует распаду капель при дроблении на большее количество фрагментов по сравнению с водой. При анализе условий взаимодействия капель воды и эмульсий установлено, что наиболее подвержены разлету или дроблению при идентичных условиях последние вследствие относительно малого поверхностного натяжения. Такие

закономерности прослеживались при разных ролях (снаряд и мишень). В зависимости от назначения и свойств ПАВ можно обеспечить более высокое поверхностное натяжение на межкомпонентных границах и приблизить его к значениям, характерным воде и даже выше при необходимости.

Поверхностное натяжение растворов (например, солевых) выше воды в среднем на 4–6% в зависимости от концентрации и свойств компонентов. Этот фактор несколько затрудняет дробление капель растворов при столкновениях по сравнению с водой. Поэтому в широком диапазоне варьирования числа Вебера доминируют коагуляция и разлет. Кроме того, связи ионов Na^+ и Cl^- существенно крепче, чем между молекулами воды (межмолекулярное натяжение играет важную роль). Поэтому трансформация поверхности капель растворов происходит существенно медленнее, чем воды. Плотности и вязкости растворов отличаются от воды не более чем на 3–4%. Влиянием этих факторов можно пренебречь. По этим причинам в целом характеристики измельчения капель воды и типичных солевых растворов довольно близки.

Средние характерные значения плотности, вязкости, поверхностного натяжения суспензий при относительной массовой концентрации твердых частиц менее 10% не могут существенно отличаться от воды. Они несколько выше, но вклад этих факторов при определении условия деформации капель мал [137]. Скорее всего, важную роль играют процессы взаимодействия элементов дисперсной фазы с каплями воды. Установлены особенности, заключающиеся в том, что в каплях суспензий непрерывно происходят процессы агломерации. В результате капля суспензии имеет существенно неоднородный состав. Поэтому характеристики ее взаимодействия с соседними каплями воды зависят от того, в какую часть попадает последняя. Если взаимодействие происходит с областью, слабо заполненной твердыми частицами, то такое соударение мало чем отличается от столкновений капель воды. Если же капля воды соударяется с агломератом твердых частиц, то интенсивно происходят разлет и дробление. Чем больше размеры и

концентрация твердых частиц, тем масштабнее протекает процесс дробления. Кроме того, значительное влияние оказывают факторы частичного выступления твердых частиц с поверхности капель суспензий.

Условия столкновений перемешанных капель с каплями воды довольно хорошо согласуются с вышеописанными взаимодействиями капель суспензий и эмульсий. Важную роль играет поверхностное натяжение каждого из компонентов перемешанной капли. Как и ожидалось, чем меньше поверхностное натяжение компонента (например, масло, керосин, дизель и др.) по сравнению с водой, тем масштабнее дробление капель. Вследствие малого поверхностного натяжения горючих компонентов неоднородных капель они существенно трансформировались в процессе движения и принимали форму, существенно отличающуюся от сферической. Это способствовало повышению сил инерции, приводящих к трансформации поверхности капли и ее разрушению. Вследствие неоднородного состава капли растворов, эмульсий и суспензий являются крайне неустойчивыми при столкновениях по сравнению с однородными каплями воды. По этим причинам, скорее всего, целесообразно учитывать корректирующие коэффициенты, учитывающие структуру и компонентный состав капель.

Важная закономерность, установленная в проведенных опытах, состоит в том, что при вычислениях предельных значений чисел Вебера традиционно принято считать по «капле – снаряду» переход от коагуляции к разлету или от него к дроблению (и так по любому режиму взаимодействия). В случае рассмотрения неоднородных капельных потоков отмечена важность учета роли капель, так как мишень может существенно трансформироваться и распадаться при сохранении монолитного состояния снаряда при разных формах.

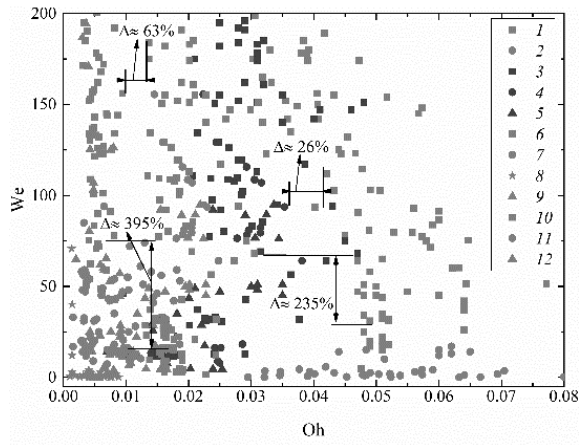
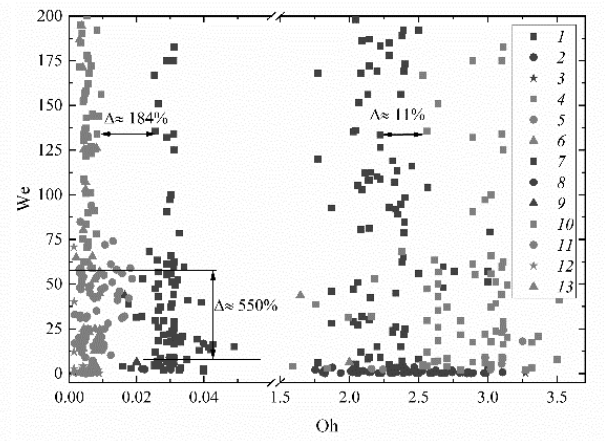
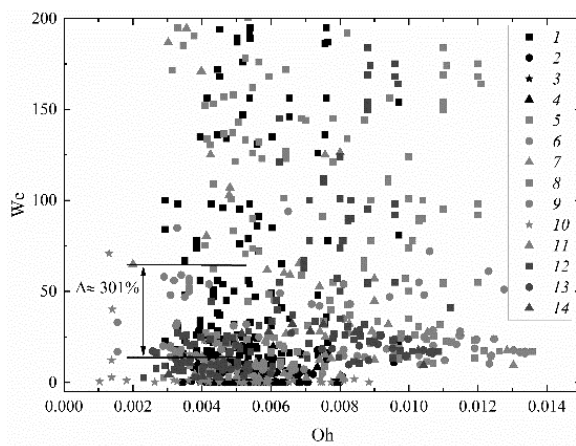
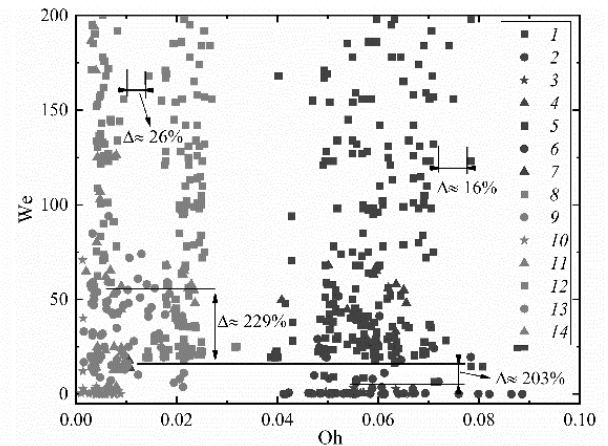
*a**б**в**г*

Рисунок 3.31. Карты режимов взаимодействия [131] (квадрат – дробление; круг – коагуляция; звезда – отскок; треугольник – разлет) каплей типичных составов: *a* – дизель; *б* – эмульсия (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода); *в* – суспензия (30 мас% уголь К, 70 мас% вода); *г* – эмульсия (30 об% касторовое масло, 70 об% вода). Обозначения: 1–4 – «состав–состав»; 5–8 – «состав–вода»; 9–12 – «вода–вода»; 13–16 – «вода–состав».

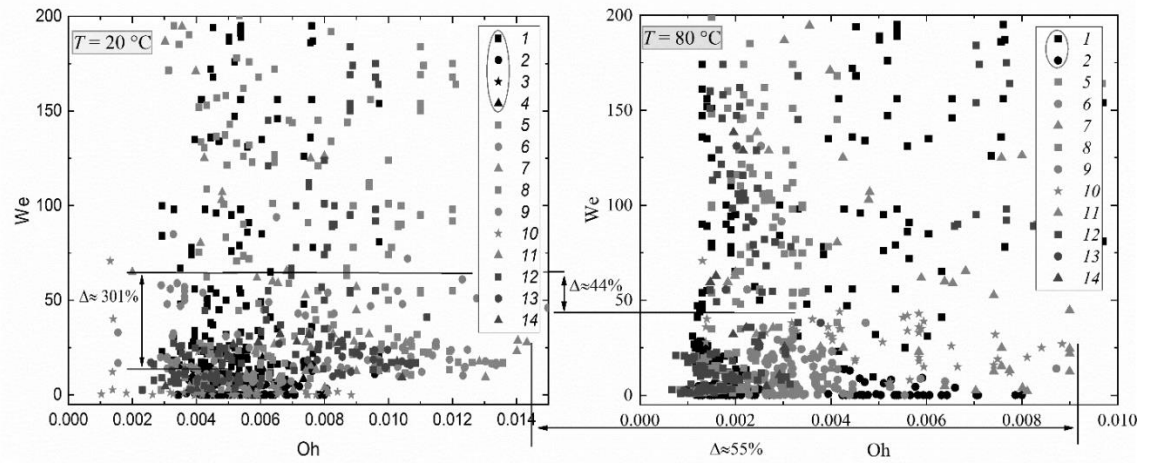
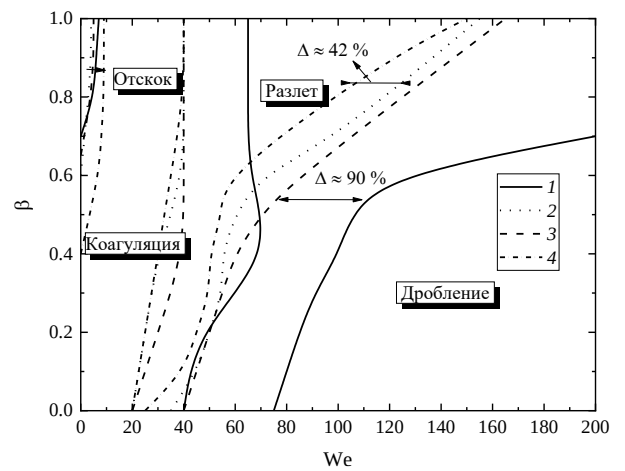
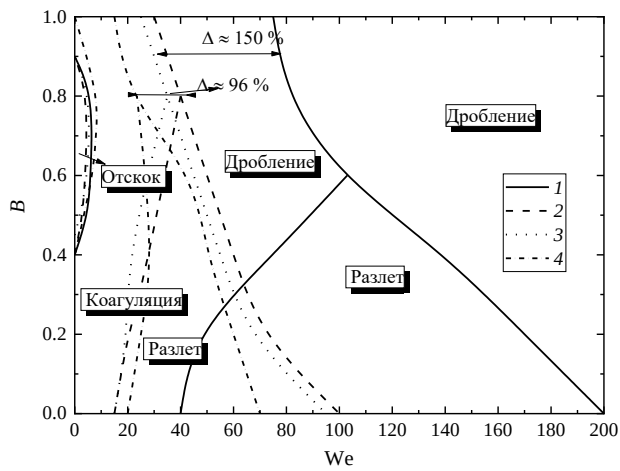


Рисунок 3.32. Влияние температуры нагрева на режимы взаимодействия [131] (квадрат – дробление; круг – коагуляция; звезда – отскок; треугольник – разлет) каплей воды и суспензии (30 мас% уголь К, 70 мас% вода): 1–4 – «суспензия–суспензия»; 5–7 – «суспензия–вода»; 8–11 – «вода–вода»; 12–14 – «вода–суспензия».



a

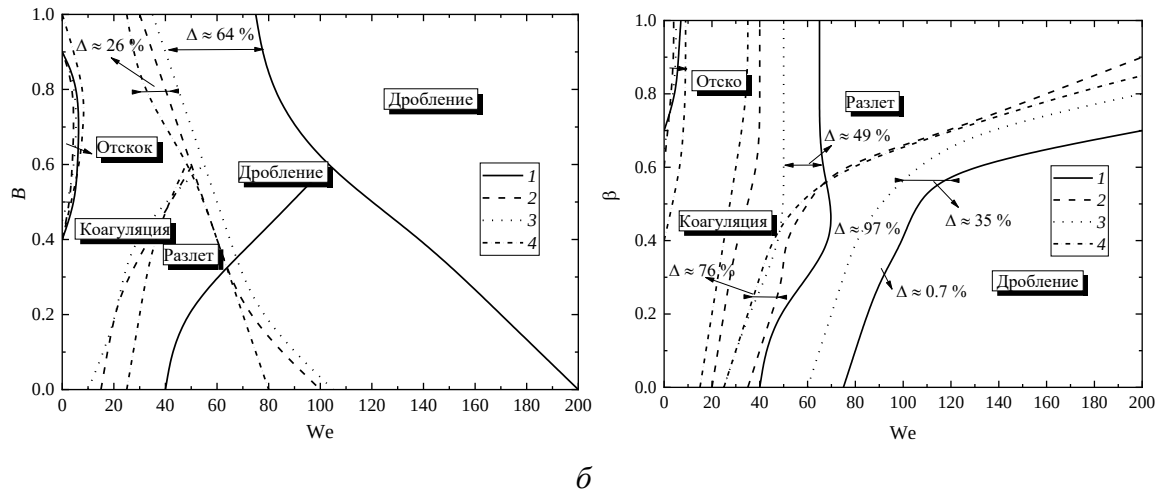


Рисунок 3.33. Карты режимов взаимодействия с использованием линейного и углового параметров [131]: (а) 1 – «вода–вода»; 2 – «вода–суспензия» (30 мас% уголь К, 70 мас% вода); 3 – суспензия (30 мас% уголь К, 70 мас% вода) – вода; 4 – суспензия (30 мас% уголь К, 70 мас% вода) – суспензия (30 мас% уголь К, 70 мас% вода); (б) 1 – «вода–вода»; 2 – «вода–дизель»; 3 – «дизель–вода»; 4 – «дизель–дизель».

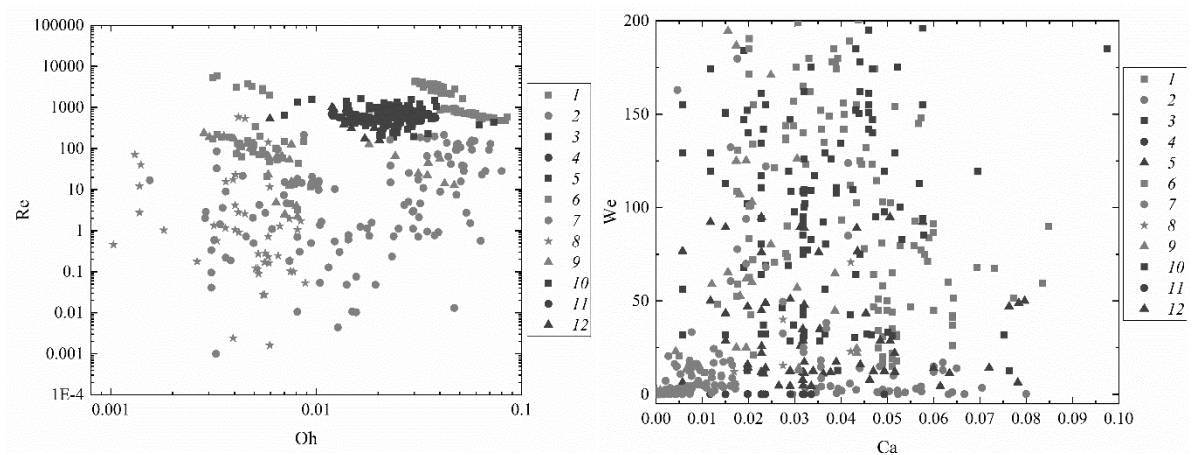


Рисунок 3.34. Карты режимов взаимодействия (квадрат – дробление; круг – коагуляция; звезда – отскок; треугольник – разлет) с числами Вебера, Рейнольдса, Онезорге и капиллярности [131]: 1–2 – «дизель–дизель»; 3–5 – «дизель–вода»; 6–9 – «вода–дизель»; 10–12 – «вода–вода».

Проведенные эксперименты показали, что для условий нагрева можно отметить важные закономерности, связанные с образованием вокруг капель буферной паровой зоны, представляющей тепловую защиту. Последняя

влияет на реализацию такого явления, как отскок, т.е. взаимодействие через буферную газовую область без прямого контакта капель. Также вследствие парообразования капли интенсивно тормозятся. Это приводит к замедлению их перед соударением и доминированию отскоков или коагуляции. Лишь при турбулизации регистрировались разлеты и дробление. При нагреве капель существенно (в 2–4 раза) снижается поверхностное натяжение жидкости и, как следствие, она становится менее устойчивой и дробится более интенсивно при соударении капель. В тоже время предварительный нагрев приводит к тому, что капли интенсивно испаряются в течение всего времени нахождения в потоке газа. Как следствие, при малых скоростях соударения капли взаимодействуют через так называемую газовую (паровую) прослойку. В таком случае реализуются условия отскока капель, т.е. их взаимодействия в виде сближения и последующего удаления вследствие недостаточности кинетической энергии взаимодействия для преодоления газовой прослойки с повышенным давлением между каплями.

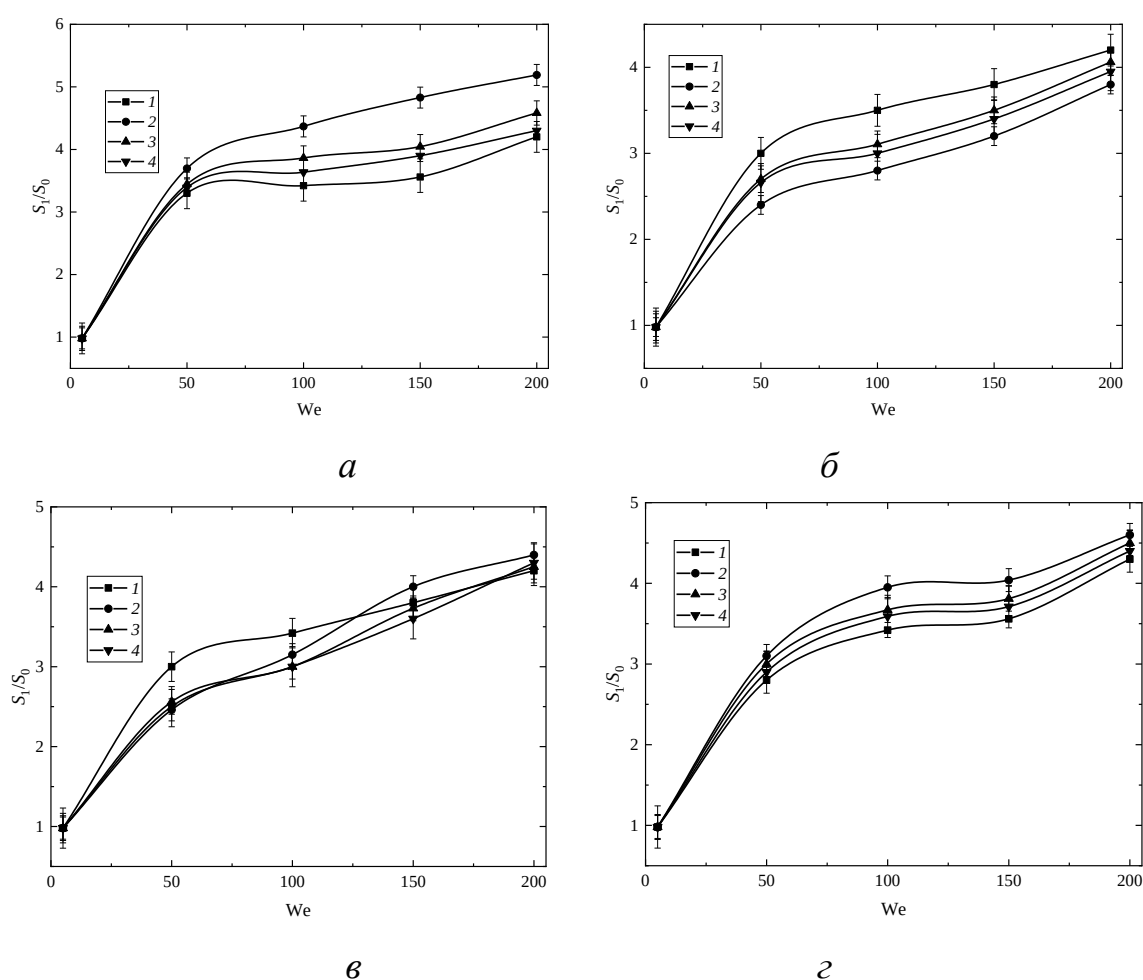
Из известных работ по изучению процессов трансформации движущихся капель [137,138] можно сделать вывод о том, что динамика разрушения капли в процессе полета зависит от предельных чисел Вебера. При $10 < We < 15$ реализуется вибрационный или вращательный тип измельчения. Может образовываться небольшое число фрагментов жидкости с разными размерами. Этот же диапазон хорошо соответствует разлету капель при соударениях (также образуется малое число фрагментов жидкости). Для диапазона $20 < We < 40$ характерны условия образования парашютов из движущихся капель и их распад с образованием облака мелких струек и цепочек. При $50 < We < 70$ образуются парашюты со струйкой. При $100 < We < 1000$ реализуются условия срыва или сдвига поверхностного слоя, а для $10^3 < We < 5 \cdot 10^4$ характерны условия взрывного (катастрофического) измельчения движущихся капель. При этом динамика разрушения капель существенно связана не только с критическими значениями We , но и чисел Рейнольдса, характеризующими режим движения газового потока. Обработка

результатов проведенных опытов показала, что при взаимодействии капель для получения облака мелких фрагментов жидкости не требуются значения $We > 100$. Чаще всего даже при $50 < We < 80$ реализовывались соударения с образованием облака мелких капель. Поэтому большой засев газового потока каплями может интенсифицировать так называемое вторичное измельчение капель при относительно небольших значениях определяющего критерия – числа Вебера.

На рис. 3.35, 3.36 показаны ключевые результаты экспериментов по изучению взаимодействия исследованных капель, заключающиеся в том, насколько можно измельчить последние при взаимодействии. Хорошо, видно, что площадь поверхности жидкости можно увеличить в несколько десятков раз (рис. 3.35). При расчете числа и размеров мелких фрагментов жидкости установлено, что распределения довольно существенно отличаются (рис. 3.36). В частности, каплям дизеля, масла и эмульсиям вследствие высокой вязкости при больших значениях чисел Вебера были характерны распределения со смещением большего количества фрагментов жидкости с малыми размерами. Каплям воды было характерно так называемое нормальное распределение с доминирующим количеством фрагментов, имеющих средние размеры. Капли же суспензии при соударениях образовывали облако с фрагментами жидкости, имеющими полидисперсный состав. Это обусловлено как агломерированием твердых частиц, так и интенсификацией распада капель. Поэтому количество фрагментов с малыми, средними и большими размерами было практически сопоставимым (рис. 3.36).

Рис. 3.35 показывает, что однородные капли с высоким поверхностным натяжением (вода) можно измельчить в 4–6 раз за счет соударения с каплями суспензий. Однородные капли с малым поверхностным натяжением (дизель) масштабнее измельчаются при соударении между собой. Нагрев однородных и неоднородных капель до температур, близких кипению воды, интенсифицирует их дробление и отскок. Поэтому перспективным

представляется обеспечение условий доминирования синергетическим эффектам измельчения взаимодействующих неоднородных капель. Новизна результатов исследований состоит в том, что на рис. 3.35 показаны условия, при которых можно получить максимальный синергетический эффект за счет измельчения капель при нагреве, ускорении движения и соударениях. Важно отметить, что в реальных системах при распылении существенно неоднородных составов (особенно при впрыске под высоким давлением – с большой скоростью) происходит интенсивное расслоение. Поэтому полученные результаты исследований показывают, насколько интенсивно могут взаимодействовать однородные и неоднородные капли в аэрозоле.



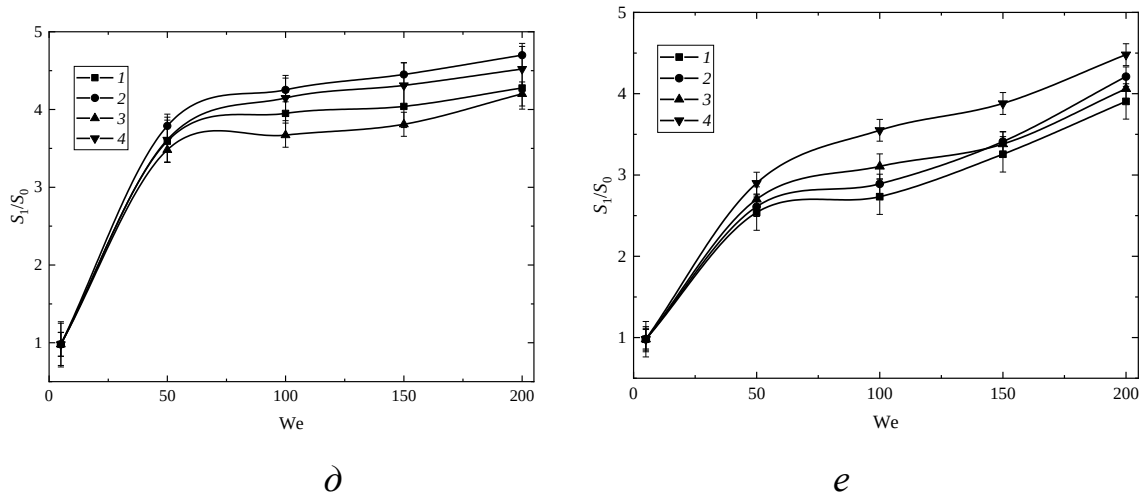


Рисунок 3.35. Отношения площадей поверхности жидкостных фрагментов, образующихся при дроблении, в сравнении с исходными каплями воды и разными составами [131]: (а) – дизель; (б) – эмульсия (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода); (в) – эмульсия (30 об% касторовое масло, 70 об% вода); (г) – суспензия (30 мас% уголь, 70 мас% вода); (д) – суспензии (30 мас% уголь, 70 мас% вода), 1 – «суспензия–суспензия» при $T \approx 20$ °С, 2 – «суспензия–суспензия» при $T \approx 80$ °С, 3 – «суспензия–вода» при $T \approx 20$ °С, 4 – суспензия–вода при $T \approx 80$ °С); (е) – эмульсии (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода) 1 – «эмульсия–эмульсия» при $T \approx 20$ °С, 2 – «эмульсия–эмульсия» при $T \approx 80$ °С, 3 – «эмульсия–вода» при $T \approx 20$ °С, 4 – «эмульсия–вода» при $T \approx 80$ °С. Обозначения: 1 – «вода–вода», 2 – «состав–состав», 3 – «состав–вода», 4 – «вода–состав».

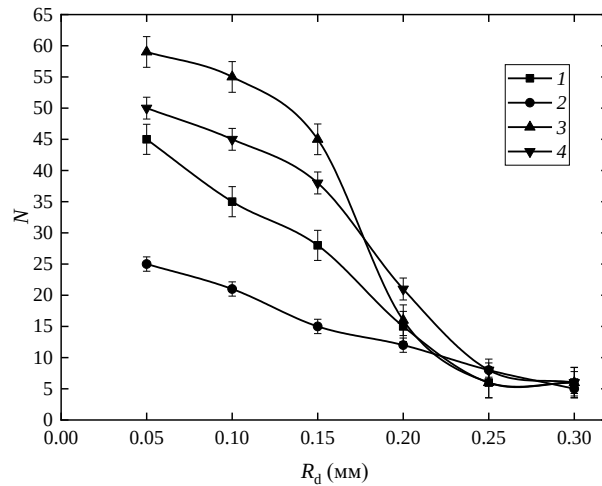


Рисунок 3.36. Распределения фрагментов жидкости по размерам и количеству (при среднем значении $We=100$, исходные скорости $U_d=0.5\text{--}1.9$ м/с и размеры $R_d=0.4\text{--}1.1$ мм), образующихся при дроблении, в сравнении с исходными каплями воды и разными составами: 1 – «вода–вода»; 2 – «вода–эмульсия» (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода); 3 – «вода–дизель»; 4 – «вода–суспензия» (30 об% уголь, 70 об% вода).

Если выполнять сопоставление результатов исследований на рис. 3.35, 3.36 и данных экспериментов, проведенных при регистрации соударений капель жидкостей с твердой поверхностью [73,139], а также при перегреве неоднородных капель [32], то можно отметить довольно масштабные эффекты по измельчению капель по всем перечисленным подходам к вторичному измельчению. В экспериментах [73,139] показано, что можно организовать условия интенсивного дробления капель жидкостей при соударении с твердой стенкой. При этом можно организовывать специализированные коронки при разных температурах нагрева поверхности (соответственно, варьировании теплового потока в достаточно широком диапазоне). В частности, при ударе второй капли в первую происходит набухание жидкости, вследствие высокого давления в точке удара. Обе капли, сливаясь, вытягиваются по краям в виде своеобразной коронки.

По результатам опытов [139] установлено, что при ударе первой капли о нагретую до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ поверхность жидкость деформируется в тонкий

вытянутый диск, при этом от нее отлетает множество мелких капелек. Механизм деформации капли происходит следующим образом: перед столкновением капля прогревается за счет радиационного теплообмена. При контакте капли с твердой поверхностью большая разница в температуре приводит к интенсификации теплообмена. На границе раздела формируется множество пузырьков пара, которые затем уносятся в окружающую среду. При ударе второй капли структура первой капли уже нарушена, слияние капель и формирование короны не происходит. Происходит сильное дробление первой капли, образовавшиеся фрагменты разлетаются в стороны от центра капли. При падении первой капли на поверхность, нагретую до 500 °С, образование множества мелких капель не зарегистрировано в опытах [139]. Вместо этого образуется тонкая паровая пленка между твердой поверхностью и каплей жидкости. Анализ результатов выполненных опытов по изучению процессов соударений однородных и неоднородных капель жидкостей между собой при разных температурах нагрева позволяет сформулировать гипотезу о том, что зарегистрированный в экспериментах [139] эффект формирования буферной паровой пленки, скорее всего, обусловлен тем, что скорость испарения жидкости экспоненциально зависит от температуры. При высоких температурах характерное время (длительность) испарения не просто мало. Оно много меньше характерного времени разрушения капли при соударении с нагретой поверхностью. В результате между каплей и поверхностью успевает образоваться слой пара, который тормозит каплю и резко снижает скорость ее соударения с нагретой стенкой. Как следствие, разрушение капли с образованием большого числа мелких фрагментов не происходит. Если же температура твердой поверхности недостаточна для образования сплошного парового слоя между последней и каплей, то происходит локальное вскипание жидкости в отдельных точках поверхности. В результате образуются паровые пузыри, которые разрушают границу поверхности капли и способствуют ее быстрому распаду. В этом случае капля соударяется как бы с сильно шероховатой

поверхностью. Каждый пузырь пара, давление в котором велико, является по существу элементом шероховатости, способствующим разрушению монолитности капли в момент соударения с поверхностью. При ударе второй капли в первую не происходит дробление, так как поверхностная структура первой капли не нарушена. Жидкость сначала набухает, вытягиваясь в искаженную корону, затем растекается по поверхности, непрерывно испаряясь. Эти результаты показывают, что нецелесообразно нагревать поверхность до высоких температур. Скорее всего, возможно установление связей между температурой твердой поверхности, скоростью испарения и условиями дробления капель, исходя из анализа теплофизических и термодинамических свойств каждой жидкости. В случае многокомпонентных капель условия их разрушения будут определяться свойствами жидкости с высокими скоростями испарения в идентичных условиях.

Оптимальные температуры поверхности для получения максимальной эффективности вторичного измельчения за счет соударения с ней капель составляют 200–400 °С. Близкий интервал температур (250–350 °С) соответствует необходимым (минимальным) температурам, при которых происходит интенсивный микро-взрывной распад неоднородных капель [32]. Поэтому, скорее всего, для реальных технологий существенное измельчение капель при применении эффектов соударений и микро-взрывного распада можно обеспечить при температурах в нагревательной камере 250–400 °С.

В экспериментах [73] показано, что на измельчение капель при соударении с твердой разогретой поверхностью определяющее влияние оказывает длительность контакта. Соответствующие закономерности установлены при помощи высокоскоростной видеорегистрации. С увеличением теплопроводности материала уменьшается время контакта [73]. Так, капля диаметром 700 мкм отскакивает через 2 мс после начала взаимодействия от подложки из нержавеющей стали, через 1.6 мс от подложки из латуни и через 1.4 мс от подложки из алюминия. При увеличении скорости до 4 м/с (число Вебера около 67) капля начинает

разрушаться при ударе о твердую поверхность. Таким образом, при числе Вебера меньше 30 происходит отскок капли от поверхности. При числах Вебера в диапазонах от 50 до 80 капля при ударе образует тонкую пленку на поверхности твердого тела, а затем распадается на более мелкие фрагменты. Так же было замечено [73], что шероховатость поверхности влияет на время взаимодействия капли с твердой поверхностью при отскоке. Время контакта капли увеличивается с увеличением степени шероховатости поверхности. Это обусловлено создаваемой силой трения шероховатой поверхностью. Таким образом, имеется группа параметров, с помощью которых можно в достаточно широких диапазонах варьировать характеристики (рис. 3.35, 3.36) процесса дробления.

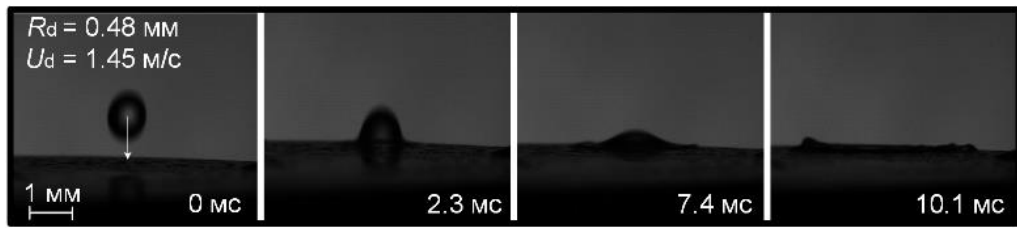
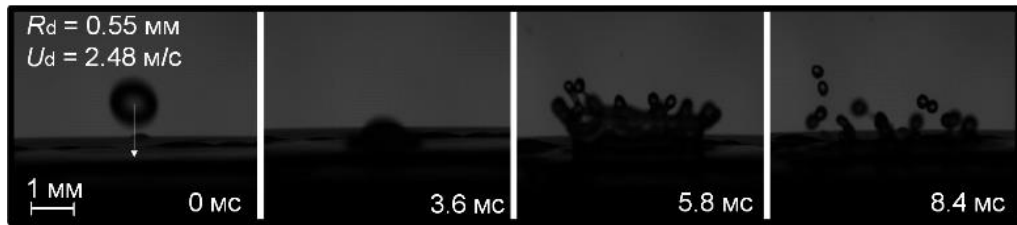
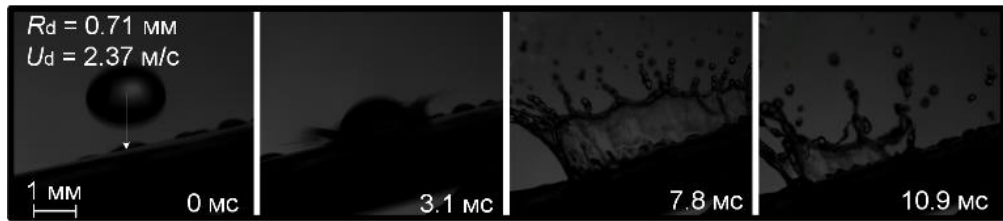
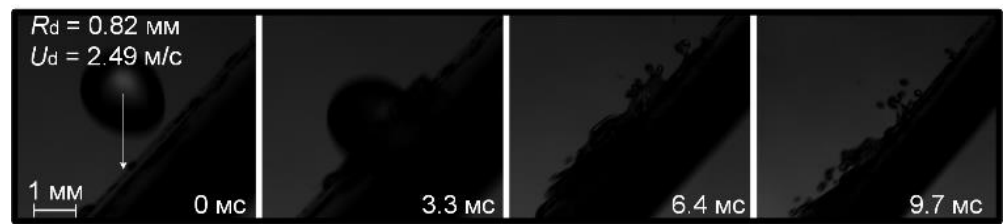
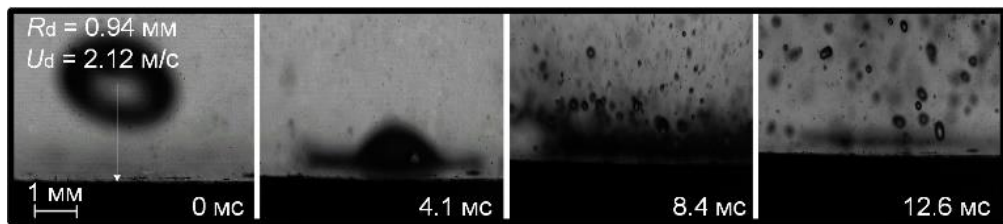
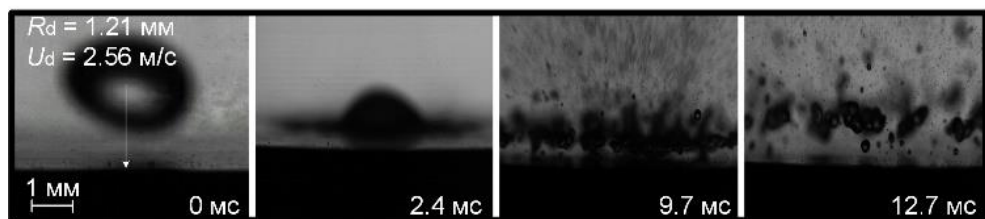
Перспективной задачей можно считать проведение экспериментов по регистрации условий и характеристик вторичного измельчения однородных и неоднородных капель при применении двух и более подходов (например, при соударениях капель между собой и перегреве до температур вскипания воды или при контакте с твердой поверхностью и между собой). Проведение экспериментов при таких комбинированных условиях затруднительно, но решение такого рода научной задачи представляется крайне перспективным в будущем. Особый интерес вызывает выстраивание последовательных технологических стадий в виде: соударения капель между собой при направлении (ориентации) форсуночных факелов под определенным углом друг к другу; размещение на пути падающих фрагментов жидкости преград в виде твердой разогретой поверхности, специализированных ребер, колец, решеток и соударение с последними; интенсивный нагрев нижней части камеры для микро-взрывного дробления оставшихся фрагментов. Анализ результатов настоящей работы показывает (рис. 3.35, 3.36), что, скорее всего, можно увеличить отношение S_1/S_0 более чем в 100 раз. Результаты выполненных экспериментов, а также данные и основные заключения экспериментальных и теоретических исследований обосновывают большие перспективы использования неоднородных аэрозольных потоков в реальных

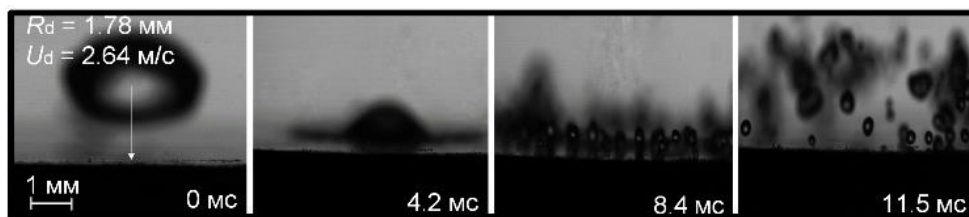
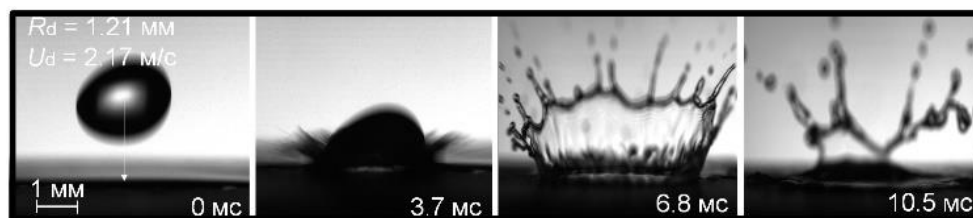
теплоэнергетических установках за счет активного использования процессов соударений капель с разным компонентным составом и при разных температурах нагрева.

3.9. Характеристики вторичных фрагментов при соударении капель одно- и многокомпонентных жидкостей с нагретой стенкой

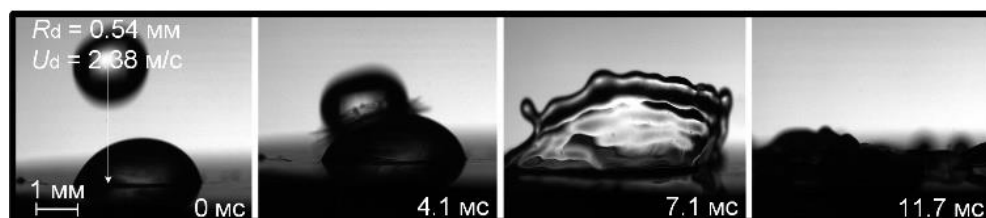
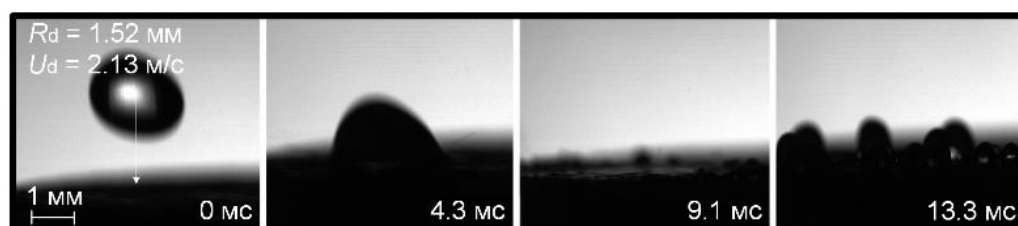
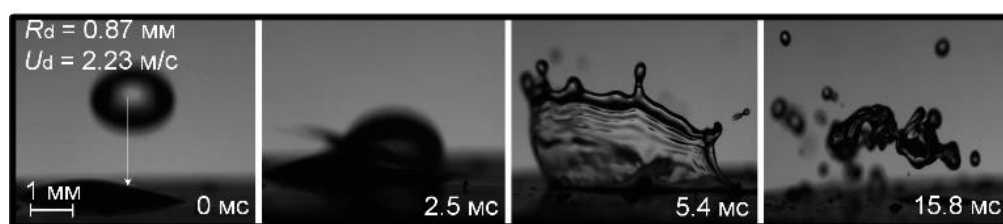
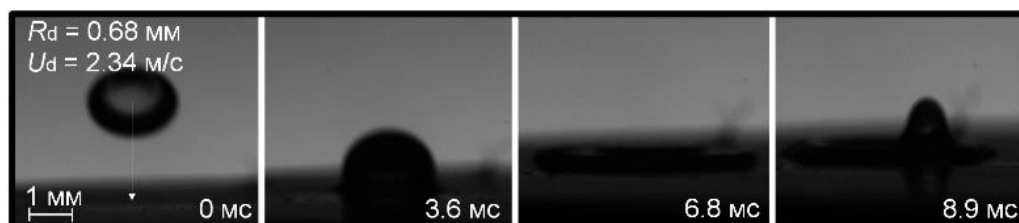
В ходе исследований процессов взаимодействия капель жидкости с твердой поверхностью установлено, что критическая скорость движения, при которой первая капля дробится за счет контакта с твердой поверхностью, составила 2.5 м/с ($We \approx 206$) для медной подложки, 2.4 м/с ($We \approx 380$) для подложки из алюминия. При числе Вебера меньше 100 вторая капля не дробится, а коагулирует с первой, растекшейся по твердой поверхности. Волновая структура на поверхности пленки жидкости при этом не образуется (рис. 3.45а). С повышением числа Вебера до 100–150 при попадании второй капли в первую образуется волновая структура, но отрыв капель от пленки не происходит. Дальнейшее повышение числа Вебера приводит к отделению капель жидкости от образовавшейся пленки (рис. 3.27б).

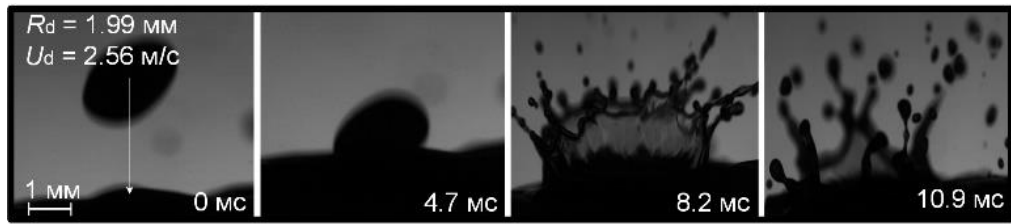
Для опытов с медной подложкой характерным было существенное увеличение количества образовавшихся фрагментов (от 20 до 30) при изменении угла атаки от 30 до 60° (рис. 3.27в). При этом дальнейшее уменьшение угла до 30° приводит к уменьшению количества вторичных фрагментов до 8–10 (рис. 3.27г).

*a**b**c**d**e**f*

 $\mathcal{H}$ 

3

 $\mathcal{U}$  $\mathcal{K}$  $\mathcal{L}$  $\mathcal{M}$



н

Рисунок 3.27. Типичные кадры экспериментов с иллюстрацией взаимодействия капли со стенкой [140]: *а* – вода; *б* – вода; *в* – вода, угол атаки $\alpha_d \approx 60^\circ$; *г* – вода, угол атаки $\alpha_d \approx 30^\circ$; *д* – вода, поверхность с температурой $T \approx 50^\circ\text{C}$; *е* – вода, поверхность с температурой $T \approx 100^\circ\text{C}$; *ж* – вода, поверхность с температурой $T \approx 180^\circ\text{C}$; *з* – металлическая поверхность с классом шероховатости 3 ($R_a = 20; 16; 10$ мкм; $R_z = 80; 63; 50; 40$ мкм); *и* – вода, поверхность покрыта трансформаторным маслом; *к* – вода, поверхность покрыта парафином; *л* – эмульсия (трансформаторное масло 30 об%, вода 70 об%); *м* – эмульсия (касторовое масло 30 об%, вода 70 об%); *н* – суспензия (уголь К 30 об%, вода 70 об%).

В ходе изучения влияния теплового фактора на последствия взаимодействия капель жидкости с твердой стенкой установлено, что при соударении капель с медной подложкой, нагретой до 50°C , капли на первом этапе растекаются по поверхности, после чего на границе раздела твердой и жидкой фаз начинается формирование больших капель, а на границе раздела жидкость-газ формируются мелкие фрагменты ($r_d \approx 0.01$ мм) (рис. 3.27д). Количество образовавшихся фрагментов очень велико (может достигать нескольких десятков). При отскоке же капли сильно деформируются. При этом от них отделяется 3–4 фрагмента ($r_d \approx 0.05$ мм). С увеличением температуры твердой стенки до 100°C количество образующихся капель увеличивается (рис. 3.27е). При отскоке капли деформируются меньше, отделение фрагментов не происходит. Дальнейшее увеличение температуры (до 180°C) приводит к тому, что от капли отделяются преимущественно большие фрагменты ($r_d \approx 0.1$ мм), количество которых составляло 25–40. В

целом можно отметить, что капли отскакивают от твердой поверхности, не разлетаясь в стороны (т.е. угол разлета существенно ограничен). Отделение мелких фрагментов при этом практически не наблюдалось (рис. 3.27ж).

При изучении влияния шероховатости на результат взаимодействия первой капли с твердой поверхностью использовалась алюминиевая подложка с разной степенью шероховатости. Установлено, что при одинаковых числах Вебера ($We \approx 380$) основным режимом взаимодействия первой капли с шероховатой поверхностью является ее дробление (рис. 3.27з). В случае же гладкой поверхности при идентичных условиях взаимодействия первая капля растекается по поверхности, а каждая последующая взаимодействует с образованной пленкой жидкости.

В случае соударения капель со стенкой, покрытой трансформаторным маслом (рис. 3.27и), зарегистрирована коагуляция всех последовательно падающих капель. Образовавшаяся на твердой поверхности пленка эмульсии способствует объединению всех попадающих капель в практически монослой. Это объясняется тем, что трансформаторное масло увеличивает силы поверхностного натяжения жидкости и межфазного взаимодействия. При столкновении капель жидкости с твердой поверхностью, покрытой парафином (рис. 3.27к), отлетают малые частицы – основная же часть капли разрушается на поверхности и лежит на ней отдельными фрагментами. Данное явление объясняется высокой гидрофобностью парафина.

При взаимодействии капель эмульсии, содержащей трансформаторное масло (30 об%) и воду (70 об%), с твердой поверхностью регистрировались эффекты, подобные установленным при взаимодействии капель воды со стенкой, покрытой трансформаторным маслом (рис. 3.27л). Образующаяся масляная пленка не давала каплям разлетаться по поверхности и способствовала коагуляции при попадании одной капли в другую. Отдельные фрагменты на поверхности собирались в единую массу, а разлет отделившихся капель при этом очень мал. В случае же взаимодействия капель эмульсии из касторового масла (30 об%) и воды (70 об%) в результате

дробления образовывалось большее количество фрагментов, чем у эмульсии трансформаторного масла (рис. 3.27м). В отличие от эмульсии трансформаторного масла, коагуляция разлетевшихся по поверхности капель жидкости происходила не так интенсивно. Суспензия на основе угля (30 мас% уголь, 70 мас% вода) дробится сильнее (количество вторичных фрагментов существенно больше), чем вода при взаимодействии с твердой поверхностью, образуя в среднем на 10–15 капель больше (рис. 3.27н). Это объясняется наличием твердых включений в каплях, которые способствуют неустойчивости поверхности капель и их большому разрушению.

Важная закономерность установлена при сравнительном анализе влияния конфигурации поверхности капли при контакте со стенкой на характеристики процесса измельчения. Для этого эксперименты проводились с гладкими подложками и металлической сеткой (1×1 мм). В случае столкновения капли воды с сеткой формируются вытянутые (максимальный продольный размер достигал $L \approx 4$ мм) фрагменты цилиндрической формы. Количество и размеры таких фрагментов существенно отличались от аналогичных результатов экспериментов с взаимодействующими каплями жидкости между собой (соударяющимися). Установлено, что для интенсивного дробления более перспективно соударение с твердой стенкой при площади поверхности, существенно большей площади контакта с каплей, так как вследствие большого количества падающих капель площадь контакта растет, и важно обеспечить тонкий слой жидкости на твердой поверхности, чтобы существенно измельчить каждую из капель (особенно в случае относительно небольших скоростей движения капель, высокой вязкости и поверхностного натяжения жидкости).

Следует отметить, что в отличие от соударений капель между собой [97,106,109,141,142] при регистрации условий и характеристик взаимодействия капель жидкости с твердой стенкой установлены два режима: растекание первой капли и поглощение всех последующих капель с образованием единого жидкостного слоя на поверхности стенки;

формирование мелкодисперсного аэрозоля за счет соударения капли со стенкой. При столкновениях капель между собой могут реализовываться четыре режима [97,106,109,141,142]: коагуляция (слияние); отскок (сближение и последующее удушение капель друг от друга без прямого контакта, так как кинетической энергии недостаточно для преодоления газовой прослойки между каплями); разлет (соударение, при котором количество и размеры образующихся фрагментов соответствуют исходным каплям); дробление (измельчение). При этом в зависимости от свойств капель, их размеров, скорости движения, углов атаки, температуры нагрева диапазоны чисел Вебера, соответствующих каждому из четырех режимов, могут значительно отличаться. Поэтому общими для известных результатов экспериментов с двумя соударяющимися каплями можно считать диапазоны [97,106,109,141,142]: отскок – $We=0.5-5$; коагуляция – $We=1-20$; разлет – $We=15-50$; дробление – $We=30-100$, которые существенно отличаются от критических значений в случае соударения с твердой поверхностью.

На рис. 3.28 приведены результаты изучения влияния двух ключевых факторов, определяющих силу инерции: размеры и скорости движения капель. Показаны диапазоны изменения размера, скорости движения капли и числа Вебера, соответствующие двум исследованным режимам: интенсивному дроблению и налипанию капель на стенку с формированием тонкого жидкостного слоя (пленки). При этом результаты обобщены по данным, полученным во всех проведенных опытах с начальными размерами капель, варьируемыми в широком диапазоне (0.5–3 мм). Для регистрации масштабов смещения границ переходов между двумя исследуемыми режимами соударений капель диапазон 0.5–3 мм разделен на 4 части (0.5–1 мм; 1–2 мм; 2–2.5 мм; 2.5–3 мм), для которых и продемонстрированы результаты исследований на рис. 3.28.

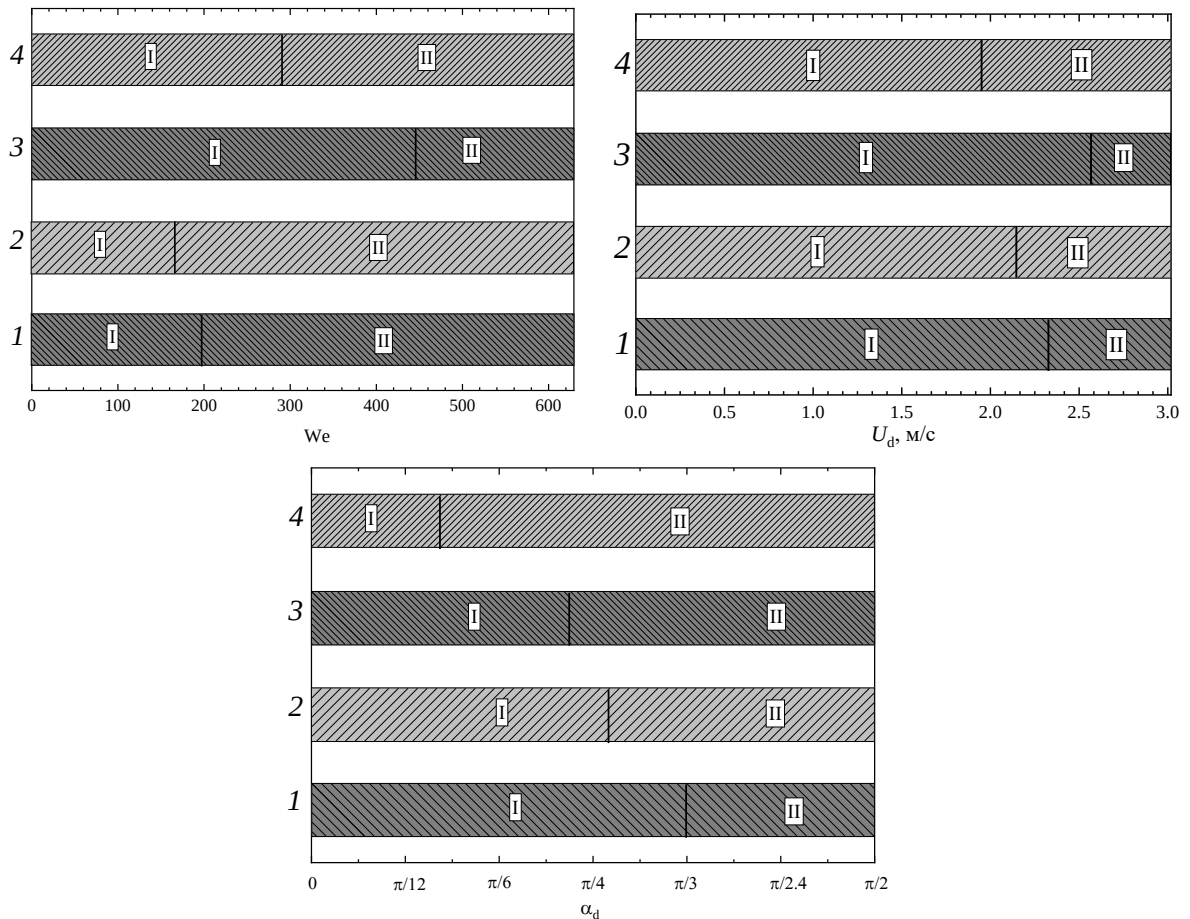


Рисунок 3.28. Предельные скорости движения, углы атаки и числа Вебера, достаточные для измельчения каплей при соударении со стенкой для разных начальных размеров [140]: 1 – $R_d=0.5-1$ мм; 2 – $R_d=1-2$ мм; 3 – $R_d=2-2.5$ мм; 4 – $R_d=2.5-3$ мм; I – растекание капли; II – дробление капли.

Проведенные эксперименты показали, что определяющее влияние на границу перехода от режима растекания к дроблению оказывает скорость движения капли. На рис. 3.28 видно, что в среднем при скорости движения более 2 м/с для капель размерами 0.5–3 мм регистрировались условия устойчивого дробления. При этом можно было предположить, что чем больше размер капли, тем меньшая скорость движения (т.е. атаки) последней была достаточна для интенсивного измельчения. Но переходные значения критических скоростей на рис. 3.28 показывают, что средние значения последних могут несколько немонотонно меняться для слишком маленьких и слишком больших размеров капель. Потому, скорее всего, целесообразно

говорить об общем диапазоне критических скоростей движения капель 2–2.5 м/с. Это хорошо коррелирует с заключениями [143], где установлено, что дробление капель воды (в режиме всплеска) устойчиво происходило при скоростях движения более 2.12 м/с.

Видеокадры проведенных опытов показали, что в диапазоне начальных размеров капель до 1.5–2 мм прослеживалась общая закономерность, заключающаяся в том, что чем выше размеры, тем меньшие скорости движения были достаточны для их дробления. Как и следовало ожидать, критические значения чисел Вебера можно достичь за счет увеличения размера или скорости движения капли. При этом вклад каждого из этих двух параметров достаточно существенно отличается. В частности, для формирования большего количества мелких вторичных фрагментов необходимо увеличивать размер исходной капли, а для получения минимального размера каждой из образованных капелек целесообразно повышать скорость движения. Поэтому на рис. 3.28 для первых двух диапазонов размеров капель установлено ожидаемое смещение границы перехода от растекания к дроблению в сторону меньших значений скорости движения (и числа Вебера, соответственно) с ростом R_d . При больших же значениях начальных размеров капель установлена существенная трансформация поверхности, которая способствовала как уменьшению, так и росту переходных (критических) скоростей движения (рис. 3.28). Крупные капли чаще всего имели форму блина или эллипсоида. Для блинов были достаточные меньшие критические скорости движения, а для эллипсоидов – большие по сравнению со сферой. Эти же эффекты стали основной причиной аналогичных заключений о переходных критических числах Вебера. На рис. 3.28 виден довольно широкий диапазон установленных значений We для четырех интервалов начальных размеров – $We=180–420$.

Роль угла атаки при определении режима соударения со стенкой довольно наглядно продемонстрирована на рис. 3.28. Хорошо видно, что чем больше начальный размер капли, тем меньший угол взаимодействия

достаточен для интенсивного вторичного измельчения. Это, главным образом, обусловлено высокими значениями сил инерции. Мелкие же капли могли налипать на поверхность при угле взаимодействия менее $\pi/3$. Поэтому для интенсификации дробления капель при взаимодействии со стенкой можно рекомендовать диапазон угла атаки от $\pi/3$ до $\pi/2$. Эти результаты развивают представления, сформированные по данным [144]. Так, в [144] приведены результаты исследований (численных и экспериментальных) процесса соударения капли с наклонной мокрой поверхностью. Начальная температура капель составляла 50 °С, температура твердой поверхности равна 27 °С. Угол контакта капель с поверхностью составлял 30°, скорость движения варьировалась в диапазоне от 1 до 6 м/с. Показано [144], что при малых скоростях наблюдается распространение капли по поверхности, а при скорости перед соударением 6 м/с на наклонной поверхности наблюдается корона, которая в дальнейшем стабильно дробится на вторичные капли.

Карта режимов взаимодействия капли со стенкой на рис. 3.29а построена при расчете двух определяющих критериев – чисел Вебера и Онезорге, учитывающих соотношение сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения. Таким образом, при построении этой карты не учитываются угол атаки и характеристики подложки. Это является основной причиной довольно существенного рассеяния экспериментальных значений регистрируемых параметров как по оси Oh, так и по We. Тем не менее, при обобщении экспериментальных данных можно достаточно наглядно выделить границы переходов от первого ко второму режиму взаимодействия капель со стенкой. Также немаловажную роль сыграл достаточно широкий диапазон варьирования размеров (0.5–3 мм) капель, на основе которого построена карта We(Oh). В целом распределение экспериментальных точек выглядит вполне закономерным и отражает доминирование условий интенсивного измельчения капель (с максимальными значениями отношений S_1/S_0) при росте We и Oh (т.е. доминировании сил инерции и вязкости над силами поверхностного натяжения).

На рис. 3.29б, в хорошо видны отличия установленных значений S_1/S_0 и распределений образующихся фрагментов жидкости по размерам при разных начальных размерах капель, соответствующих диапазону 0.5–3 мм. Хорошо видно, что отличия существенны при $We < 250$ и могут достигать 30–40%. Этот результат иллюстрирует широкие возможности диапазонов варьирования группы параметров при $We < 250$ для обеспечения требуемых параметров измельчения. Общая закономерность состоит в том, что чем меньше начальный размер капель, тем больше мелких фрагментов жидкости получается при дроблении, но чем больше размер исходной капли, тем больше в целом количество вторичных фрагментов. Важное значение имеет скорость движения капель перед соударением при определении одного из двух режимов соударений.

На рис. 3.30 показано, что в отличие от системы координат $We(\theta)$ границы переходов от растекания к дроблению капель на карте с использованием безразмерного углового параметра взаимодействия более наглядны. Такое же заключение можно сделать и по зависимостям S_1/S_0 (We). Чем больше угол атаки, тем при меньших скоростях и размерах капель (соответственно, числах Вебера) происходит устойчивое дробление, приводящее к образованию облака мелких фрагментов жидкости. Это обусловлено ростом сил инерции, трения и аэродинамического сопротивления, соответственно. Распределения образующихся фрагментов жидкости по размерам на рис. 3.30в показывают переход к так называемым нормальным распределениям лишь при больших начальных размерах капель. В диапазоне малых начальных размеров доминируют мелкие фрагменты. Чем выше значения We , тем заметнее данные тенденции.

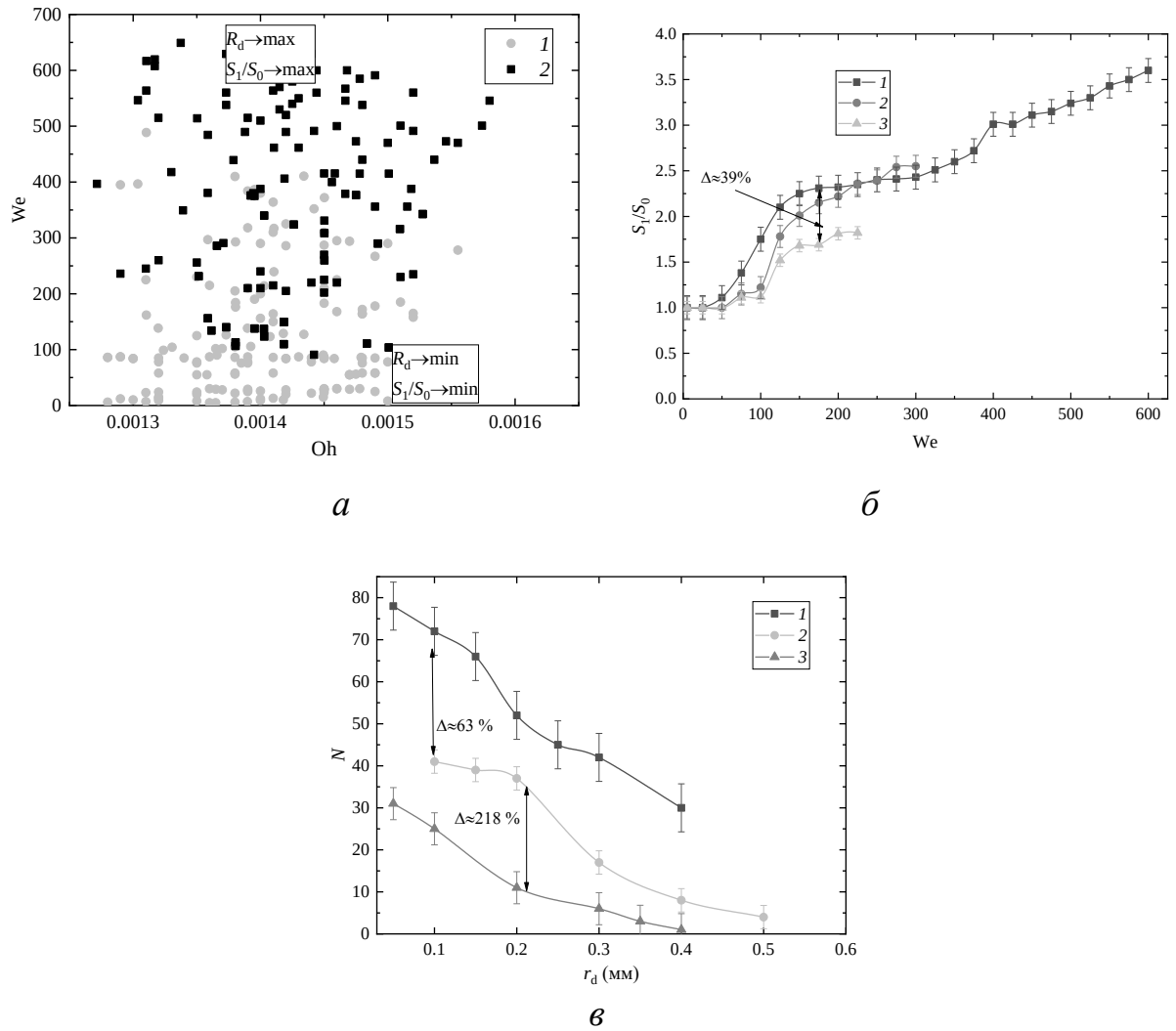


Рисунок 3.29. Карта режимов взаимодействия [140] (1 – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими; 2 – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (*a*); зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (*б*); распределение по размерам вторичных фрагментов (*в*) (для $We \approx 200$) при варьировании размера начальной капли: 1 – $R_d = 2\text{--}2.7$ мм; 2 – $R_d = 1\text{--}2$ мм; 3 – $R_d = 0.5\text{--}1$ мм.

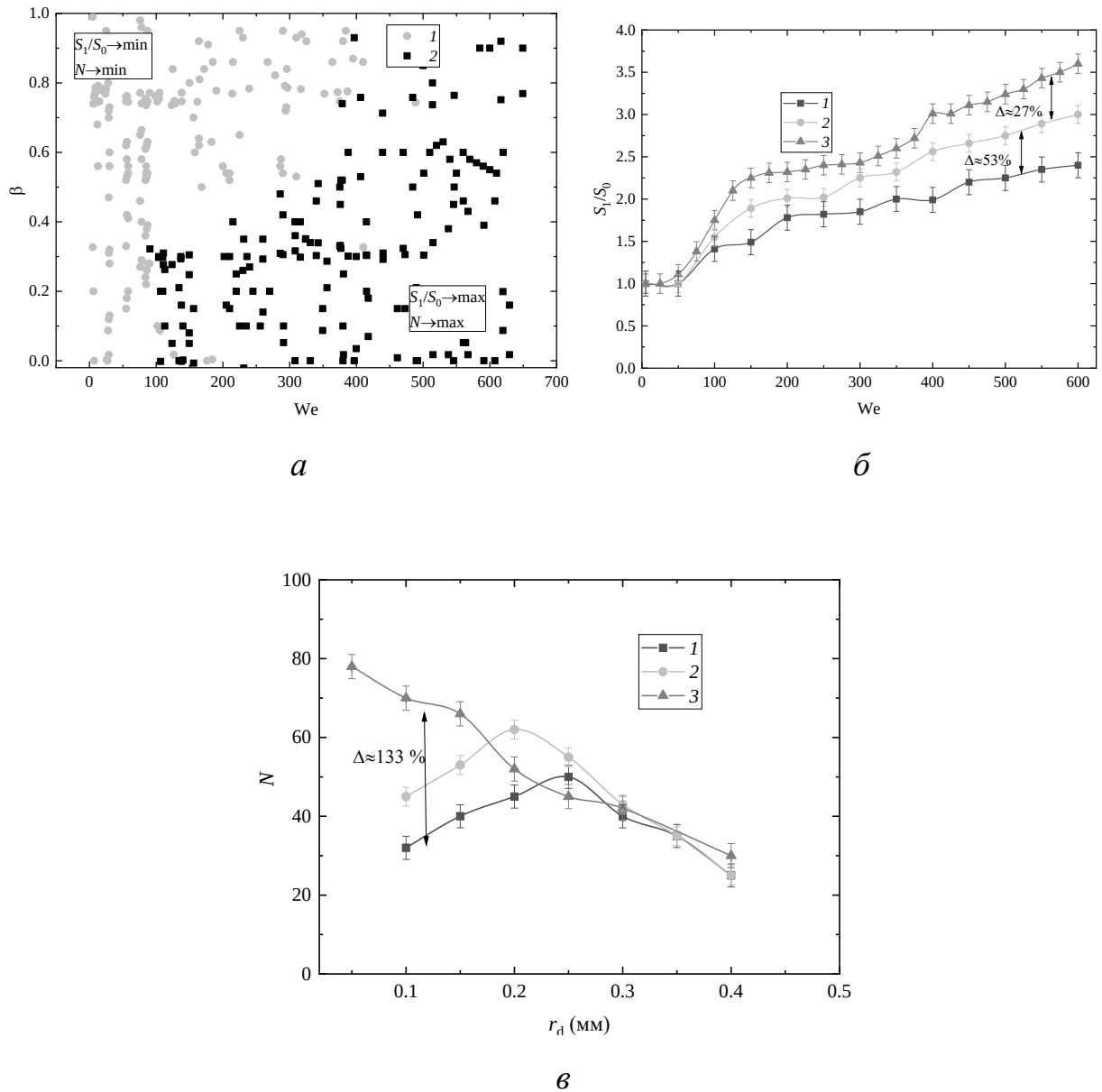


Рисунок 3.30. Карта режимов взаимодействия [140] с учетом углового параметра и числа Вебера (*a*): 1 – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими; 2 – дробление; зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (*b*); распределение по размерам вторичных фрагментов (*v*) (для $We \approx 200$) при варьировании угла контакта капли со стенкой: 1 – $\alpha_d = 0-30^\circ$; 2 – $\alpha_d = 30-60^\circ$; 3 – $\alpha_d = 60-90^\circ$.

Эксперименты показали (рис. 3.31), что наибольшее количество мелких капель можно обеспечить при соударении с нагретой подложкой. При этом установлен ограниченный диапазон температур (от 50 до 100 °C), в котором

данный фактор оказывает значимое влияние. Этот результат хорошо коррелирует с известными данными [73,145], в которых установлены особенности роста числа мелких капель при нагревании подложки до определенных температур (150–300 °C), а затем существенного снижения числа таких капель. В [73,145] эти особенности объяснены изменением режимов растекания соударяющихся капель по стенке и слияния последующих капель с формирующимся слоем жидкости на твердой поверхности. Выводы [73,145] можно дополнить группой гипотез для объяснения результатов экспериментов, приведенных на рис. 3.49. Во-первых, нагрев подложки приводит к формированию разогретого слоя жидкости на поверхности при попадании первых капель. Это приводит к снижению поверхностного натяжения и ослабляет межмолекулярные связи. Как следствие, интенсифицируется разрушение приповерхностных слоев и попадающих новых капель. Во-вторых, за счет интенсификации нагрева стенки (выше 100 °C) между контактирующей каплей и ней образуется парогазовая буферная зона, которая снижает тепловой поток от подложки к жидкости (вследствие существенно меньшей температуропроводности по сравнению с материалом твердой стенки). Это приводит к снижению интенсивности прогрева приповерхностного жидкостного слоя. Поэтому после определённых температур нагрев стенки не может приводить к интенсификации нагрева. Наоборот, регистрировалось снижение интегральных характеристик процесса измельчения капель (например, при росте температуры подложки от 100 до 180 °C), т.е. уменьшалось количество вторичных фрагментов. В-третьих, нагрев стенки от 20 до 100 °C способствует достижению температур вскипания воды. Это приводит к возникновению так называемых эффектов микро-взрывного вскипания контактирующих капель и их разбрызгиванию. Поэтому количество мелких капель и отношение S_1/S_0 будет кратно расти, как показано на рис. 3.31. При этом распределение вторичных фрагментов по размерам довольно

равномерное. Как следствие, можно сделать вывод о кратном измельчении капель с получением равномерных распределений.

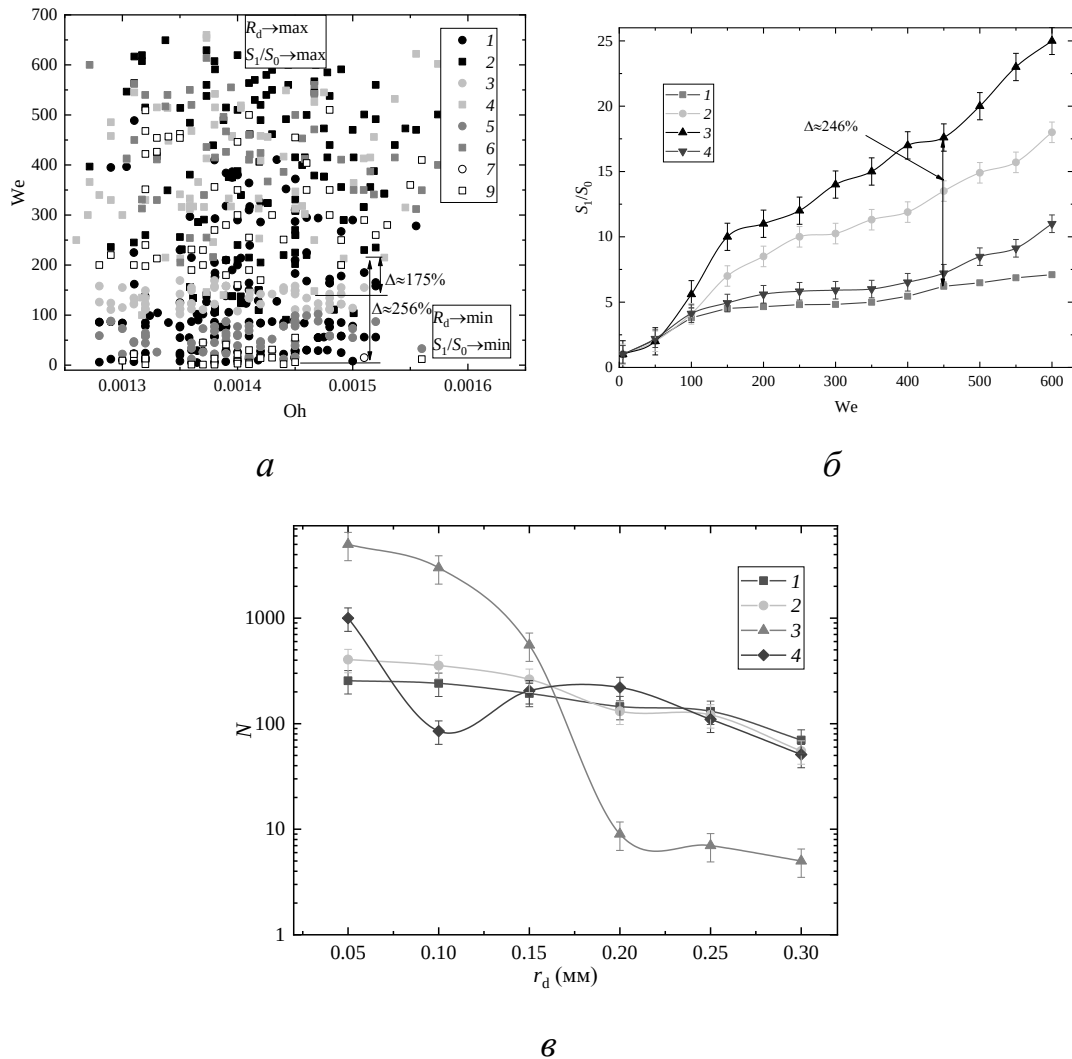


Рисунок 3.31. Карта режимов взаимодействия [140] (круг – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими, квадрат – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (*a*): 1,2 – $T \approx 20^\circ\text{C}$; 3,4 – $T \approx 50^\circ\text{C}$; 5,6 – $T \approx 100^\circ\text{C}$; 7,8 – $T \approx 180^\circ\text{C}$; зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (*б*); распределение по размерам вторичных фрагментов (*в*) (для $We \approx 200$) при варьировании температуры стенки: 1 – $T \approx 20^\circ\text{C}$; 2 – $T \approx 50^\circ\text{C}$; 3 – $T \approx 100^\circ\text{C}$; 4 – $T \approx 180^\circ\text{C}$.

В-четвертых, нагрев подложки может оказывать заметное влияние на характеристики процесса фрагментации капель за счет интенсификации так называемых эффектов отскока вновь образующихся вторичных фрагментов.

Последние вследствие нагрева испаряются, вокруг них формируется буферная паровая область, препятствующая коагуляции с другими соударяющимися каплями. При этом динамичное измельчение может происходить при соударении нагретых фрагментов жидкости как с холодными каплями, так и с нагретыми. Чем выше температура фрагментов жидкости, тем меньше их вязкость и поверхностное натяжение. Это способствует интенсификации последующего (цепной характер) разрушения капель.

Полученные результаты хорошо соответствуют известным представлениям (например, [73,145]) о разделении температурного диапазона нагрева стенок на три интервала, соответствующие разным условиям взаимодействия капель и твердой поверхности: первый – растекание по поверхности, второй – термическое распыление в режиме микро-взрывной фрагментации, третий – отскок капли от нагретой поверхности, последовательное касание последней несколько раз с разрушением в режиме частичной фрагментации. В целом можно отметить удовлетворительное соответствие как по переходным тепловым условиям, так и по видеокадрам происходящих процессов. Основное отличие состоит в том, что в [73,145] не проводился детальный анализ распределений количества и размеров образующихся фрагментов, а также существенной неоднородности состава на примере суспензий и эмульсий. С учетом полученных в настоящей работе данных можно прогнозировать эти распределения для экспериментов [73,145], а также опытов, процитированных в этих статьях.

Следует отметить, что полученные в настоящей работе результаты экспериментов расширяют представления, полученные в опытах [146,147]. В частности, авторы [146] изучали взаимодействие капель альтернативного реактивного топлива с нагретой до 25 до 350 °С поверхностью. Диапазон чисел Вебера составлял 28–886. Отмечено интенсивное разрушение пленки жидкости с формированием совокупности вторичных капель при температурах более 150 °С. При температуре поверхности 300 °С

взаимодействие реализуется в виде образования обода, который затем разлетается на вторичные капли, однако дробление менее интенсивное (характерно образование большого количества мелких капель). Установлено, что количество вторичных фрагментов (капель), образующихся на поверхности, значительно больше для $We=886$ (при температурах поверхности $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $210\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем при $We = 166$. В [147] сделаны подобные заключения. Исследовалось влияние температуры поверхности на результат столкновения капель с ней (температура варьировалась от 170 до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости капель $2.07\text{--}2.1\text{ м/с}$). Интенсивное дробление наблюдалось при температурах поверхности $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. При взаимодействии с поверхностью, температура которой более $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, регистрировалось образование кольца с последующим объединением жидкости и отскоком от поверхности.

Важно также отметить, что в [148] предложены оригинальные подходы к формированию карт режимов взаимодействия, полученные с применением критериальных выражений, учитывающих не только соотношение сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения, но и продолжительность контакта капли с подложкой, а также основные теплофизические свойства жидкости (теплопроводность, теплоемкость, плотность). Так как в диссертационной работе не было возможности контролировать все указанные свойства и параметры из-за ограниченных экспериментальных возможностей, то можно считать построение карт режимов взаимодействия с применением подхода [148] перспективной задачей. Скорее всего, в таком случае можно будет связать характеристики вторичных фрагментов с временами взаимодействия твердой стенки и каждой последующей капли, а также временами растекания жидкости по поверхности.

На рис. 3.32 видны отличия режимов взаимодействия капель с твердой стенкой при разных материалах последней, а также при использовании мелкоячеистой сетки. На основе результатов экспериментов [73,139,145,149] можно было сформулировать предположение о том, что мелкодисперсные сетки будут способствовать росту числа мелких капель. Проведенные

эксперименты показали, что капли при соударении с сеткой образуют совокупность жидкостных фрагментов гантелевидных форм. Площадь свободной поверхности жидкости возрастает в 2.2 раза (рис. 3.32б), но при идентичных значениях We соударение с твердой стенкой может приводить к большему измельчению капель. В частности, размеры фрагментов достигают 350–500 мкм на рис. 3.32в (в экспериментах с использованием сетки). Если размер ячеистой структуры принимать еще меньше, то падающая капля будет распадаться с еще большими по размерам фрагментами и более длительно, так как давления недостаточно для выдавливания жидкости через ячейки. Применение мелкоячеистых сеток нецелесообразно в реальных технологиях, особенно при использовании существенно неоднородных жидкостных составов (с твердыми частицами или высоковязкими жидкими примесями).

При ударе капли о поверхность твердой подложки последствия дробления капли (число фрагментов и их размеры) во многом определяются кинетической энергией капли. Если поверхность гладкая, то площадь взаимодействия при ударе минимальна. Если же поверхность шероховатая, то площадь поверхности капли при взаимодействии существенно увеличивается (можно добиться роста этого параметра в 2–3 раза). Соответственно растет и сила трения, действующая на каплю в момент удара о негладкую поверхность. В результате кинетическая энергия капли, затрачиваемая при ударе о гладкую поверхность в основном, расходуется на ее дробление. При соударении с шероховатой поверхностью часть кинетической энергии расходуется на трение, т.е. происходит ее диссипация. Кроме того, при значительной шероховатости поверхности, как в случае с сеткой, вертикальные элементы рельефа препятствуют дроблению. Часть капли, попавшая в углубление сетки, не может трансформироваться в поперечном направлении. Верхняя часть капли может разбрызгиваться лишь настолько, насколько она выступает из углубления сетки.

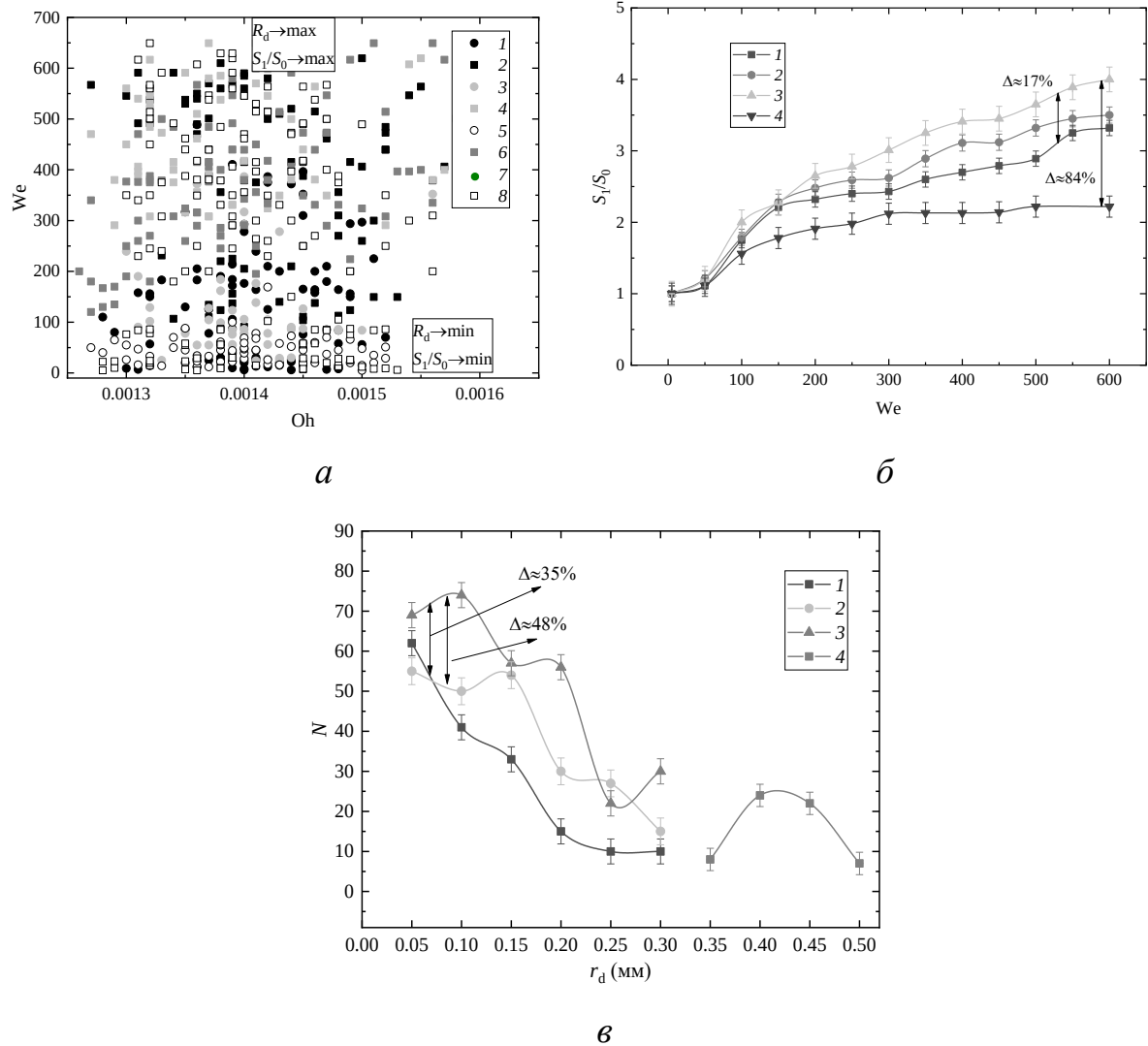


Рисунок 3.32. Карта режимов взаимодействия [140] (круг – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими, квадрат – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (*a*) в условиях температуры стенки около 100°C : 1,2 – медная поверхность; 3,4 – стальная поверхность; 5,6 – стеклянная поверхность; 7,8 – сетка. Зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (*b*).

Распределение по размерам вторичных фрагментов (*в*) (для $We \approx 200$) при варьировании материала и вида стенки: 1 – медная поверхность; 2 – стальная поверхность; 3 – стеклянная поверхность; 4 – мелко перфорированная металлическая сетка.

При сравнении характеристик измельчения капель, контактирующих с медной, стальной и стеклянной поверхностью установлены интересные распределения (рис. 3.32в). Для металлических поверхностей достигнуты достаточно близкие по характеру и размерам распределения, а при контакте со стеклянной подложкой число мелких фрагментов доминировало. Но отношение площадей поверхности жидкости при использовании металлических подложек возрастало масштабнее (рис. 3.32б). Чем выше значения чисел Вебера, тем заметнее данные закономерности. Это можно объяснить существенными отличиями тепловых потоков от стенки к приближающейся капле жидкости. Для металлических подложек эти тепловые потоки существенно выше вследствие большей теплопроводности и температуропроводности по сравнению со стеклом. Чем выше тепловой поток, тем масштабнее измельчение капель.

На рис. 3.33 и 3.34 показано, что шероховатость и гидрофильность поверхности стенки могут существенно влиять как на предельные (достаточные для фрагментации) скорости движения и размеры капель жидкости, способные приводить к дроблению в режиме получения аэрозольного облака, так и на количество и размеры вторичных фрагментов. При этом, в отличие от предыдущего анализируемого фактора (рис. 3.50), на рис. 3.33 и 3.34 показано, что рост отношения S_1/S_0 и количества образующихся фрагментов жидкости может быть в 2–6 раз, т.е. довольно масштабным (особенно при нагреве стенок).

Физические причины существенного роста числа мелких капель при повышении шероховатости подложки хорошо объяснены в [28,29]. По результатам выполненных экспериментов можно выделить влияние еще трех факторов. Первый – меняется режим течения приповерхностного жидкостного слоя. Чем больше размеры и скорости движения капли перед ударом, тем неустойчивее становится данный слой на шероховатой поверхности. Формирующаяся жидкостная пленка рвется с образованием большого количества фрагментов. Второй – шероховатость поверхности

приводит к увеличению коэффициента теплообмена и, как следствие, тепловому потоку к пленке и каплям (моделирование поля течения и теплообмена в капле, находящейся на гидрофобной поверхности приведено в [150]). Это вызывает формирование буферных паровых слоев между ними и интенсифицирует соударения с формированием мелкодисперсного аэрозоля. Третий – чем больше степень шероховатости подложки, тем неравномернее поверхность пленки жидкости (в виде волн). Попадание падающей капли в вершину (или многочисленные вершины) таких волн интенсифицирует разрушение как пленки, так и капли. При контакте с более гладкой поверхностью пленки жидкости чаще всего регистрировались условия растекания контактирующих капель по поверхности и последующая коагуляция со всеми остальными каплями.

Следует отметить, что в [151,152] приведены интересные результаты изучения влияния шероховатости поверхности на поведение ударяющейся капли. Значения шероховатости R_a составляли 0.04, 2, 4, 6, 8 и 10 мкм. Установлено увеличение времени контакта с поверхностью и максимального диаметра растекания с увеличением шероховатости. В исследовании [145] выявлено, что для поверхностей с повышенной шероховатостью ($R_a=0.1-6.3$ мкм) характерно распространение капли на поверхности с последующим образованием обода, который разделяется на вторичные капли. Для поверхности с шероховатостью $R_a=6.3$ мкм обод образуется сразу после удара. По результатам исследований [151,152] сделан вывод о том, что повышение шероховатости поверхности взаимодействия приводит к разбрызгиванию капель.

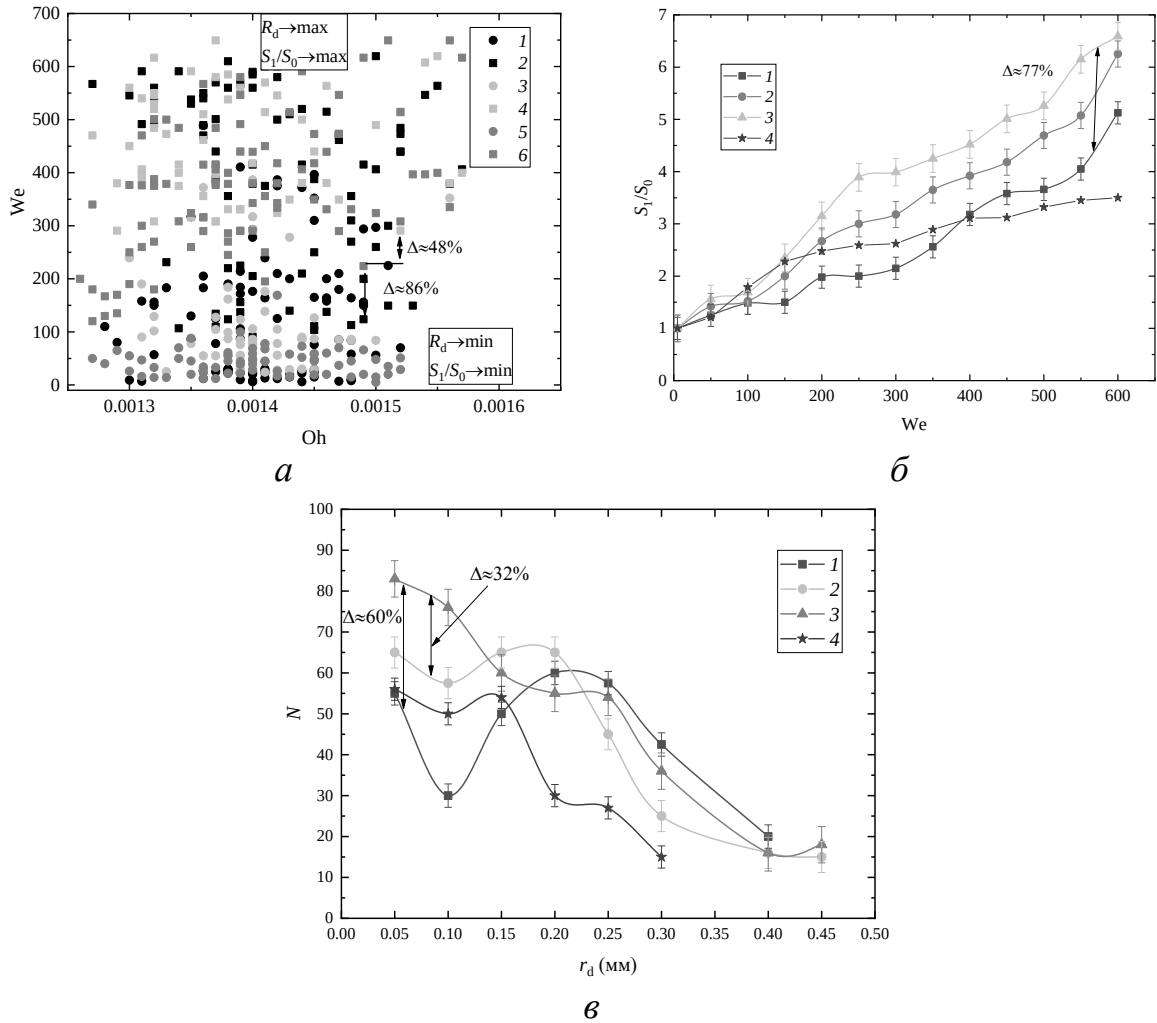
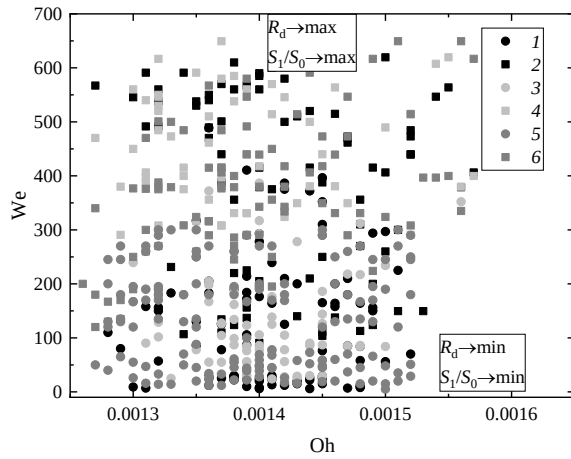
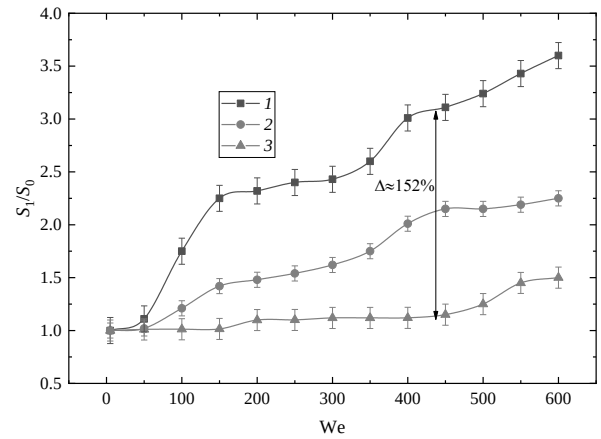


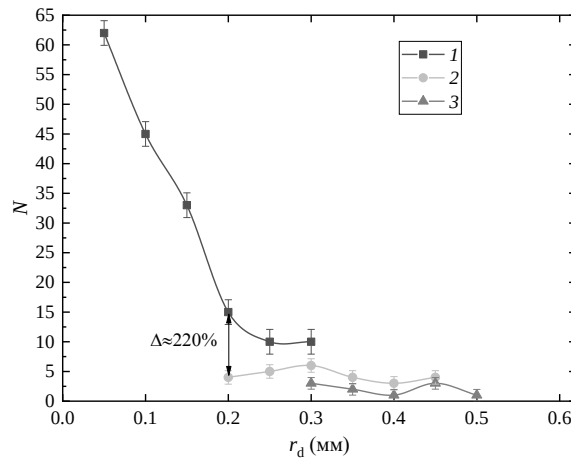
Рисунок 3.33. Карта режимов взаимодействия [140] (круг – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими, квадрат – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (*a*): 1,2 – класс шероховатости 14 ($R_a=0.01$; 0.008 мкм; $R_z=0.05$; 0.04; 0.032 мкм); 3,4 – класс шероховатости 6 ($R_a=2.5$; 1.25 мкм; $R_z=10$; 8; 6.3 мкм); 5,6 – класс шероховатости 3 ($R_a=20$; 16; 10 мкм; $R_z=80$; 63; 50; 40 мкм). Зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (*б*); распределение по размерам вторичных фрагментов (*в*) при варьировании шероховатости подложки: 1 – класс шероховатости 14 ($R_a=0.01$; 0.008 мкм; $R_z=0.05$; 0.04; 0.032 мкм); 2 – класс шероховатости 6 ($R_a=2.5$; 1.25 мкм; $R_z=10$; 8; 6.3 мкм); 3 – класс шероховатости 3 ($R_a=20$; 16; 10 мкм; $R_z=80$; 63; 50; 40 мкм); 4 – гладкая поверхность.



а



б



в

Рисунок 3.34. Карта режимов взаимодействия [140] (круг – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими, квадрат – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (а): 1,2 – медная поверхность; 3,4 – поверхность, натертая парафином; 5,6 – поверхность, натертая маслом. Зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (б); распределение по размерам вторичных фрагментов (в) (для $We \approx 200$) при варьировании свойств покрытия подложки: 1 – медная поверхность; 2 – поверхность, покрытая парафином; 3 – поверхность, покрытая маслом.

Но результаты проведенных экспериментов, представленные на рис. 3.33в, дают основания для других выводов. Зависимости $N(r_d)$ показывают,

что характерные размеры шероховатости поверхности существенно влияют на количество вторичных фрагментов при малых размерах исходных (родительских) капель. При размерах исходных капель, сопоставимых с размерами элементов шероховатости, количество и размеры вторичных фрагментов соответствуют условиям удара о гладкую поверхность. Если поперечный размер капли меньше характерного размера элемента шероховатости (углубления), то капля не замечает влияния вертикальных стенок углубления. В случае точного попадания капли в ячейку шероховатости она дробится, как при ударе о гладкую поверхность. В других случаях элемент шероховатости влияет на характеристики вторичных фрагментов. Если исходная капля частично попадает в ячейку шероховатости и на ребро элемента шероховатости, то процесс взаимодействия соответствует условиям удара о металлическую сетку.

На рис. 3.34 показано, что чем больше гидрофобность материала поверхности стенки, тем масштабнее происходило дробление падающей капли. Для гидрофильных поверхностей (даже нагретых до достаточно высоких температур), наоборот, характерен отскок или распространение капли на поверхности. При этом схемы придания гидрофобных свойств могут быть самыми разными (за счет использования специализированных покрытий и материалов). В частности, в исследованиях [153] изучено влияние химической обработки металлической поверхности на поведение капель, контактирующих с данной поверхностью. Всплеск капель наблюдался при контакте с гидрофобной протравленной поверхностью. В [154] отмечено увеличение максимального диаметра растекания капли без дробления на нагретой до 300 °С супергидрофильной поверхности с 30 до 40% от диаметра при контакте с не нагретой поверхностью. В настоящей работе интересные особенности установлены при проведении экспериментов с соударением большой группы капель о такие поверхности. Установлено, что эффективнее повышать площадь контакта капель с такими

поверхностями, чтобы увеличить S_1/S_0 . Но для обеспечения доминирования количества мелких фрагментов следует увеличивать We .

На рис. 3.35 и 3.36 показано, что реологические характеристики компонентов жидкостных составов могут существенно изменять соотношения сил инерции, поверхностного натяжения и вязкости на картах режимов взаимодействия. В частности, критические (переходные) значения чисел Рейнольдса, Вебера и Онезорге, соответствующие переходу от растекания и коагуляции к дроблению, отличаются в 1.5–3 раз. Такие отличия можно считать значительными. Особенно отличаются условия взаимодействия капель суспензий (отличия по количеству и размерам вторичных фрагментов, а также критическим числам Re , We , Oh могут быть более, чем в 10 раз). Это обусловлено дополнительным влиянием нескольких факторов, связанных с агломерацией твердых частиц в составе капель и их ударом о твердую поверхность, повышением вязкости состава и ускорением формирования жидкостных фрагментов при соударении со стенкой.

Если выполнять сопоставление результатов экспериментов с неоднородными (многокомпонентными) составами на рис. 3.54, то можно отметить наиболее масштабный рост количества крупных жидкостных фрагментов в случае соударения со стенкой высоковязких капель суспензий и эмульсий. Наличие твердых частиц и жидких примесей с малым поверхностным натяжением существенно ослабляет связи в приповерхностном слое жидкости, так и внутри падающих капель. Поэтому они существенно трансформировались в процессе полета и при ударе о стенку. Именно в случае неоднородных составов капель регистрировались достаточно существенные отклонения форм капель от сферических (блины, гантели, эллипсоиды). Как известно, силы аэродинамического сопротивления в случае таких форм капель значительно возрастают. Это приводит к их фрагментации еще до соударения с твердой поверхностью.

Тренды изменения основных характеристик процесса взаимодействия капель воды и эмульсий со стенкой достаточно близки (рис. 3.54), но

масштабы роста числа крупных фрагментов жидкости в случае эмульсий существенно выше. Это обусловлено меньшим поверхностным натяжением. При этом установлено, что вследствие высокой вязкости эмульсий вторичные фрагменты достаточно быстро принимали сферическую форму в отличие от экспериментов с каплями воды, в которых образующиеся фрагменты представляли в основном эллипсоиды.

Наибольшее количество вторичных фрагментов и меньшие размеры последних соответствовали опытам с каплями суспензий. Для последних рост числа образованных капелек обусловлен неустойчивостью поверхности вследствие разнородного состава и разных плотностей компонентов, а также гидрофильными и гидрофобными эффектами, способствующими движению малых объемов воды за отрывающимися от поверхности твердыми частицами и их совокупностью. Эти результаты исследований представляют наибольший интерес при анализе вторичного измельчения капель (т.е. дополнительного после первичного уменьшения размеров при распылении жидкостей) в газовой среде.

Рис. 3.35 достаточно наглядно иллюстрируется переход от режима растекания к дроблению капель при соударении с твердой поверхностью при применении карты $Re(We)$. В отличие от $Re(Oh)$ с применением $Re(We)$ удастся показать более наглядно соотношение сил вязкости и поверхностного натяжения жидкостей. Характер расположения экспериментальных точек хорошо коррелирует с результатами исследований [148], в которых определены фундаментальные закономерности и критические условия растекания и отскока капель от нагретой поверхности.

Следует отметить, что в [143] приведены результаты экспериментальных исследований влияния вязкости жидкости на динамику поведения капли после удара о твердую поверхность. Скорость движения перед соударением варьировалась в диапазоне 0.2–2.5 м/с. Установлено, что дробление капель воды (всплеск) наблюдался при скоростях движения более 2.12 м/с. При этом при таких же скоростях для высоковязких жидкостей

($\mu > 141.8$ мПа·с) после удара наблюдалось растекание (оседание) капли на поверхности. При столкновении с поверхностью жидкость с низкой вязкостью (например, вода) будет отскакивать или растекаться. Капля высоковязкой жидкости (например, глицерин) может разделиться на две и более капель [155].

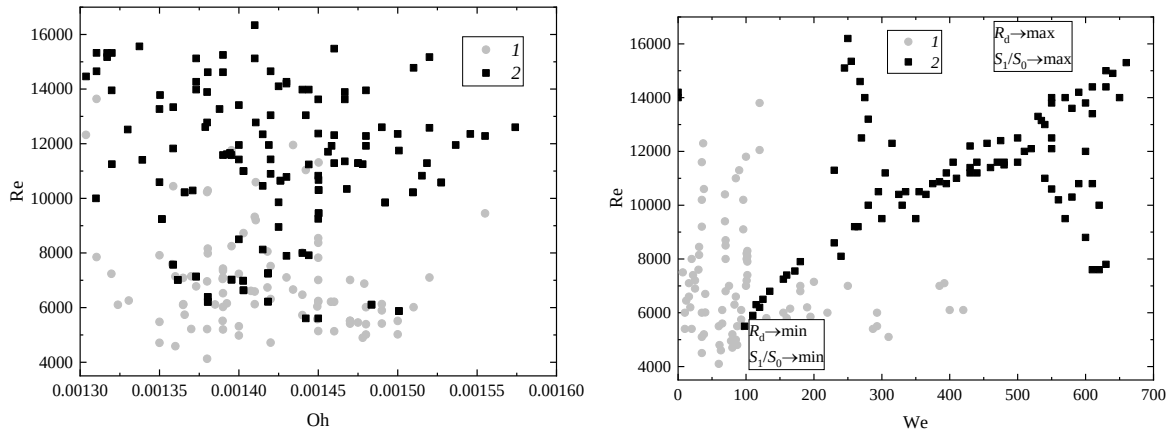
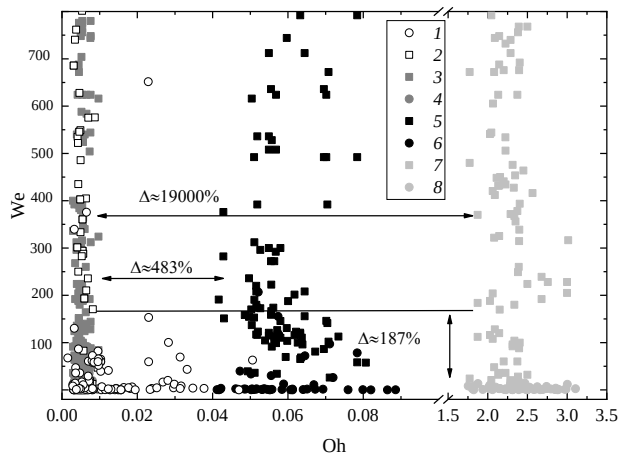
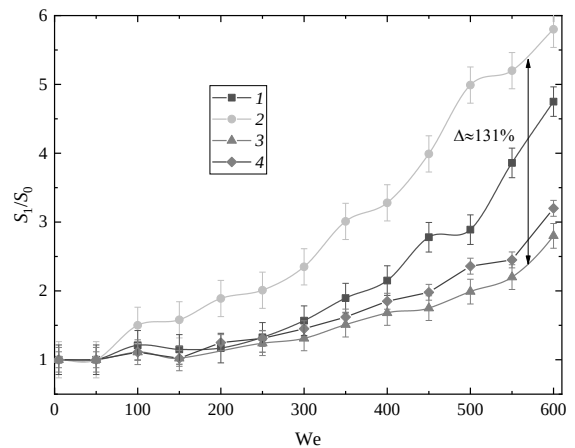


Рисунок 3.35. Карта режимов взаимодействия капель исследованных жидкостных составов с учетом чисел Рейнольдса, Вебера и Онезорге (для комплексного изучения соотношения сил инерции, поверхностного натяжения и вязкости) [140]: 1 – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими; 2 – дробление.



a



б

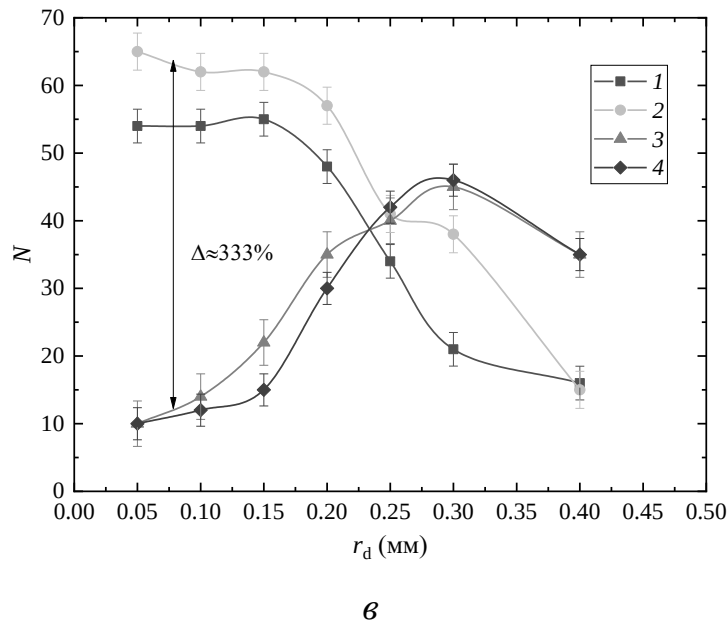


Рисунок 3.36. Карта режимов взаимодействия [140] (круг – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими, квадрат – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (а); 1,2 – вода; 3,4 – суспензия (уголь 30%, вода 70%); 5,6 – эмульсия (трансформаторное масло 30%; вода 70%); 7,8 – эмульсия (касторовое масло 30%, вода 70%). Зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (б); распределение по размерам вторичных фрагментов (в) (для $We \approx 200$): 1 – вода; 2 – суспензия (уголь 30%, вода 70%); 3 – эмульсия (трансформаторное масло 30%; вода 70%); 4 – эмульсия (касторовое масло 30%, вода 70%).

На рис. 3.37 проиллюстрировано сравнение полученных экспериментальных данных и результатов исследователей [73,149,156] в виде зависимостей относительных площадей поверхности жидкости от числа Вебера. Также приведены значения относительного максимального диаметра формирующейся на твердой поверхности капли (отношение максимального диаметра капли на поверхности к исходному диаметру). Видно, что при увеличении числа Вебера растет безразмерный максимальный диаметр отлетающей капли. Это связано с тем, что увеличение количества отлетающих капель приводит к более сильной инерционной силе, которая, в свою очередь, противодействует силе поверхностного натяжения, что

приводит к более длительному растеканию капли на поверхности. Разница между характеристиками, полученными другими исследователями и приведенными в настоящей работе, составила от 8% до 32%, соответственно. Этот результат иллюстрирует важность дальнейших исследований процессов соударений капель со стенкой в направлении получения более информативного безразмерного параметра, который бы учитывал не только соотношение сил инерции и поверхностного натяжения, но и другие заметно влияющие на характеристики взаимодействия фрагментов жидкости факторы. Это позволит и разработать универсальные карты режимов взаимодействия капель со стенкой с учетом всех ключевых характеристик последней: размеры, температура, теплофизические характеристики материала, гидрофильность, гидрофобность, шероховатость и др. Пока данная задача не решена и является актуальной для мирового научного сообщества.

Исходя из анализа рис. 3.37 и 3.38, можно сделать вывод о том, что рассеяние экспериментальных значений отношений размеров образующихся фрагментов жидкости к исходным с ростом числа Вебера будет заметно увеличиваться (рис. 3.37), а по отношению суммарной площади поверхности жидкости регистрировались довольно умеренные значения доверительных интервалов даже при больших значениях Вебера (рис. 3.38). Это обусловлено тем, что при увеличении сил инерции происходит заметная трансформация поверхности капли. От формы, контактирующей с твердой поверхностью капли сильно зависит площадь контактного пятна: для условного жидкого диска – максимальна, вытянутого по направлению движения к стенке эллипсоида – минимальна, а для сфер регистрировались средние значения. Чем больше площадь контакта, тем тоньше образующаяся на поверхности стенки пленка. При высоких скоростях движения капель перед соударением эта пленка разрушается с формированием большого количества фрагментов жидкости при малых размерах последних. Это особенно заметно при регистрации соударений блиноподобных капель. В случае сфер и

эллипсоидов количество относительно крупных фрагментов жидкости среди образовавшихся значительно возрастает вследствие меньшей площади контакта и большей толщины пленки жидкости на поверхности стенки. Так как капли в процессе движения непрерывно трансформируются вследствие вращения относительно своего центра масс, то в момент достижения поверхности стенки они могут иметь разные формы, и рассев значений отношений размеров на рис. 3.37 достаточно заметный. Но по средним размерам вторичных фрагментов отличия не такие большие. Поэтому отношение площадей поверхности жидкости растет при увеличении чисел Вебера более монотонно.

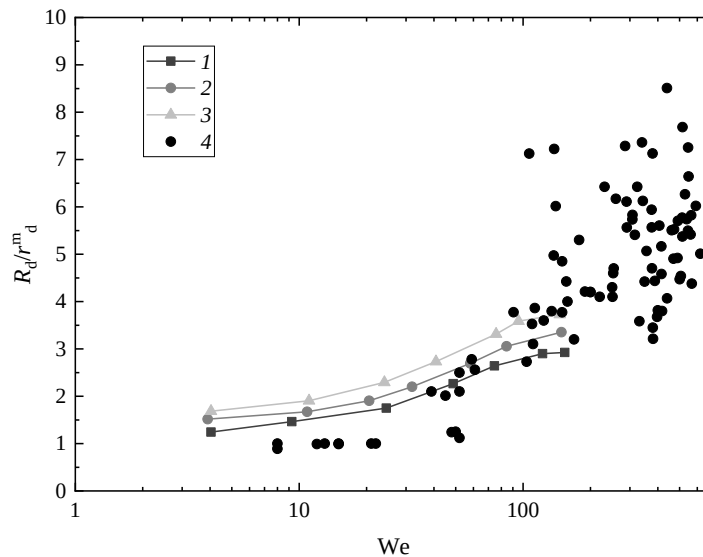


Рисунок 3.37. Отношение первоначального размера капли к максимальному размеру образующихся фрагментов жидкости, как функция от числа Вебера: 1 – [73]; 2 – [149]; 3 – [156]; 4 – данные экспериментальных исследований для воды.

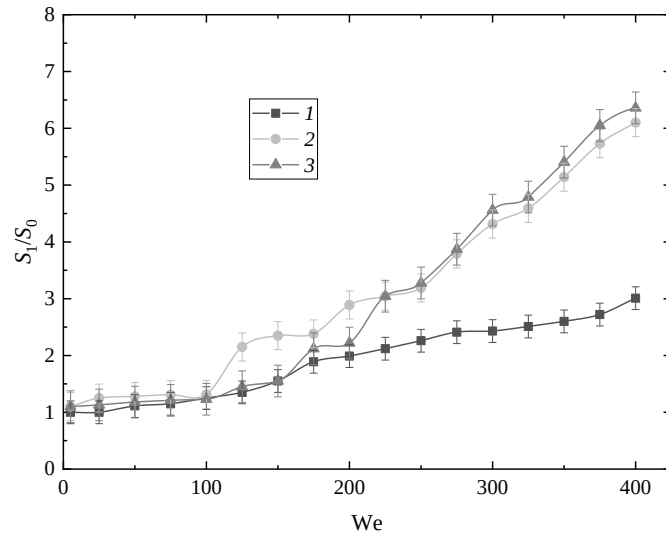


Рисунок 3.38. Сравнение характеристик измельчения капель при соударении со стенкой монолитного массива в виде крупной капли и группы мелких капель в виде зависимостей отношения площадей свободной поверхности жидкости от числа Вебера [140]: 1 – одна капля ($V_0 \approx 600$ мкл), 2 – три капли ($V_0 \approx 200$ мкл для каждой), 3 – две капли ($V_0 \approx 200$ мкл для каждой).

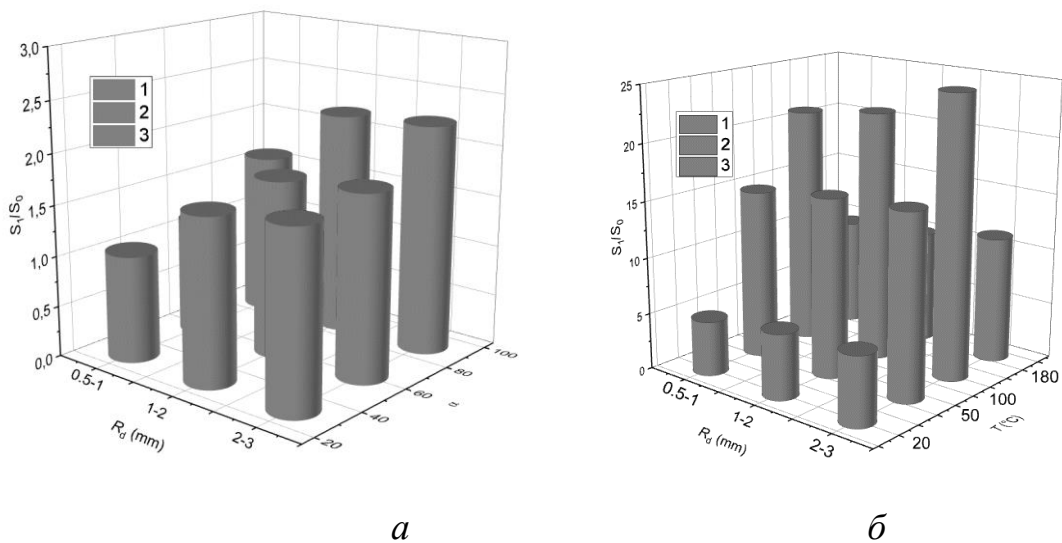


Рисунок 3.39. Отношение площадей поверхности жидкости в зависимости от размеров капель и угла столкновения (а) [140]. Отношение площадей поверхности жидкости в зависимости от размеров капель и температуры (б) [140]. 1 – $R_d = 0.5-1$ мм; 2 – $R_d = 1-2$ мм; 3 – $R_d = 2-3$ мм.

Зависимости на рис. 3.38 иллюстрируют интересные закономерности, заключающиеся в существенном отличии отношений площадей поверхности

жидкости при ударе о стенку каплей с разным начальным объемом. В частности, выполнены эксперименты с одной крупной каплей, а затем с тремя, суммарный объем которых равен первой. Установлено, что рост отношения S_1/S_0 для эксперимента с тремя каплями заметно интенсивнее. Т.е. за счет предварительного измельчения и последующего соударения со стенкой можно масштабно увеличивать S_1/S_0 . Если же сравнивать значения S_1/S_0 для экспериментов с двумя или тремя каплями одинакового размера, то на рис. 3.38 хорошо видно, что количество капель при больших значениях We (выше 200) перестает оказывать влияние. Важную роль играет лишь размер каждой капли (соответственно, объем). Этот результат позволяет сделать вывод о том, что результаты экспериментов, приведенные в диссертационной работе для условий взаимодействия одиночных капель с твердой стенкой, можно использовать для прогнозирования характеристик измельчения группы капель и даже аэрозолей. При малых же значениях чисел Вебера (до 200) важное значение играют и начальный объем, и количество капель (рис. 3.56), так как силы инерции не так масштабно доминируют в сравнении с силами вязкости и поверхностного натяжения. В таких условиях настройка систем первичного и вторичного измельчения будет более сложной, так как за счет изменения практически любого из параметров капельного потока можно существенно изменить S_1/S_0 . За счет комбинированного задействования группы из данных факторов можно увеличить площадь свободной поверхности жидкости после соударения в 2–25 раз (рис. 3.39).

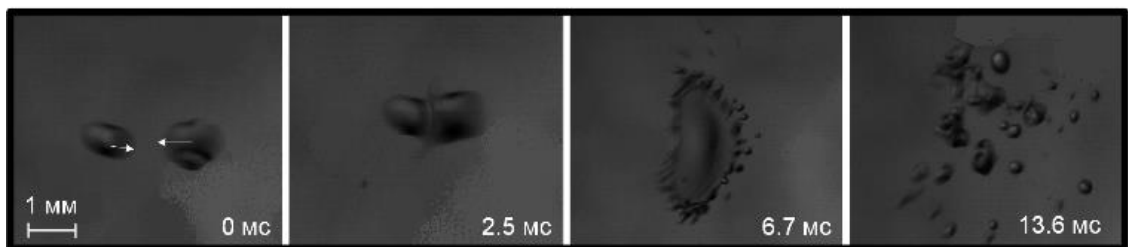
3.10. Комбинированное измельчение капель жидкости и композиционных топлив

На рис. 3.40 приведены типичные видеограммы экспериментов для иллюстрации общих и отличительных режимов распада капель при применении каждой из четырех схем вторичного измельчения. С точки

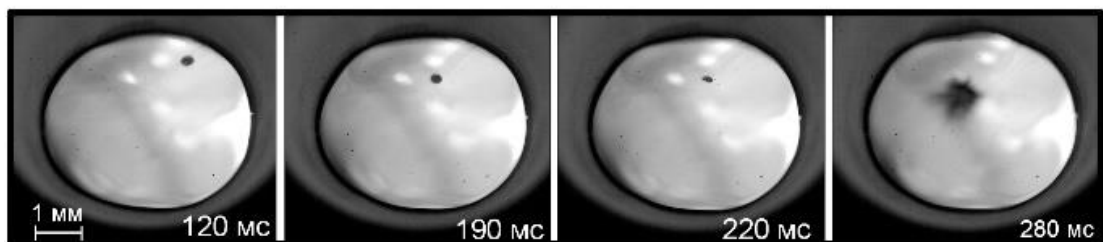
зрения последовательности форм распадающихся капель, можно отметить, что реализуются три разновидности. Первая основана на существенной деформации поверхности капли, но сохранении ее монолитности, роста максимальных (часто называют габаритными) размеров за счет аэродинамических сил и разрушения с образованием небольшого количества достаточно крупных жидкостных фрагментов. Вторая предполагает, отрыв от капли фрагментов в режиме продолжительного диспергирования (принято называть частичной фрагментацией). Третья включает режим полного распада капли с образованием мелкодисперсного аэрозоля. Чем выше силы инерции, тем стабильнее реализуется третья группа зарегистрированных схем распада капель. С точки зрения практического применения именно третья группа считается наиболее привлекательной, так как позволяет измельчать капли в несколько раз относительно начального размера (рис. 3.40), получаемого при первичном распылении форсунками, дозаторами, нагнетательными и оросительными системами.

Общие закономерности для четырех исследованных схем воздействия на каплю заключаются в том, что капля перед разрушением существенно увеличивается в размерах, утончаются приповерхностные слои, которые затем разрушаются. В каждом из четырех рассмотренных подходов имеются разные физические механизмы, факторы и процессы, приводящие к увеличению размеров капли перед разрушением. Например, в случае микро-взрывного распада рост размеров капли связан с ее заполнением паровыми пузырьками, рост давления в которых интенсифицирует уменьшение толщины пленки жидкости, после превышения критических значений этого давления (выше создаваемого силами поверхностного натяжения) регистрировался распад. При соударении капель между собой или со стенкой, а также с потоком воздуха в режиме газовой струи регистрировались условия сдвига слоев капли и ее существенной трансформации относительно сферической формы. Это приводило к неустойчивости поверхности капли вследствие возрастающих

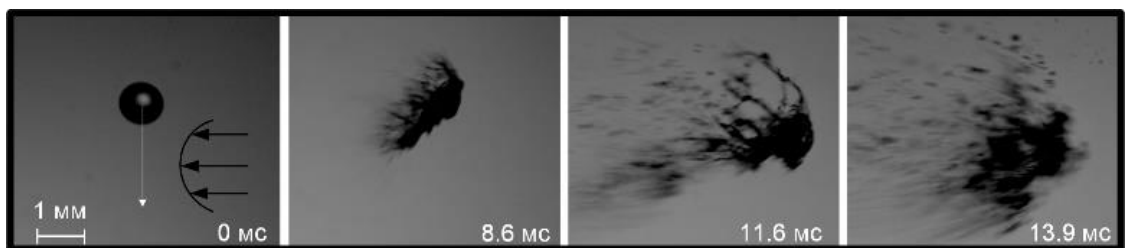
аэродинамических сил. В частности, трансформированные капли имели конфигурацию поверхности, близкую к эллипсоидам и блинам. Коэффициент аэродинамического сопротивления тел с такой формой поверхности на 30–50% выше, чем для сферы. Поэтому время существования таких капель при идентичных числах Вебера (соответственно, скоростях движения и размерах) были значительно меньше, чем для сфер. Межмолекулярные связи в каплях также существенно изменялись при ускорении движения и нагреве. Поэтому заметно отличались масштабы уменьшения размеров фрагментов жидкости, а также роста площади поверхности при идентичных значениях чисел Вебера или временах протекания процессов (рис. 3.59 и 3.60).



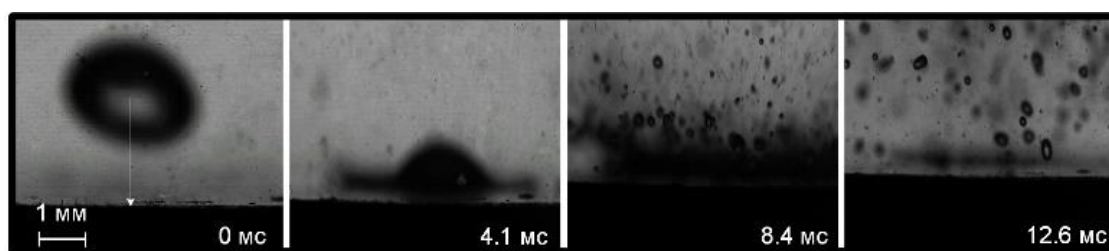
а



б



в



г

Рисунок 3.40. Видеокадры с демонстрацией типичных режимов распада капель при четырех схемах [90]: *а* – соударение между собой; *б* – взаимодействие со стенкой; *в* – ускорение движения в потоке воздуха; *г* – микро-взрывное разрушение при перегреве.

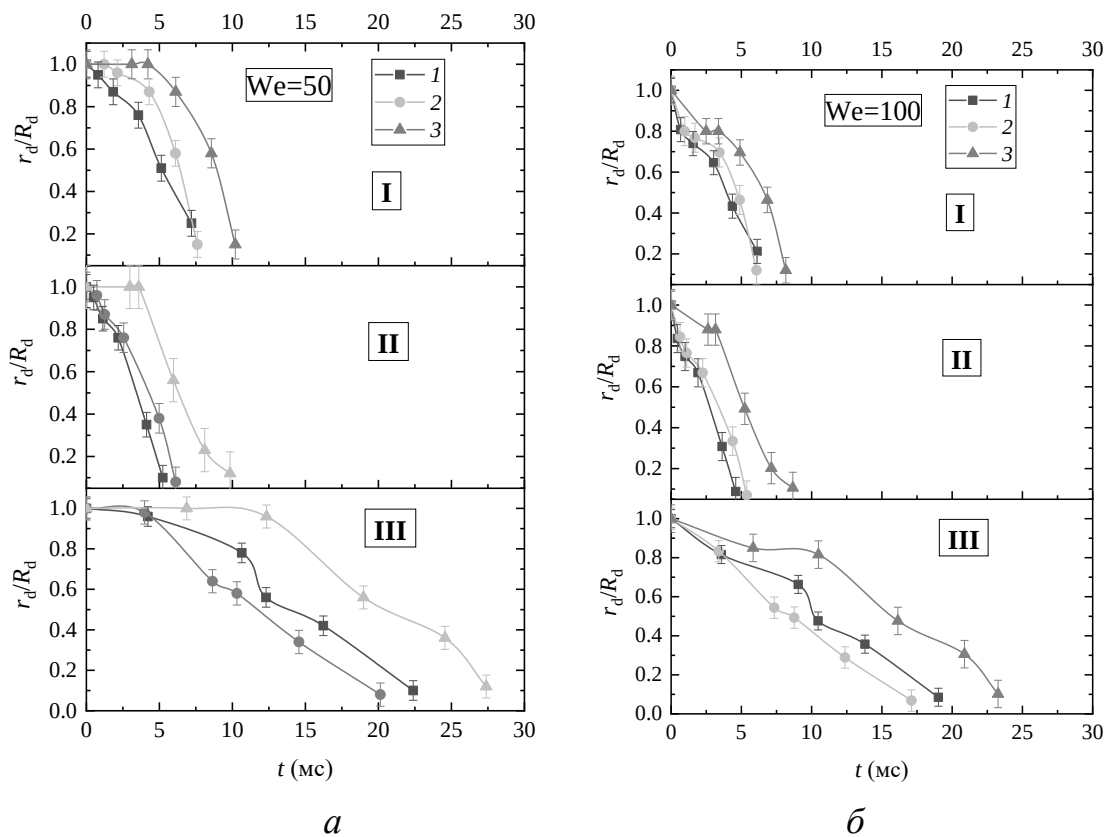
Важно отметить, что характеристики микро-взрывного разрушения неоднородных капель помимо температуры зависят и от скорости движения греющей среды, как определяющего параметра при вычислении тепловых потоков. Поэтому при сравнительном анализе характеристик измельчения на рис. 3.41 и 3.42 приведены зависимости r_d/R_d и S/S_0 от We и Q_c , как функций скорости движения капель в газовой среде. При этом предельные тепловые потоки выбраны таким образом, чтобы обеспечивался режим устойчивого дробления. Для меньших значений Q_c характерен режим частичной фрагментации капель. При его реализации регистрировалось разрушение целостности капли в течение длительного периода времени (от 2–3 до 15–20 секунд) с получением достаточно крупных фрагментов жидкости (чаще даже полидисперсных). Такой режим измельчения можно считать нецелесообразным к использованию, так как требуется прогрев капель в течение длительного периода времени. В экспериментах [157,158] показаны принципиальные отличия характеристик измельчения капель при применении режимов частичной фрагментации и микро-взрывного разрушения. На основе этих результатов можно отметить, что в условиях высокой концентрации капель жидкости в газовой среде частичная фрагментация последних будет незначительно влиять на дисперсный состав аэрозоля вследствие эффектов коагуляции, отскока и разлета образующихся

фрагментов. Лишь при малой концентрации исходных капель в составе аэрозольного облака и длительном движении можно увеличить S/S_0 в 3–5 раз при частичной фрагментации. Такие условия могут реализовываться в редких случаях, например, при движении капельных аэрозолей в зоне тушения пожаров (процесс перемещения от места сброса до поверхности термически разлагающихся материалов занимает несколько минут, а концентрация капель распыленной жидкости остается невысокой вследствие уноса мелких капель восходящими потоками высокотемпературных продуктов сгорания).

Рис. 3.41 и 3.42 показывают, что микро-взрывное измельчение капель можно обеспечить как в широком диапазоне температуры и тепловых потоков, так и непосредственно длительностей. При относительно небольших тепловых потоках длительность измельчения исходных капель более чем в 10 раз выше, чем при трех контактных схемах измельчения. На рис. 3.41 и 3.42 показано, что, с точки зрения времени измельчения, а также значений r_d/R_d и S/S_0 при высоких (более 1000 °C) температурах нагрева наиболее привлекательным является подход, основанный на микро-взрывном распаде, который работает только в случае неоднородных составов. Именно наличие двух компонентов с разной температурой кипения и является определяющим фактором при интенсификации распада. При этом, чем больше эта разница, тем масштабнее распад даже при относительно небольшом значении подведенного теплового потока [158]. Если же сравнивать схемы взаимодействия капель со стенкой, соседней каплей или потоком воздуха, то наименьшее время соответствует удару о стенку при идентичных числах Вебера. Сравнительный анализ показал, что чем выше плотность и вязкость жидкости, тем меньше разница длительностей распада капель за счет удара между собой и со стенкой. Силы трения и инерции будут довольно близки, особенно если рассматривать условия удара нескольких сотен капель о стенку. В этом случае взаимодействие каждой из капель приводит к формированию тонкой пленки на поверхности стенки и ее стекании. Условия соударения приближаются к взаимодействию капель

между собой (особенно при высоких скоростях движения и угле атаки 60–90°). Поэтому для данных схем регистрировались достаточно близкие значения времен разрушения, минимальных размеров образующихся фрагментов жидкости, а также суммарной площади их поверхности (рис. 3.41 и 3.42).

На рис. 3.42 хорошо видно, что высоких значений S/S_0 при $We > 100$ можно достичь при ударе воздушной струей (поток) на каплю. Этот результат обусловлен тем, что в отличие от соударений капель между собой или со стенкой не создаются условия встречного движения жидкостных слоев, при которых они могут коагулировать (соответственно, значения размеров фрагментов r_d растут, а площади поверхности – уменьшаются).



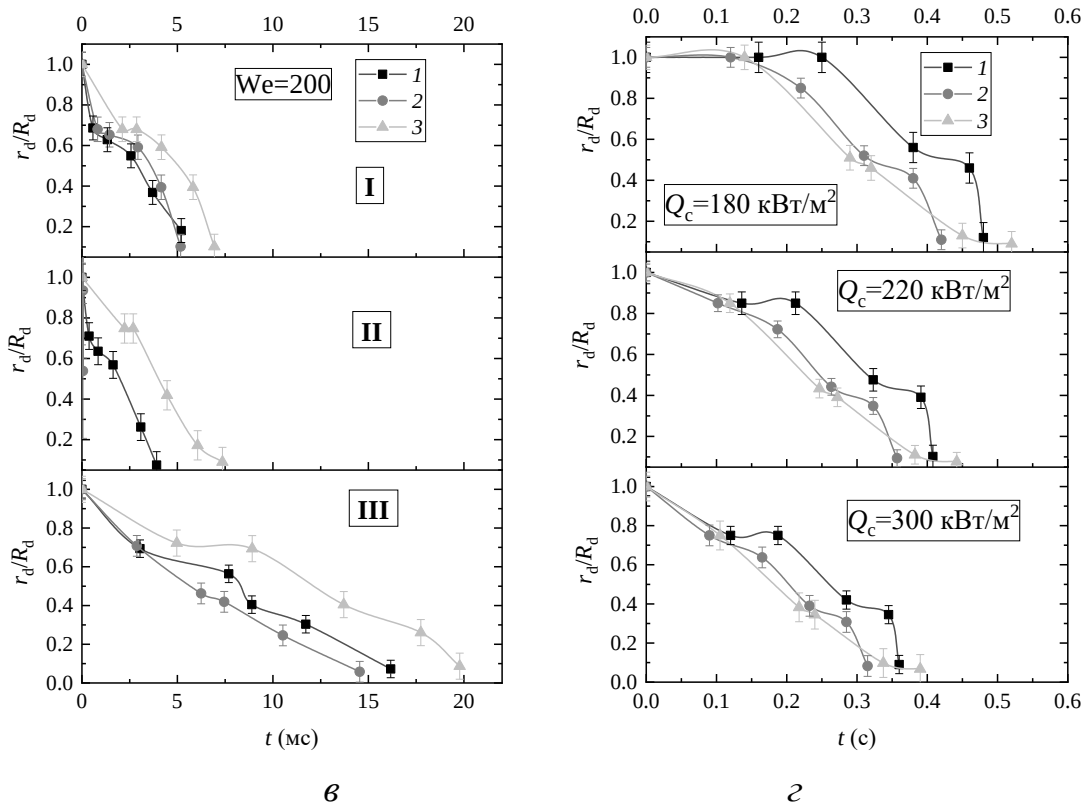


Рисунок 3.41. Изменение размеров фрагментов жидкостей при четырех подходах к вторичному измельчению [90]: (а,б,в) – вторичное измельчение капель при изменении числа Вебера ($We=50, 100, 200$); I – соударение двух капель между собой; II – взаимодействие капли со стенкой; III – воздействие на каплю воздушным потоком; 1 – вода; 2 – суспензия (графит 10 мас%, вода 90 мас%); 3 – эмульсия (рапсовое масло 10 об%, вода 90 об%); d – микро-взрывное измельчение капли (1 – рапсовое масло 10 об%, вода 90 об%); 2 – дизельное топливо 10 об%, вода 90 об%; 3 – графит 10 мас%, дизельное топливо 90 мас%).

Даже при больших скоростях движения за счет высоких вязкостных сил слои соударяющихся капель при перемешивании образуют достаточно крупные фрагменты жидкости по размерам (особенно если сравнивать соосные соударения или взаимодействие капли со стенкой). Ударное натекание же воздушного потока на каплю раздувает последнюю и приводит к образованию совокупности водяных цепочек, которые рвутся с образованием большого количества мелких фрагментов. Вследствие

однонаправленного движения коагуляция практически не наблюдалась. Поэтому значения S_1/S_0 возрастали.

Для всех схем воздействия на каплю жидкости (удар о стенку, взаимодействие с соседней каплей, натекание воздушного потока) установлены условия выхода значений S_1/S_0 как функций We на асимптотические значения (рис. 3.42). Этот результат иллюстрирует наличие предельных соотношений сил инерции, вязкости (внутреннего трения) и поверхностного натяжения при контактных схемах вторичного измельчения. В экспериментах с микро-взрывным распадом капель признаки таких асимптот также были зарегистрированы, но не во всех экспериментах и не со всеми компонентными составами. Скорее всего, определяющее значение играет концентрация низкокипящего компонента и способ нагрева капель, как факторы, определяющие S_1/S_0 [158].

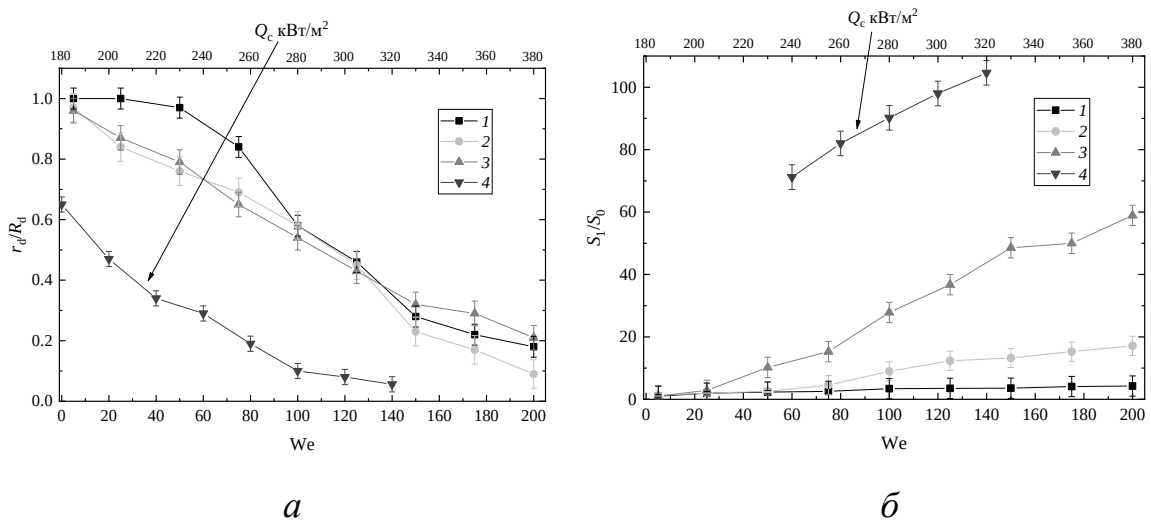


Рисунок 3.42. Отношение среднего размера (а) и площадей поверхности (б) образующихся фрагментов жидкости к начальному значению от числа Вебера, для водомасляной эмульсии (рапсовое масло 10 об%, вода 90 об%) [90]: 1 – соударение двух капель между собой; 2 – взаимодействие капли со стенкой; 3 – воздействие на каплю воздушным потоком; 4 – микро-взрывное измельчение капли.

Определение необходимых и достаточных условий (рис. 3.43 и 3.44) измельчения капель жидкостей с применением четырех схем вторичного дробления вызывает особый интерес. В [158] обобщены предельные условия измельчения неоднородных капель при микро-взрывном распаде вследствие кондуктивного, конвективного и радиационного нагрева. Актуальная задача состоит в интегральных оценках количества энергии, необходимого и достаточного для получения идентичного количества мелких фрагментов жидкости. Количество и размеры последних можно оценивать с применением распределений и зависимостей, приведенных на рис. 3.43 и 3.44. При применении каждого из способов вторичного измельчения можно использовать разные способы подвода энергии. На первом этапе целесообразно рассчитать количество электрической энергии, необходимой для генерации потоков жидкости, формирования потока воздуха, а также нагрева капель. На рис. 3.44 приведены результаты расчета такого количества энергии, необходимого и достаточного для получения отношений r_d/R_d и S_1/S_0 , значения которых приведены на рис. 3.43.

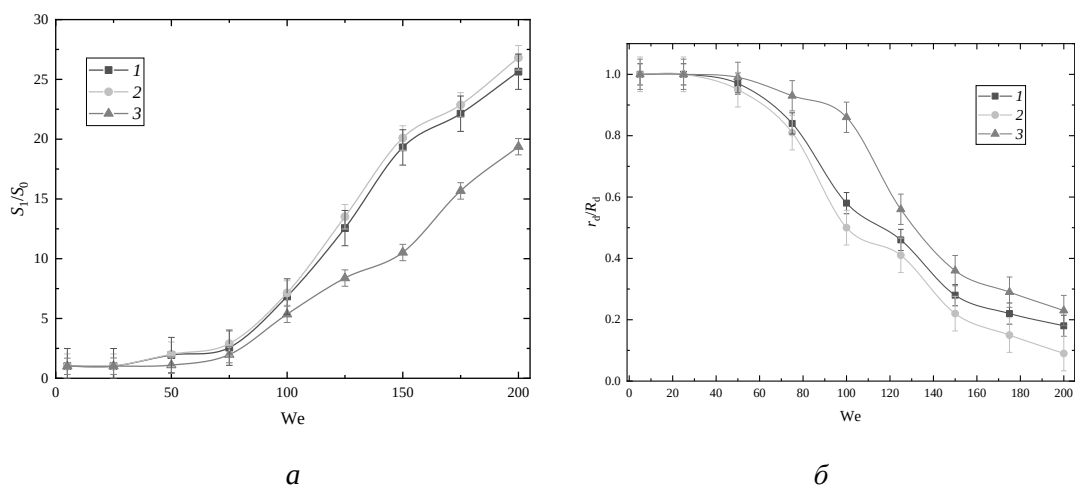


Рисунок 3.43. Изменение отношения площади поверхности образующихся фрагментов жидкости к исходной при измельчении капель воды (а) и отношение радиусов новообразованных капель к исходным (б) [90]: 1 – взаимодействие между собой; 2 – соударение со стенкой; 3 – воздействие на каплю воздушный поток.

Хорошо видно (рис. 3.44), что схема с микро-взрывным измельчением капель характеризуется максимальными значениями S_1/S_0 и требуемым количеством электрической энергии для нагрева муфеля. Если учитывать отношения параметров измельчения (например, S_1/S_0) и требуемого количества энергии (т.е. получения удельных характеристик вторичного распада капель), то преимущества микро-взрывного измельчения будут не такими масштабными по сравнению с другими схемами.

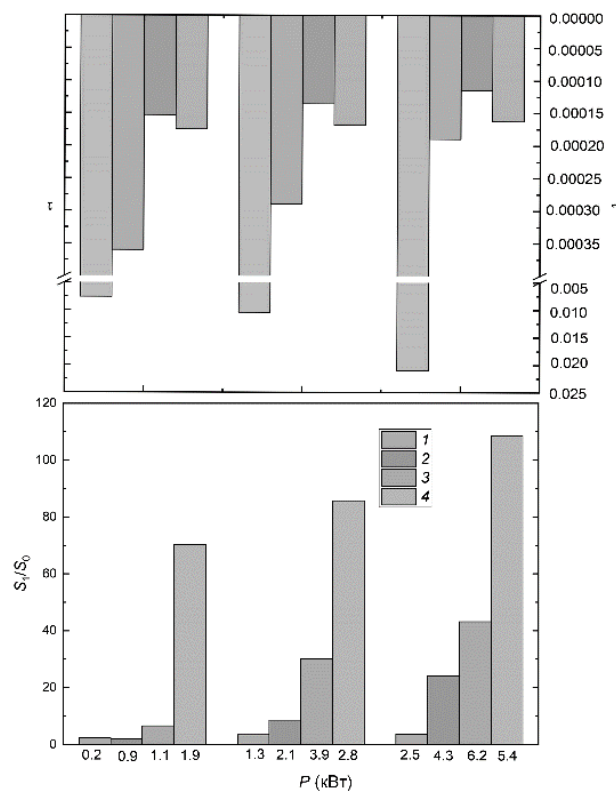


Рисунок 3.44. Изменение отношения площади поверхности образующихся фрагментов жидкости к исходной при измельчении капель с ростом затраченной энергии (при $We=50, 100, 150$, а для схемы 4 варьировался тепловой поток $240, 280, 320 \text{ кВт/м}^2$), а также длительности разрушения исходных капель [90]: 1 – взаимодействие между собой; 2 – соударение со стенкой; 3 – воздействие на каплю воздушный поток; 4 – микро-взрывное измельчение при перегреве.

Разница по удельным характеристикам составит от 20 до 60%. Если учитывать, что микро-взрывное измельчение имеет максимальные значения S_1/S_0 при существенной неоднородности состава капель [158], то при вторичном измельчении однородных капель, например, воды, оно не позволит получить заметный рост S_1/S_0 и, соответственно, снижение r_d/R_d .

С применением методики [7] вычислены значения безразмерных времен (длительностей) распада (вторичного измельчения τ) капель жидкостей в процессе применения каждой из четырех схем воздействия на них. На рис. 3.44 показано, что длительность вторичного измельчения можно менять в широком диапазоне за счет варьирования схем воздействия на каплю. При этом с учетом рис. 3.44 можно выбирать рациональные соотношения между S_1/S_0 и τ .

Для расчета израсходованного количества энергии на измельчение капель при разных схемах принималась энергия, необходимая для поддержания работоспособности соответствующих установок (нагревательных камер, компрессорного оборудования и др.) в течение часа. Для микро-взрывного измельчения принималась работа стенда в течение второго часа, так как на прогрев муфельной печи уходит около 40–60 минут. Рассчитанные отношения площадей характеризуют усредненное значение результатов при использовании установки в течение времени работы. Размеры и скорости во всех схемах были одинаковы, а, следовательно, можно выполнять сравнение результатов опытов при близких значениях чисел Вебера. Из технических паспортов используемых нагнетателей воздуха и жидкостей известно, что при давлении около 10 бар потребляемая мощность составляет 7.5 кВт/ч, а при 1 бар – около 1.1 кВт/ч. По необходимому рабочему давлению выбиралась мощность. Для муфельной печи известно, что на прогрев до 1100 °С необходимо около 2000 кВт. Эти данные являлись основой при расчете требуемого количества энергии и построении диаграмм на рис. 3.44.

На рис. 3.44 хорошо видно, что система с вторичным измельчением за счет интенсивного перегрева капель требует наибольшего количества энергии, как и следовало ожидать. Но сравнительный анализ позволяет отметить несколько важных закономерностей. Во-первых, результаты расчета на рис. 3.44 приведены без учета фактора количества одновременно измельчаемых капель. Очевидно, что в случае механических схем, т.е. соударений капель между собой, со стенкой или потоком воздуха важное значение будет иметь их концентрация в аэрозоле. В случае высокотемпературного нагрева капель они интенсивно диспергируют и измельчаются без существенного влияния соседних капель [158]. Поэтому с учетом количества единовременно измельчаемых капель схема микро-взрывного распада будет не такой затратной, как в случае одной капли. Во-вторых, при сравнении контактных схем измельчения капель можно отметить достаточно близкое необходимое количество энергии. С точки зрения конструктивных особенностей, схемы с взаимодействием капель между собой, а также со стенкой (в том числе нагретой) можно считать более простыми. Поэтому их применение выглядит рациональным по сравнению со схемой воздействия на капли потока воздуха. В-третьих, с ростом числа Вебера и плотности теплового потока масштабы отличий исследованных отношений S_1/S_0 изменяются достаточно слабо. Этот результат позволяет сделать вывод, что с использованием рис. 3.44 можно прогнозировать значения S_1/S_0 при варьировании скоростей движения и размеров капель, температур нагрева в широких диапазонах для четырех исследованных схем вторичного измельчения.

На основе выполненного сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что имеются большие резервы энергии при организации вторичных схем измельчения однородных и существенно неоднородных капель для получения аэрозоля вследствие применения нескольких схем. Например, после впрыска струй жидкостей под определенным углом по отношению друг к другу (углом атаки, например, от 60 до 90°) можно в 5–7 раз изменить

размер капель вследствие соударений, а затем расположить на пути падающих фрагментов жидкости стенки, сетки, ребра и другие разновидности преград для применения схемы измельчения за счет их взаимодействия. В нижней части камер измельчения можно устанавливать специализированные нагревательные элементы, позволяющие перегревать мелкие падающие фрагменты до температур вскипания и последующего распада. При такой комбинации схем вторичного измельчения можно существенно оптимизировать расход тепловой и электрической энергии, необходимой для вторичного измельчения, так как исходные (перед микродиспергированием) капли будут в 10–30 раз меньше, чем рассмотренные в настоящей работе, вследствие фрагментации за счет взаимодействия между собой, со стенкой и с натекающим потоком воздуха в виде газовой струи. Полученные зависимости и диаграммы являются исходной экспериментальной информационной базой для оценки эффективных условий, а также разработки соответствующих прогностических физических и математических моделей.

Анализ результатов диссертационной работы позволяет заключить, что синергетические эффекты вторичного измельчения капель при комбинировании любых из четырех рассмотренных схем можно достоверно изучить, скорее всего, только за счет экспериментальных исследований. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, при высокотемпературном нагреве газовой среды и капель необходимо учитывать образование вокруг последней парогазовой буферной области, которая сдерживает трансформацию поверхности и снижает тепловой поток, изменяются условия теплообмена. Пока не разработаны адекватные модели для описания таких условий, особенно при температурах нагрева более 500 °С. Во-вторых, образующиеся при соударениях между собой или со стенкой фрагменты жидкости представляют, как правило, полидисперсное по размерам облако. Детальное описание процессов последующего измельчения последнего затруднительно. В-третьих, натекающая газовая струя придает капле форму,

которую достаточно сложно описать математически, требуются большие вычислительные ресурсы. Если учесть три выделенных причины, то для полноценного математического моделирования не создана необходимая база.

Анализ выполненных результатов экспериментов с использованием двух традиционных критериев оценки новых технических систем и технологий («качество» и «эффективность») дает основание для вывода о наибольших перспективах технологии микро-взрывного измельчения капель (ее можно считать в основном тепловой) при решении задач создания двигателей внутреннего сгорания и других перспективных энергетических установок. Ее преимущество по сравнению с тремя другими выше рассмотренными, которые условно можно считать газодинамическими, заключается в следующем. Реализация в камерах сгорания газодинамических технологий возможна только при использовании и создании специальных дополнительных устройств, генерирующих сжатый воздух, и отсутствующих в современных двигателях. При этом на решение задач испарения капель или разрушения струей газа не может быть использована энергия, вырабатываемая самим двигателем или энергоустановкой, в которой сжигается топливо. Соответственно, необходимы дополнительные источники энергии и технологические устройства для разгона капель или газов. Тепловая же технология микро-взрывного измельчения капель различных жидкостей (суспензий и эмульсий) может осуществляться непосредственно при использовании тепла, выделяющегося при сгорании ранее впрыскиваемого топлива и отводящегося при охлаждении двигателей. При утилизации избыточной теплоты (по аналогии с различными технологиями теплоэнергетики) дополнительных источников энергии не потребуется, и для микро-взрывного измельчения капель достаточно 250–350 °С. В этом плане технология микро-взрывного уменьшения размеров фрагментов жидкости на предприятиях будут иметь явные преимущества перед другими способами дробления капель любых топлив.

3.11. Энергетический анализ перспективных схем вторичного измельчения

На рис. 3.45 приведены зависимости отношения кинетических энергий и площадей свободной поверхности капель до и после их взаимодействия для разных схем измельчения: соударения капель между собой; соударения капель с твердой поверхностью; разрушение капли воздушным потоком; микро-взрывное измельчение капель при нагреве. Как видно из рис. 3.45а, наибольшее отношение площадей поверхности жидкости до и после взаимодействия капель при соударении между собой имеет графитовая суспензия. Такой эффект объясняется тем, что в ее составе находятся частицы с размерами менее 100 мкм, форма которых является не сферичной. При соударении капель такой формы реализуется интенсивная фрагментация с образованием вторичных фрагментов малых размеров. Также наибольшее отношение площадей поверхности жидкости зарегистрировано в опытах с дизельной эмульсией за счет того, что практически при одинаковой вязкости с водой она имеет в три раза меньшее поверхностное натяжение. Так же отмечено, что чем больше вязкость жидкости, тем выше значения отношений энергий до и после взаимодействия капель. Т.е. при дроблении жидкости играет роль вязкость. Чем больше вязкость, тем больше необходимо подвести энергию для достижения фрагментации. В [159,160] проведены эксперименты с разно вязкостными жидкостями. Установлено, что увеличения вязкости жидкости с 1 до 15 мПа·с приводит к укрупнению капель в потоке практически на 30 %.

При анализе результатов исследований [117] можно отметить, что при числе Вебера около 150 образуется 10 вторичных фрагментов в условиях лобового столкновения капель воды. Для такого количества вторичных капель и числа Вебера характерное отношение кинетических энергий до и после взаимодействия находится в диапазоне от 0,4–0,55. В диссертационной работе при лобовом столкновении образуется около 15–25 вторичных

фрагментов при аналогичном числе Вебера. Для таких значений характерное отношение энергий составляет около 0.35. Отличие результатов настоящей работы с данными [117] объясняется увеличением количества вторичных фрагментов, что приводит к снижению скорости движения. Как следствие, уменьшается их кинетическая энергия.

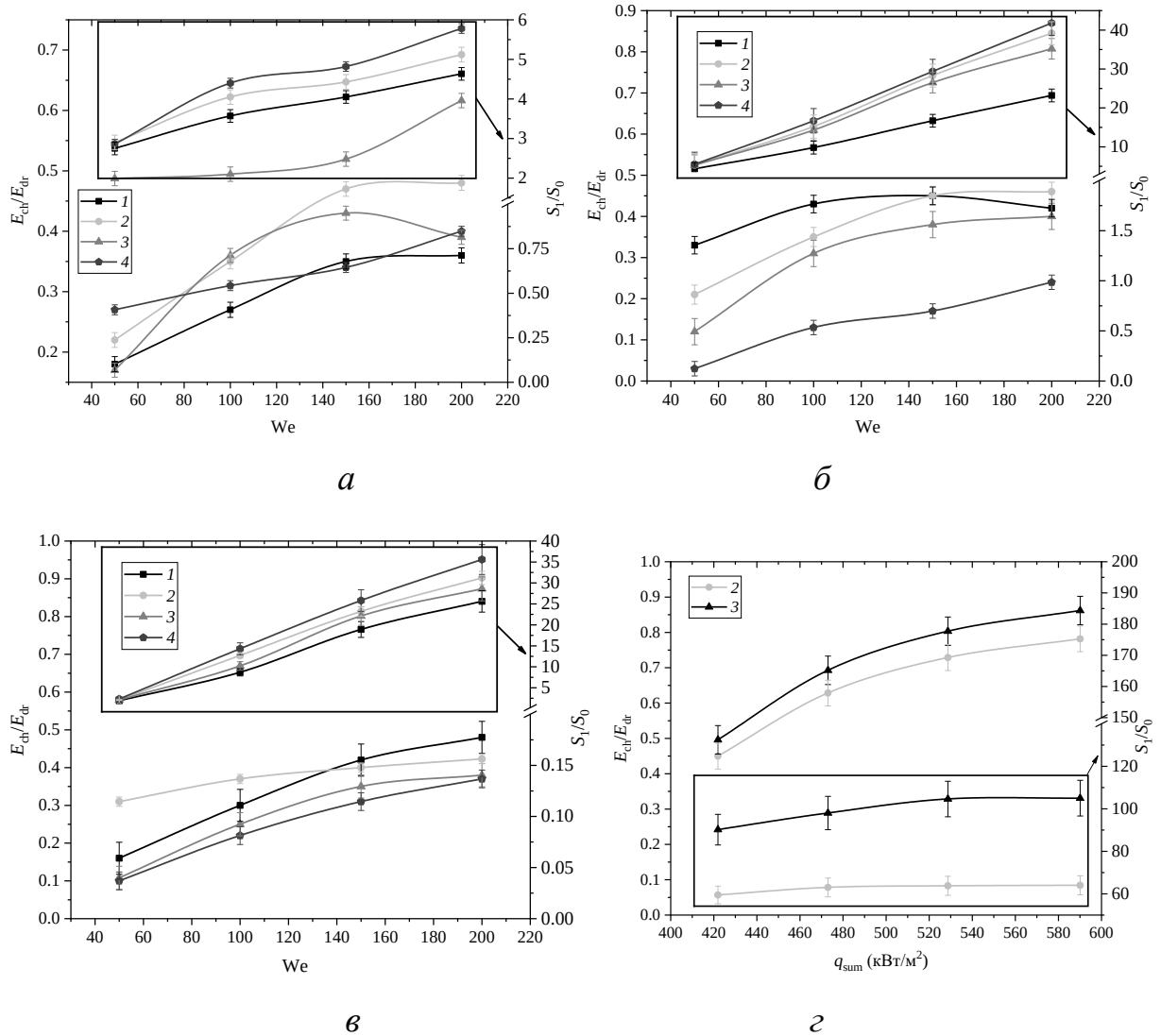


Рисунок 3.45. Зависимость отношения кинетических энергий и площадей поверхностей до и после взаимодействия капель от числа Вебера, для (*a*) соударения капель между собой, (*б*) воздействия на них потоком воздуха, (*в*) соударения с твердой поверхностью, (*г*) микро-взрывного измельчения [161]: 1 – вода; 2 – эмульсия дизельного топлива (90 об%); 3 – эмульсия рапсового масла (90 об%); 4 – угольная суспензия (10 мас%).

Анализируя зависимости отношения кинетических энергий до и после взаимодействия капель (рис. 3.45а), можно выделить, что для графитовой суспензии значение этого отношения близко к воде. Это объясняется тем, что реологические свойства суспензии близки к свойствам воды, т.е. при одинаковой результирующей скорости взаимодействия число Вебера практически такое же, что и в опытах с водой. Но при использовании дизельной эмульсии необходимо меньшее значение критической скорости взаимодействия для достижения равноценного числа Вебера относительно капель воды, что приводит к более высоким значениям отношения кинетических энергий. Аналогичный эффект выделялся при режимах измельчения капель путем воздействия на них воздушного потока (рис. 3.45б) и соударении их с твердой поверхностью (рис. 3.45в).

На рис. 3.46 представлены зависимости площади поверхности капель до взаимодействия к суммарной площади поверхности вторичных фрагментов от результирующей скорости исходных капель при варьировании их размеров. Можно наблюдать, что максимальное отношение площадей поверхности достигается для капель с радиусом 0.5-0.6 мм. Также зарегистрирован нелинейный рост отношения площадей поверхности при увеличении результирующей скорости движения. Такой эффект отмечен для всех исследуемых составов.

Вычислены значения условной тепловой мощности, как тепловыделения в единицу времени при выгорании топлив и испарении капель исследуемых составов до и после измельчения для всех рассмотренных схем вторичного измельчения (рис. 3.47). Можно отметить, что для воды рассчитывались значения поглощаемой в единицу времени энергии вследствие реализации процесса парообразования. При этом получены достаточно небольшие значения. Это обусловлено тем, что использованы результаты опытов, проведенных при комнатной температуре. Поэтому процесс испарения протекает довольно умеренно.

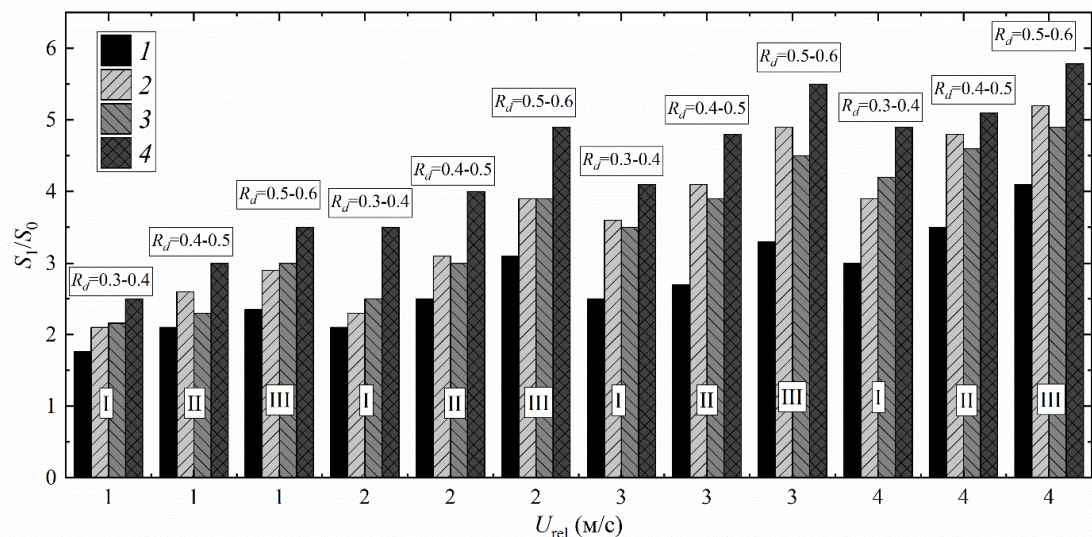


Рисунок 3.46. Значения площади поверхности жидкости до и после взаимодействия капле от результирующей скорости их движения и размера для схем [161]: (I) соударения между собой, (II) воздействия потоком воздуха, (III) соударения с твердой поверхностью. 1 – вода; 2 – эмульсия дизельного топлива (90 об%); 3 – эмульсия рапсового масла (90 об%); 4 – угольная суспензия (10 мас%).

Для дизельной эмульсии же разность тепловых мощностей до и после измельчения является максимальной. В этом случае проводилось вычисление теплоты, которая выделяется при горении топливной композиции. На рис. 3.47 показано, что такой показатель является максимальным для данного состава. При этом скорость выгорания дизеля на 10–30% больше остальных исследуемых составов.

По результатам выполненных экспериментов выделены пять комбинаций схем измельчения капле жидкости. Первая комбинация представляла соударения двух капле жидкости между собой на первом этапе. Далее образованные фрагменты падали на твердую нагретую поверхность. Вторая же комбинация отличалась от первой тем, что после измельчения первичных капле вследствие соударения на вторичные фрагменты производилось воздействие направленным потоком воздуха. Для третьей комбинации схем измельчения капле использовалась муфельная

печь. Капли, соударяясь между собой, измельчались и попадали в муфельную печь, где происходил микро-взрывной распад с образованием облака мелких вторичных фрагментов.

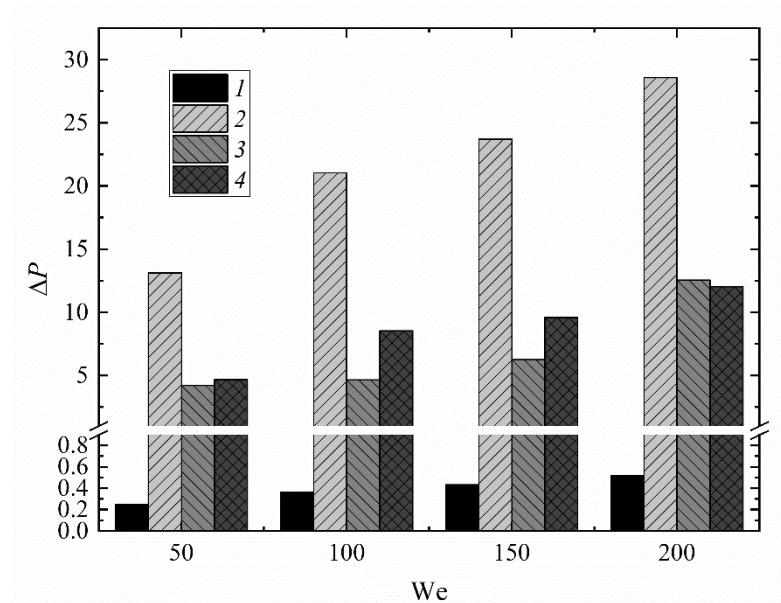


Рисунок 3.47. Разница относительных тепловыделений при горении и теплопоглощений при испарении с учетом применения схем измельчения капель для разных значений числа Вебера [161]: 1 – вода; 2 – эмульсия дизельного топлива (90 об%); 3 – эмульсия рапсового масла (90 об%); 4 – угольная суспензия (10 об%).

Для достижения условий микро-взрывного измельчения необходимо использовать двухкомпонентную каплю, т.е. содержащую горючий и негорючий компоненты. Поэтому использовались две эмульсии на основе дизельного топлива и рапсового масла. Четвертая и пятая комбинации схем представляли комбинации всех трех предыдущих схем. Т.е. четвертая схема включала в себя первую схему, но далее капли попадали в муфельную печь для достижения условий микро-взрывного распада. Пятая же схема аналогична четвертой, но вместо разрушения при соударении с твердой поверхностью использовался направленный поток воздуха.

На рис. 3.48 представлены зависимости отношения кинетических энергий и площадей поверхностей капель до и после измельчения при

варьировании числа Вебера для исходных капель. Можно отметить, что при использовании схем с последующим микро-взрывным измельчением достигается максимальное отношение площадей поверхностей капель до и после фрагментации. Аналогичный эффект зарегистрирован и для отношения кинетических энергий. Максимально значение S_1/S_0 зарегистрировано для схемы, когда капли, соударяясь между собой, попадали на нагретую твердую поверхность, а далее под тепловым воздействием взрывались, образуя облако мелких вторичных фрагментов.

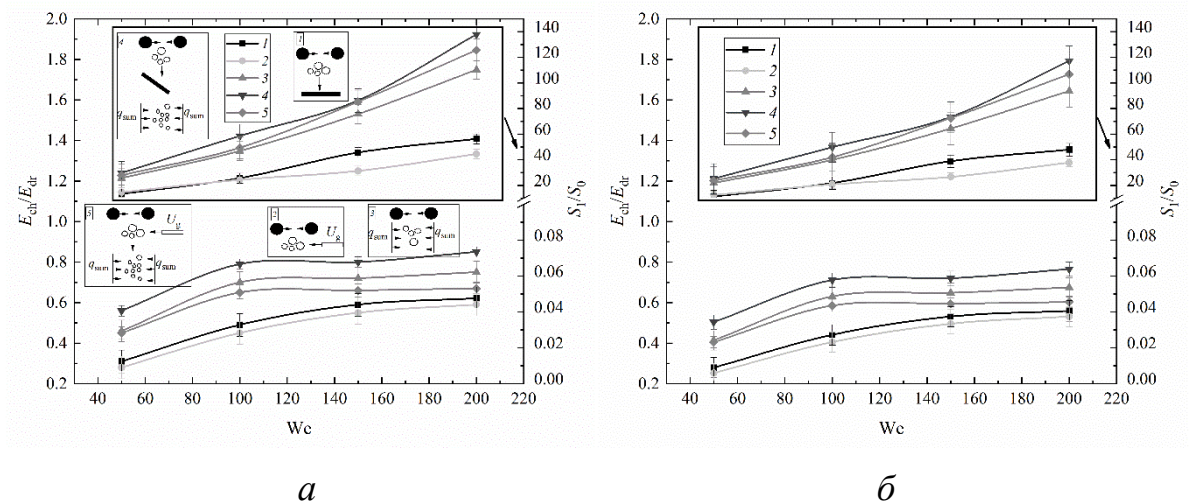


Рисунок 3.48. Зависимости отношения кинетических энергий и площадей поверхностей капель до и после взаимодействия от числа Вебера, для двух составов [(а) эмульсия дизельного топлива (90 об%), (б) эмульсия рапсового масла (90 об%)] при комбинировании схем измельчения капель [161]: 1 – соударение между собой с дальнейшим ударом о твердую поверхность; 2 – соударение между собой с дальнейшим воздействием воздушным потоком; 3 – соударение между собой с дальнейшими микро-взрывным измельчением; 4 – соударение между собой с дальнейшим ударом о твердую поверхность и микро-взрывным измельчением; 5 – соударение между собой с дальнейшим воздействием воздушным потоком и микро-взрывным измельчением.

Важно отметить, что определяющую роль играют значения S_1 и S_0 . Поэтому абсолютные значения скоростей выгорания или испарения,

принимаемые в расчетах, оказывают второстепенное влияние. В связи с этим можно выполнять оценки преимуществ различных технологий, где применяются системы вторичного измельчения с учетом отношения площадей поверхности жидкости. Таким образом, микро-взрывное измельчение позволяет не только существенно увеличить площадь поверхности испарения, но и увеличить величину тепловыделения в случае топливных технологий или поглощения энергии при парообразовании, например, при тушении пожаров или теплообменных технологиях. Полученные результаты экспериментальных исследований и расчёта энергетических балансов важны для развития современных математических моделей. Создана информационная база данных для развития известных математических моделей распада неоднородных капель. В частности, на достаточно типичных примерах определен энергетический баланс при различных комбинациях режимов измельчения капель. Значения полученных энергий могут быть использованы при моделировании в виде некоторых эмпирических констант. Кроме того, если учесть зависимости отношения площадей S_1/S_0 от температуры нагрева, схемы подвода теплоты к капле, концентрации компонентов и другие факторы, то можно получить эмпирические выражения для последующего применения при проведении математического моделирования процессов вторичного измельчения капель жидкостей.

Наиболее рациональной комбинацией схем измельчения можно считать соударение капель на первом этапе между собой, а на втором – микро-взрывное дробление фрагментов от первого этапа. В этом случае может быть затрачена минимальная энергия на разогрев капель на втором этапе, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа. Соударение капель с твердой стенкой можно считать также перспективным подходом, но у него имеются два ограничения в сравнении с соударением капель между собой. Первое – налипание жидкости на поверхности твердой стенки, т.е. формирование пленки и ее длительное

стекание. Второе – формирование короны при отрыве капель от поверхности стенки, которая в зависимости от вязкости жидкости может быть достаточно устойчивой и препятствовать формированию мелкодисперсного аэрозоля. Если использовать комбинированную схему, то можно форсуночными устройствами формировать даже крупные капли (более 3 мм). В рамках первого этапа могут быть получены капли со средними размерами около 500 мкм. За счет микро-взрывного измельчения возможно получение капель размерами 30–70 мкм. При этом площадь поверхности жидкости будет увеличена в десятки раз. Соответственно, тепловыделение при сжигании капли топлива в единицу времени может быть увеличено в такое же количество раз. В настоящей работе приведены результаты соответствующих оценок. На их основе можно сделать вывод о том, что затраты на реализацию измельчения составляют не более 1% от энергии, выделяющейся при горении топлива. Добавление воды в состав инерционных топлив даже с концентрацией 1–3% способствует интенсивной микро-взрывной фрагментации, вследствие которой тепловая мощность – тепловыделение в единицу времени возрастает в 10–60 раз.

3.12. Измельчение капель жидкости в газовой среде при разном давлении и температуре

Несмотря на достаточно обширные на сегодняшний день исследования в области соударений капель пока мало работ по исследованию влияния давлений и температур окружающей среды (соответствующих условиям работы реального технологического оборудования) на основные режимы соударений капель (отскок, разлет, коагуляция, дробление). Большинство экспериментов, предоставленных наукой до сих пор, проводились в идеальных условиях, что делает результаты неприменимыми напрямую к промышленным случаям. Целесообразно получить экспериментальные данные для широкого диапазона давлений и температур, соответствующих

типичным газопарокапельным приложениям. В частности, параметры, встречающиеся в типичных промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло в системах и установках при пожаротушении ($U_d=0.5\text{--}5$ м/с, $R_d=0.1\text{--}3$ мм) [162], сжигании топлив ($U_d=2\text{--}12$ м/с, $R_d=0.05\text{--}1.5$ мм) [163–165] и тепломассообменных процессах ($U_d=1\text{--}8$ м/с, $R_d=0.05\text{--}1$ мм) [166–168].

Отношение площадей фрагментов жидкости после и до дробления при варьировании давления газовой среды от 0.9 до 5 атм при температуре 20, 100 и 200 °С приведены на рис. 3.49. Для всех значений температур установлено увеличение значений S_1/S_0 с ростом числа Вебера. При этом установлено, что с увеличением давления дробление капель протекало менее эффективно. И наоборот, при давлении газовой среды ниже атмосферного установлен рост значений отношения S_1/S_0 . Площадь вторичных фрагментов после дробления при $P=3$ атм (рис. 3.49б) уменьшилась на 11–14% относительно дробления при $P=1$ атм, при $P=5$ атм значение S_1/S_0 снизилось на 15–23% относительно значений для $P=1$ атм (рис. 3.49в). При давлении $P=0.9$ атм свободная площадь поверхности вторичных фрагментов после дробления относительно начальной увеличилась на 7–13% относительно значений для $P=1$ атм. С увеличением температуры общая тенденция не изменилась, с повышением давления значения S_1/S_0 также снижались. Увеличение температуры газовой среды до 100 и 200 °С привело к росту свободной поверхности вторичных фрагментов для всех значений давления газовой среды. Относительно столкновений капель воды при $T=20$ °С и неизменном давлении $P=1$ атм значения S_1/S_0 при повышении температуры газовой среды до 100 и 200 °С увеличились соответственно на 7–10% и 10–16%. При $P=3$ атм и нагреве газовой среды рост значений S_1/S_0 составил 5–8% и 9–13%, а при $P=5$ атм S_1/S_0 увеличились на 4–8% и 6–10%. Причиной снижения относительной эффективности дробления капель при одинаковых температурах (20, 100 и 200 °С) и повышении давления газовой среды стали возросшие внешние силы, давящие на поверхность фрагментов после

дробления. Помимо того, что каплям приходилось преодолевать возросшее сопротивление перед столкновением, при дроблении жидкости на нее также давила газовая среда. Под воздействием повышенного давления площадь свободной поверхности вторичных фрагментов сдерживалась, т.е. ограничивалась их трансформация относительно сферической формы и область разлета относительно зоны соударения становилась достаточно малой. Вследствие этого они имели более сферическую форму, чем при нормальных условиях.

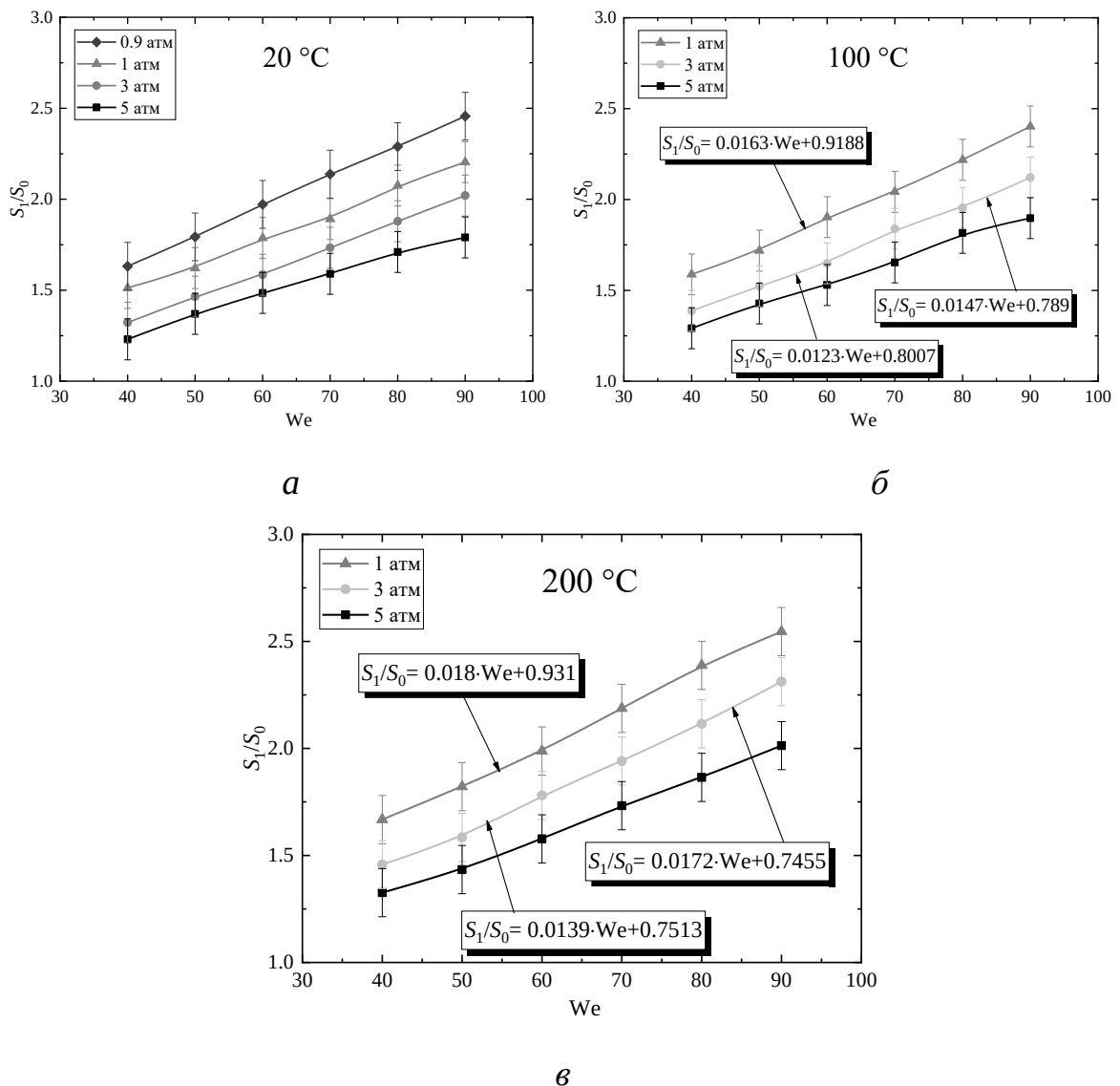


Рисунок 3.49. Зависимость отношения площадей свободной поверхности после и до взаимодействия от числа Вебера для $R_d=0.45-0.55$ мм при давлении 1, 3 и 5 атм и варьировании температуры: *а* – 20 °C; *б* – 100 °C; *в* – 200 °C.

3.13. Вторичное измельчение капель мазута при соударениях между собой и с твердой стенкой

Традиционно для вторичного измельчения капель используют четыре схемы: соударения капель с разогретой твердой подложкой [73,169]; воздействие на каплю жидкости воздушного потока [170]; соударения капель между собой [77,78] и микро-взрывное измельчение [158]. Так как мазут является высоко вязкостной жидкостью ($\mu \approx 0.0476$ Па·с при $T \approx 80^\circ\text{C}$), то разрушение его капель потоком натекающего воздуха мало вероятно. За счет высокой вязкости капля мазута уносится воздушным потоком, не разрушаясь, а лишь терпит небольшую трансформацию перпендикулярно оси приложенной силы. Микро-взрывное же измельчение мазута в топочных устройствах маловероятно, так как время прогрева капли при малой концентрации воды (до 10%) будет слишком велико, и капля успеет пройти путь до стенки топки, не загоревшись. В связи с этим в данной работе рассмотрены два варианта вторичного измельчения капель мазута, а именно соударение капель между собой и с разогретой твердой поверхностью. Нагрев поверхности осуществлялся за счет подключения лабораторного автотрансформатора. Контроль температуры проводился при помощи смарт-зонда Testo 805i.

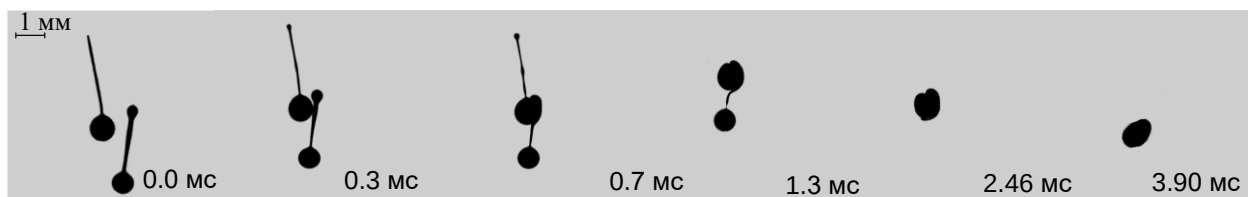
В [140] приведены характеристики измельчения капель воды при соударении с твердой поверхностью. Определенно, что максимальную эффективность в образовании вторичных фрагментов несет медная шлифованная подложка, также за счет своей теплопроводности такая подложка разогревается равномерно. Т.е. для медных подложек тепловые потоки существенно выше вследствие большей теплопроводности и температуропроводности по сравнению с металлическими. Чем выше тепловой поток, тем масштабнее измельчение капель. Особую роль в образовании вторичных фрагментов несет шероховатость подложки. В [28,29] показаны физические причины роста числа мелких капель при

повышении шероховатости подложки. В [140] определено, что при контакте с более гладкой поверхностью капли чаще всего растекались, и последующая капля коагулировала с образованной пленкой жидкости. В диссертационной работе использовалась медная подложка с классом шероховатости 3 ($R_a=10\text{--}20\text{ мкм}$; $R_z=40\text{--}80\text{ мкм}$).

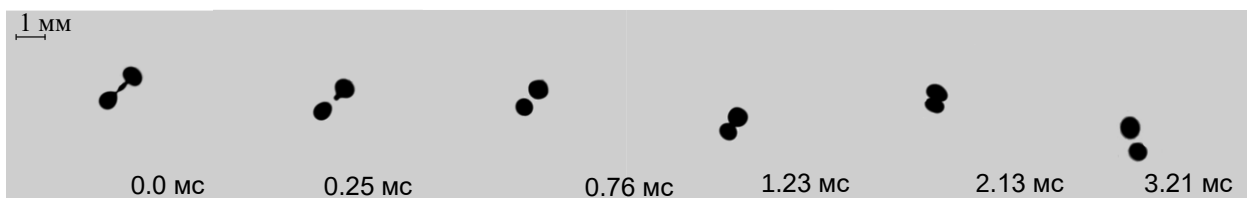
Для экспериментальных исследований измельчения капель мазута использовался специализированный стенд, который включал набор сопел для создания фиксированных размеров капель (R_d). Перед проведением опытов мазут М100 разогревался до температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\rho=850\text{ кг/м}^3$; $\sigma=0.03\text{ Н}\cdot\text{м}$; $\mu\approx 0.0476\text{ Па}\cdot\text{с}$). При измельчении капель путем соударения между собой использовался аналогичный стенд [171]. Для измельчения капель о твердую подложку использовался экспериментальный стенд аналогичный [140]. Система подачи жидкости состояла из емкости, насоса погружного типа с регулируемой производительностью (от 1.2 до 1.6 л/мин) и двух силиконовых капилляров, соединенных со специальными соплами (генераторами капель), расположенными в кольцевом держателе. Система сменных сопел позволяла варьировать размеры сгенерированных капель в пределах от 0.3 до 1.5 мм. Меняя их расположение в кольцевом держателе, варьировался угол атаки (α_d) в диапазоне от 0° до 90° . Скорости движения капель жидкости изменялись посредством регулирования производительности насоса (U_{d1} ; U_{d2}). Для измельчения капель о твердую подложку использовался экспериментальный стенд аналогичный [140].

На рис. 3.50 приведены типичные видеogramмы экспериментов для иллюстрации общих и отличительных особенностей взаимодействия капель мазута, воды и двухкомпонентного топлива (мазут 90 об%, вода 10 об%). Установлено, что при соударении капель мазута происходит коагуляция либо отскок (рис. 3.50а, б). При увеличении скорости капель мазута более 5 м/с, струя не разрушалась на капельный поток за счет высокой вязкости такого топлива, в следствии чего процесс дробления капель не может осуществиться. Отмечалась особенность разрушения струи в капельный

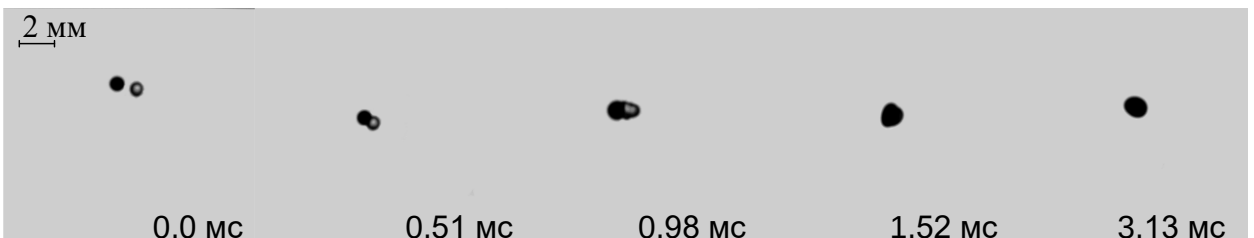
поток мазута, вслед за каплей образовывался тонкий шлейф, который включал в себя капли с размерами менее 0.2 мм. Для достижения процесса дробления каплей мазутное топливо обводнялось и нагревалось (мазут 90 об%, вода 10 об%, $T \approx 80^\circ\text{C}$). На рис. 3.50 приведены видеogramмы соударения капель двухкомпонентного топлива (мазут 90 об%, вода 10 об%, $T \approx 80^\circ\text{C}$), можно видеть, что образовывалось два крупных фрагмента с радиусами около 0.4 мм и несколько небольших с радиусами около 0.05 мм. Так же отмечено, что при соударении каплей двухкомпонентного топлива (мазут 90 об%, вода 10 об%, $T \approx 80^\circ\text{C}$) со скоростью менее 2 м/с, происходит отскок (рис. 3.50). При соударении же каплей воды с каплями мазута образовывалось гораздо больше фрагментов с радиусами около 0.1 мм. Капля мазута разбивала каплю воды, при этом измельчалась с образованием утонченного фрагментного шлейфа.



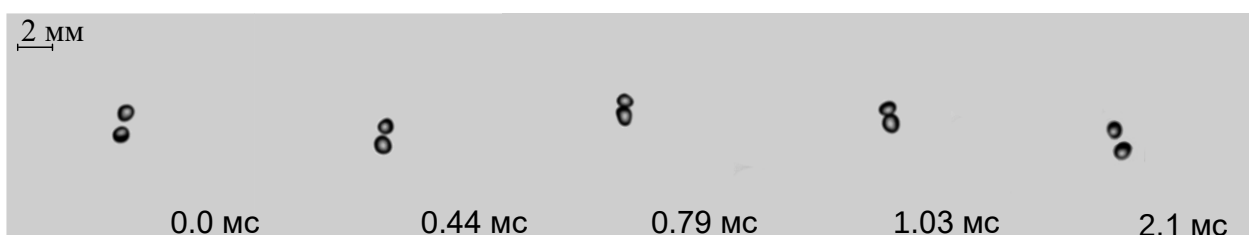
а



б



в



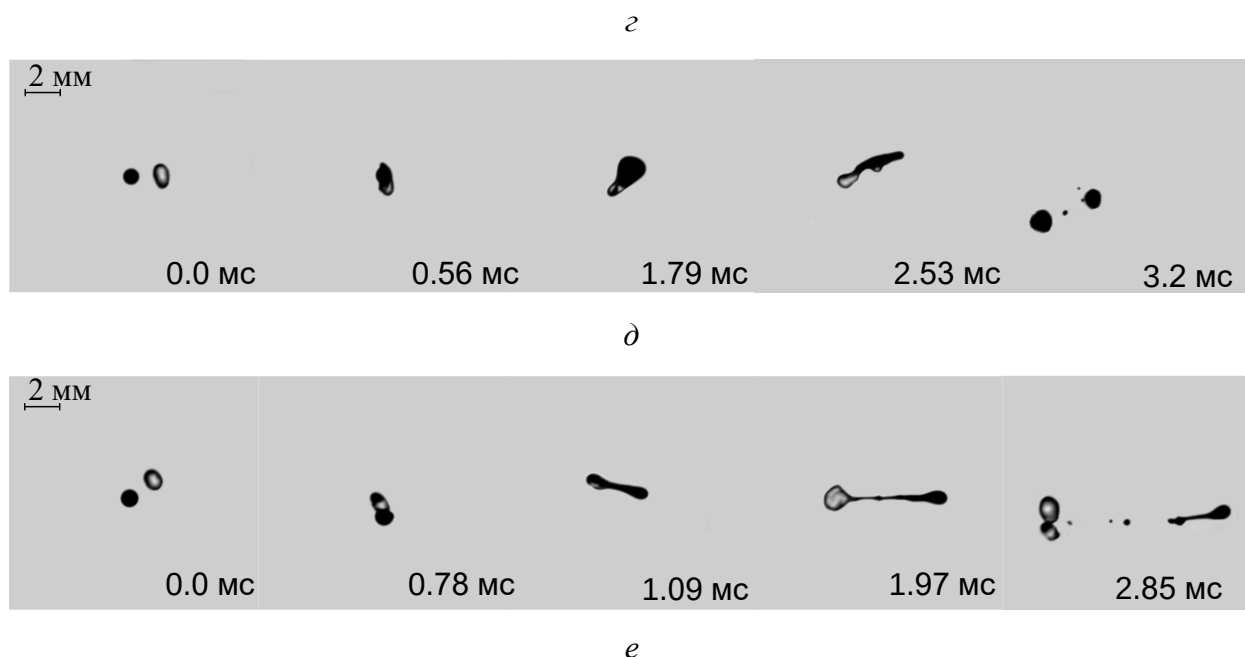


Рисунок 3.50. Видеокадры при соударении капель между собой; *а* – коагуляция капель мазута ($T \approx 80^\circ\text{C}$); *б* – отскок капель мазута ($T \approx 80^\circ\text{C}$); *в* – коагуляция капли мазута с каплей воды ($T \approx 80^\circ\text{C}$); *з* – отскок капель эмульсии мазута (мазут 90 об%, вода 10 об%, $T \approx 80^\circ\text{C}$); *д* – дробление капли мазута с каплей воды ($T \approx 80^\circ\text{C}$); *е* – дробление капли мазута с каплей воды ($T \approx 80^\circ\text{C}$).

Регистрировалось перемешивание капель топлива, что приводило к образованию вторичных капель эмульсии мазутного топлива с водой. При увеличении скорости до 3 м/с происходила коагуляция, что приводило к перемешиванию мазутного топлива с водой.

Выполненные экспериментальные исследования соударения капель мазута показали, что их измельчение за счет соударения между собой маловероятно. Поэтому мазут обводнялся на 10%. На рис. 3.51 видно, что для необводненного мазута регистрировались режимы отскока и коагуляция. Остальным же исследованным топливным составам типичен режим дробления. Можно отметить, что каплям топливных суспензий характерны неустойчивые формы поверхности (условный жидкий диск, эллипсоид и др.), которые приводили к режиму дробления при меньших силах инерции (практически на 30%) по сравнению с водой и водомасляными эмульсиями. С

точки зрения большинства практических приложений, базирующихся на первичном и вторичном распылении топливных композиций, основной интерес представляют диапазоны больших значений We (выше 50). Если выполнять сравнение результатов опытов с типичными композициями ВУТ (водоугольное топливо) и ОВУТ (органо-водоугольное топливо), то можно отметить, что добавление жидкого горючего компонента в состав ВУТ повышает вязкость. Это, в свою очередь, способствует значительному росту числа мелких капель, образующихся при дроблении исходных. Поэтому для ОВУТ процессы дробления происходили более масштабно даже при меньших значениях We . На рис. 3.51 приведены карты режимов соударяющихся капель топливных составов. Использована система координат безразмерного линейного параметра взаимодействия от числа Рейнольдса. Число Рейнольдса позволяет учесть вязкостные силы жидкости. Установлено, что, нагрев суспензий оказывает большее влияние на изменение режима взаимодействия по сравнению с каплями мазута, воды и топливных эмульсий. Такой эффект объясняется тем, что, нагрев капель интенсифицирует конвективный теплообмен в них. Это приводит к росту напряженности в каплях, за счет чего они распадаются с образованием большего количества вторичных фрагментов. Также повышение температуры жидкости привело к прогреву капель и снижению вязкости жидкости.

Анализ полученных по результатам опытов карт режимов (рис. 3.52) показал, что измельчение обводнённого мазута происходит при критическом числе Вебера более 150. Дробление же капель мазута, соударяющихся с каплями воды, происходит при критическом числе Вебера около 50. Такой эффект объясняется тем, что капля воды при соударении разрушается, и образовавшиеся вторичные фрагменты воды втягивают в себя капельки мазута. За счет этих эффектов увеличивается отношение площади свободной поверхности капель жидкости после и до взаимодействия. Следует отметить, что отношение свободных площадей поверхности после и до взаимодействия меняется существенно при числе Вебера более 100. Наибольшее количество

вторичных фрагментов зарегистрировано при соударении капель мазута с водой.

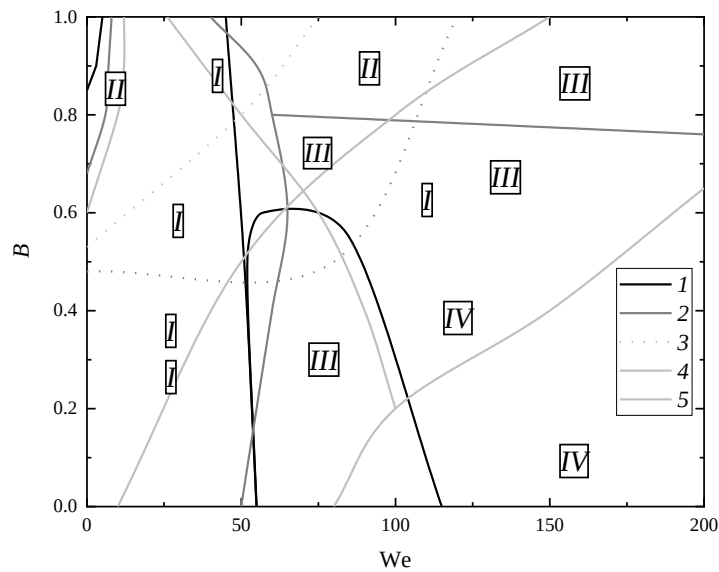


Рисунок 3.51. Карты режимов взаимодействия группы типичных составов с линейным параметрам взаимодействия: 1 – суспензия ВУТ (30 мас% уголь, 70 мас% вода); 2 – эмульсия (30 об% трансформаторное масло, 70 об% вода); 3 – суспензия ОВУТ (30 мас% уголь, 25 мас% трансформаторное масло, 45 мас% вода); 4 – вода; 5 – мазут; I – коагуляция; II – отскок; III – разлет; IV – дробление.

Сравнивая значения отношения S_1/S_0 , определено, что при числе Вебера около 200 капли двух компонентного топлива измельчаются эффективнее на 50 % относительно мазутного топлива, а соударяющиеся капли мазута с водой практически на 100%. Следует отметить, что в отличие от соударений капель между собой при регистрации условий измельчения капель мазута с твердой стенкой установлены два режима: растекание первой капли и фрагментация последующих капель (рис. 3.52). При столкновениях капель обводненного мазута между собой могут реализовываться несколько режимов: коагуляция; отскок; дробление (измельчение).

Анализ карты режимов (рис. 3.52) показал, что измельчение обводнённого мазута происходит при критическом числе Вебера более 150. Дробление же капель мазута, соударяющихся с каплями воды, происходит

при критическом числе Вебера около 50. Такой эффект объясняется, тем что капля воды при соударении разрушается, и образованные фрагменты втягивают в себя капельки мазута. За счет чего увеличивается отношение площади свободной поверхности после и до взаимодействия капель (рис. 3.53).

Как показывает анализ статей последних лет (например, [172]), посвященных изучению характеристик соударений неоднородных капель (эмульсий, растворов, суспензий, неперемешанных жидкостей), то можно сделать вывод о доминирующем влиянии не только сил инерции и поверхностного натяжения, но внутреннего трения (вязкости).

Анализ полученных карт режимов взаимодействия капель воды и жидких топлив в системах координат $Re(Oh)$ и $We(Oh)$ показывает, что чем меньше вязкость жидкости, тем интенсивнее реализуются процессы коагуляции капель (даже при высоких значениях We , соответствующих разлету и дроблению в системе координат $B(We)$, т.е. доминировании сил инерции над силами поверхностного натяжения).

Результаты проведенных экспериментов показывают не только широкие перспективы измельчения (дробления) капель мазутных композиций. Сопоставление экспериментальных значений характеристик процессов дробления капель топлив с разным компонентным составом при соударении в газовой среде на картах режимов взаимодействия дает основания для вывода о том, что капли любого жидкого композиционного топлива дробятся при существенно меньших аэродинамических нагрузках по сравнению с каплями однородных жидкостей. Анализ полученных карт режимов взаимодействия показывает, что установленные условия реализации этих режимов демонстрируют значения ключевых параметров, при которых можно осуществить существенное измельчение капель.

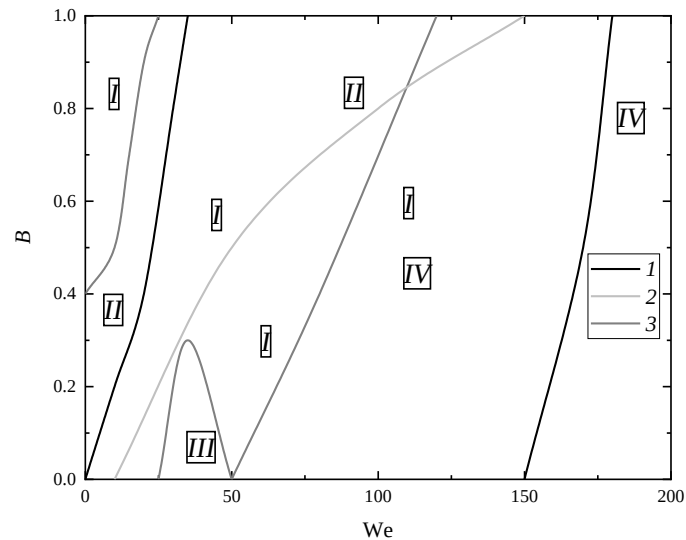


Рисунок 3.52. Карты режимов взаимодействия группы типичных составов с линейным параметрам взаимодействия: 1 – эмульсия мазута (мазут 90 об%, вода 10 об%); 2 – мазут; 3 – соударение капель мазута с водой; I – коагуляция; II – отскок; III – разлет; IV – дробление.

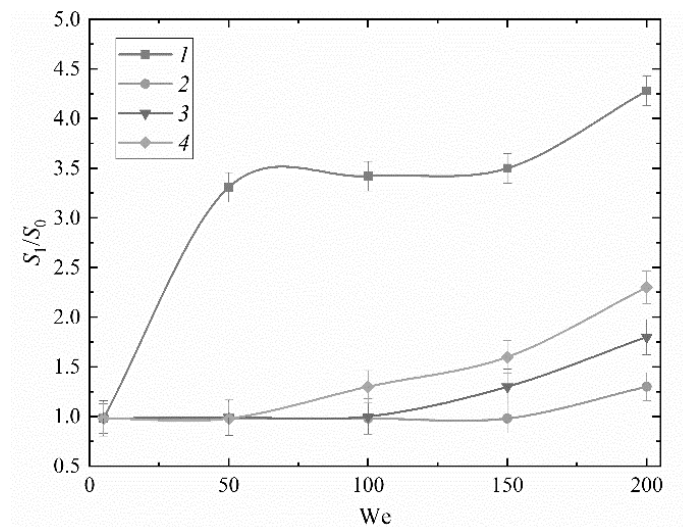
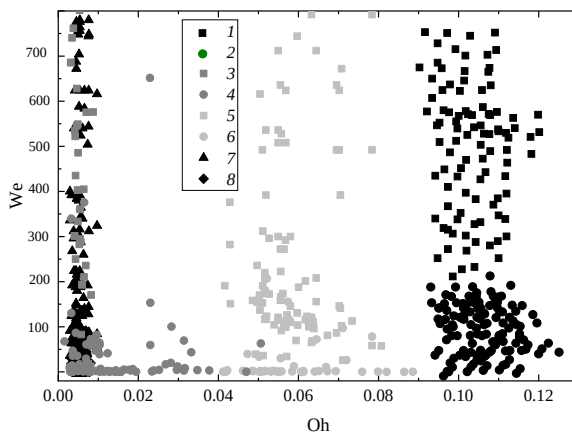


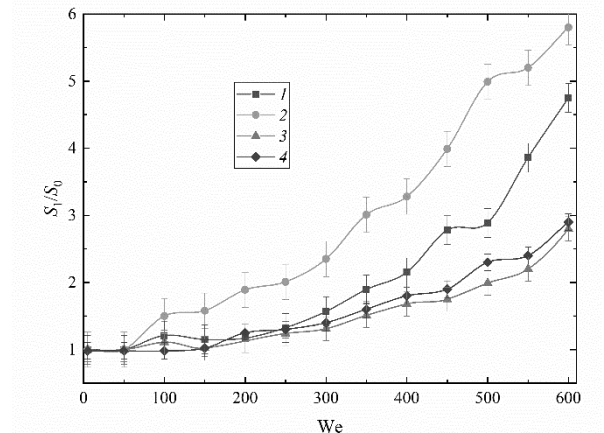
Рисунок 3.53. Отношение площадей свободной поверхности после и до взаимодействия: 1 – вода; 2 – мазут; 3 – эмульсия мазута (мазут 90 об%, вода 10 об%); 4 – соударение капель мазута с водой.

Следует отметить, что в отличие от соударений капель между собой при регистрации условий измельчения капель мазута с твердой стенкой установлены два режима: растекание первой капли и фрагментация последующих капель (рис. 3.54). При столкновениях капель обводненного

мазута между собой могут реализовываться несколько режимов: коагуляция; отскок; дробление (измельчение). На рис. 3.54 приведены карты режимов взаимодействия обводненного мазута с твердой стенкой. Установлено, что для достижения максимального эффекта измельчения капля мазута необходима температура стенки 300 °С. При измельчении мазута образовывается небольшое количество вторичных фрагментов в отличие от типичных суспензий и эмульсий, такой эффект объясняется высокой вязкостью мазута, которая даже при нагревании его остается высокой (рис. 3.54б).



а



б

Рисунок 3.54. Карта режимов взаимодействия (круг – растекание первой капли и коагуляция со всеми последующими, квадрат – дробление) капли с поверхностью при расчете чисел Вебера и Онезорге (а): 1,2 – вода; 3,4 – суспензия (уголь 30 мас%, вода 70 мас%); 5,6 – эмульсия (трансформаторное масло 30 об%; вода 70 об%); 7,8 – эмульсия (мазут 90 об%, 10 об% вода)). Зависимости отношения площадей поверхности жидкости от числа Вебера (б): 1 – вода; 2 – суспензия (уголь 30 мас%, вода 70 мас%); 3 – эмульсия (трансформаторное масло 30 об%; вода 70 об%); 4 – эмульсия (мазут 90 об%, 10 об% вода).

3.14. Рекомендации по использованию результатов исследований для повышения эффективности работы теплоэнергетических установок за счет первичного и вторичного измельчения капель топлив

По результатам выполненных экспериментальных исследований сформулирован перечень рекомендаций по практическому применению в теплоэнергетике схем вторичного измельчения капель жидкостей и композиционных топлив:

1. На основе результатов экспериментальных исследований из раздела 3.3 следует, что для достижения эффективного измельчения аэрозольных потоков необходимо устанавливать форсуночные устройства в теплоэнергетическом оборудовании под углом 60–90°.

2. Результаты раздела 3.4 показывают, что распыляемые жидкости необходимо нагревать до температуры 80–100°C, за счет чего снижается поверхностное натяжение и растет площадь испарения практически на 30%.

3. На основе результатов экспериментальных исследований в разделе 3.7 следует, что при увеличении вязкости с 0.001 до 0.0063 Па·с снижается количество вторичных фрагментов практически на 40%. Таким образом, можно рекомендовать снижать вязкость жидкости до значений максимально близких к вязкости воды около 0.001 Па·с.

4. Результаты раздела 3.7, показывают, что снижения поверхностного (с 0.07269 до 0.036 Н/м) и межфазного натяжения (с 0.04257 до 0.00341 Н/м) снижает количество вторичных фрагментов практически на 20% и на 70%, соответственно. Тем самым для использования в тепловых установках жидких и композиционных топлив рекомендуется к ним добавлять ПАВ (0.5 об% Твин-80) и эмульгатор D_cD (1.6 г/л).

5. В разделе 3.10 показано, что наиболее перспективная комбинация схем вторичного измельчения капель для получения мелкодисперсного аэрозоля предполагает соударения капель между собой или со стенкой, с последующим нагревом образующихся жидкостных фрагментов до состояния вскипания и последующего микро-взрывного разрушения. При

такой комбинации обеспечивается рост отношения S_1/S_0 более чем в 100 раз. В этом случае энергия, затрачиваемая на разогрев капель на втором этапе, минимальна, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа.

6. На основе результатов раздела 3.11 можно рекомендовать наиболее рациональную схему измельчения. На первом этапе происходит соударение капель между собой, а на втором – микро-взрывное дробление образовавшихся на первом этапе фрагментов. В этом случае может быть затрачена минимальная энергия на разогрев капель на втором этапе, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа.

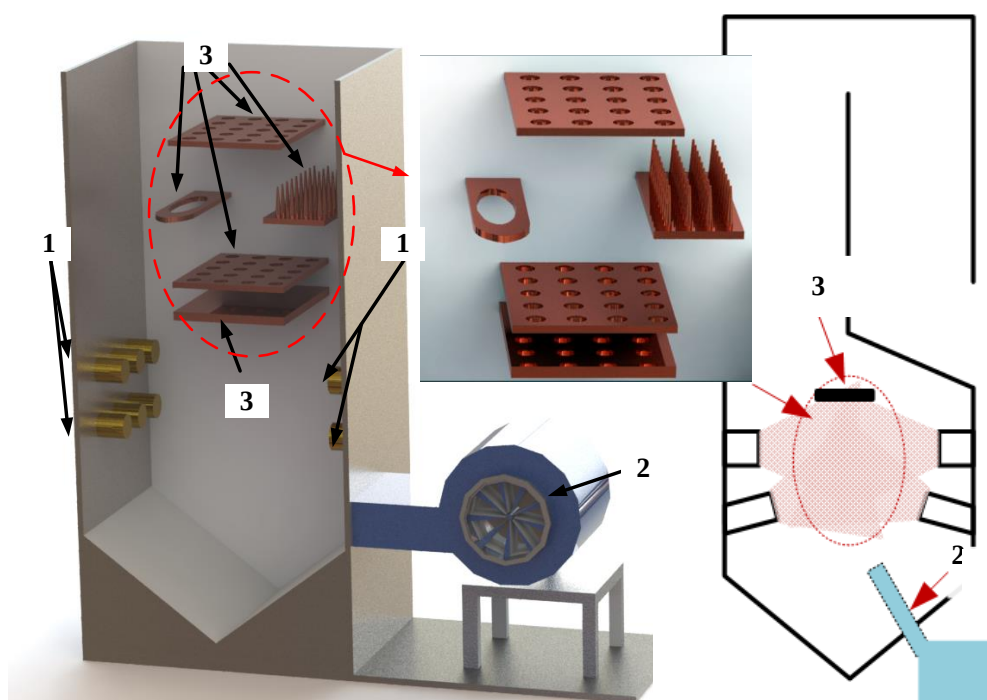
7. Результаты раздела 3.12 показывают, что вторичное измельчение капель обводненного мазута практически не является возможным при любой схеме измельчения. Таким образом, для эффективного вторичного измельчения в промышленном теплоэнергетическом оборудовании, можно рекомендовать обводнять мазут на 5–10%, что позволяет добиться существенной фрагментации капель при соударении между собой и с твердой поверхностью.

8. На основе результатов раздела 3.12 можно сделать вывод, что для достижения максимальной эффективности вторичного измельчения мазута за счет соударения между собой необходимо разогревать обводненный мазут до 80 °С.

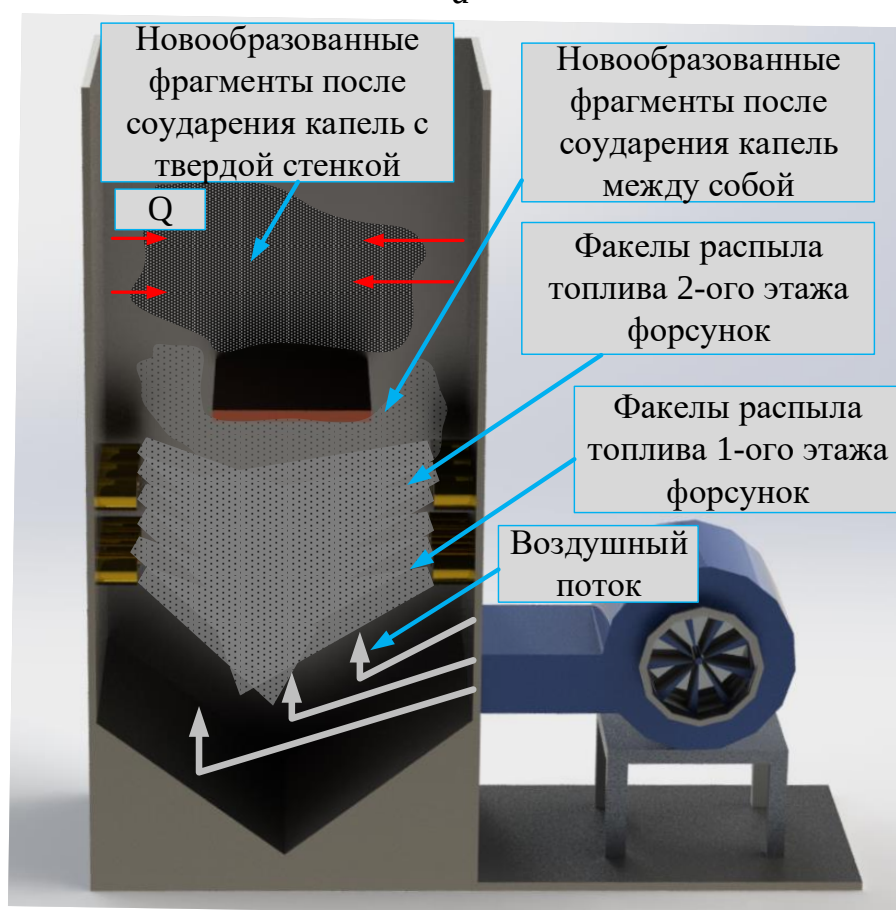
9. Результаты раздела 3.19 показывают, что для достижения эффективного процесса дробления одно и многокомпонентных капель о твердую поверхность необходимо осуществлять нагрев твердой подложки до температур выше кипения одного из компонентов состава, что позволяет увеличить площадь испарения практически в 20 раз.

10. Результаты раздела 3.19 показывают, что оптимальный угол для интенсификации дробления капель за счет соударения с разогретой твердой поверхностью составляет от 80 до 90°С.

По перечню рекомендаций составлена схема (рис. 3.55) применения комбинированных схем вторичного измельчения жидких и композиционных топлив в котельном оборудовании. Первый этап измельчения представляет распыления топлива при помощи форсуночных устройств. Форсуночные устройства располагаются с двух сторон в два этажа. На основании рекомендации 1 угол расположения форсуночных устройств должен составлять от 60 до 90° относительно распылителя с противоположной стороны. На втором этапе новообразованные фрагменты после соударения аэрозольных потоков между собой, подвергались воздействию разогретых воздушных масс, т.е. капли интенсивнее прогреваются и разрушаются, что приводит к снижению поверхностного натяжения топлива практически на 30% (такой вывод показан во 2 рекомендации). Далее вторичные фрагменты попадают на разогретую твердую стенку, которая располагается под углом 90° к аэрозольному потоку (что соответствует рекомендации 10). В соответствие с рекомендацией 9, температура стенки должна быть выше температуры кипения топлива. После измельчения о твердую стенку, новообразованные капли попадают в зону прогрева и происходит микро-взрывное измельчение. Также для увеличения эффективности процесса фрагментации капель жидких и композиционных топлив можно располагать различной формы преграды (например: ячеистая преграда; кольцевидная; преграда с цилиндрическими выпуклостями и т.п.). Такая комбинация методик вторичного измельчения приводит к росту площади испарения жидкости более чем в 100 раз и уменьшению размеров капель на 70-90%.



а



б

Рисунок 3.55. Схема расположения вспомогательных устройств для измельчения капель жидких и композиционных топлив (а) и их измельчения (б): 1 – форсунки; 2 – нагнетатель воздуха; 3 – дополнительные элементы конструкции.

Выводы по третьей главе

1. Интенсификация дробления капель при соударениях может приводить к разномасштабному росту площади поверхности жидкости в случае сфер, эллипсоидов и условных жидких дисков. Наиболее существенный (до 6–8 раз) рост S_1/S_0 можно обеспечить в системах с каплями в форме условных жидких дисков. На основе приведенных результатов экспериментов можно прогнозировать число капель и суммарную площадь поверхности испарения жидкости, как наиболее важные параметры в промышленных теплоэнергетических устройствах.

2. Проведенные эксперименты показали, что учет влияния роли (мишень и снаряд) соударяющихся капель приводит к изменению режимной карты взаимодействия. Наиболее существенные зарегистрированные изменения соответствуют переходам между режимами коагуляции и разлета. В частности, показано уменьшение критического числа Вебера на 20–25% для снаряда относительно мишени. Критические значения числа Вебера при переходе от разлета к дроблению для снаряда больше на 5–7%, чем мишени. Эти смещения привели к уменьшению диапазона изменения числа Вебера, соответствующего коагуляции. Этот режим заслуживает особого внимания, так как препятствует вторичному измельчению капель (наоборот, характеризует их агломерацию). Так, например, для мишени при $0 < B < 0.6$ диапазон составил $We=30–80$, а для снаряда $We=20–70$, при $0.6 < B < 1$ для мишени $We=55–120$, а для снаряда $We=45–110$.

3. По результатам даже высокоскоростной видеорегистрации и применения специализированного программно-аппаратного комплекса слежения в аэрозольном потоке сложно выделить все возможные режимы столкновений капель жидкостей, как в опытах с двумя каплями в идеализированных условиях. Тем не менее, условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель можно регистрировать достоверно при варьировании параметров аэрозолей и газов в широких диапазонах. Выполнены экспериментальные оценки влияния углового и

линейного параметров взаимодействия капель на вероятность возникновения основных режимов взаимодействия с учетом доминирования влияния размеров и скоростей перемещения капель.

4. Установлено, что определяющее влияние могут оказывать процессы парообразования, интенсифицирующие столкновения капель, уменьшение их размеров и повышающие вероятность их частичной или даже полной фрагментации.

5. Рост степени турбулизации газового потока интенсифицирует взаимодействия капель, но последствия этих соударений не всегда состоят в дроблении капель, т.е. значительной фрагментации. Детальное изучение видеограмм показало, что за счет варьирования расположения распылительных устройств можно также обеспечить условия интенсивной коагуляции и разлета.

6. Выполнен сравнительный анализ четырех зарегистрированных режимов соударения капель воды при наличии и без пузырьков CO_2 . Также дополнительно проведены эксперименты для изучения этих режимов в случае соударений капель воды в состоянии кипения, т.е. наполненных паровыми пузырьками. Показано, что наличие пузырьков CO_2 и паровых пузырьков существенно трансформирует каплю. В режиме дробления это приводит к существенному росту количества вторичных капелек (особенно мелких по размерам). Как следствие, площадь поверхности жидкости при вторичном измельчении соударяющихся капель газонасыщенной воды или в состоянии кипения существенно (на 40–70%) выше, чем воды при температуре 20 °C. На картах режимов соударений капель существенно увеличиваются области, соответствующие их отскоку и дроблению, при использовании газонасыщенной воды или в состоянии кипения.

7. Увеличение вязкости приводит к смещению границ дробления и разлета в сторону больших чисел Вебера ($We \approx 153$ и $We \approx 58$, соответственно) и снижению количества вторичных фрагментов с радиусом менее 0.15 мм практически на 40%. Снижение поверхностного натяжения жидкости

приводит к уменьшению критических (переходных между режимами) чисел Вебера для дробления и разлета на 67% и 63%, соответственно, и к росту отношения площадей свободной поверхности капель практически на 20%. Важно отметить, что снижение поверхностного натяжения жидкости вызывает синергетические эффекты, способствующие развитию цепных механизмов вторичного измельчения капель. Снижение межфазного натяжения эмульсии позволяет получить большее количество вторичных фрагментов, чем у исходной эмульсии без эмульгатора практически на 70%. Т.е. введение в состав капли даже нескольких процентов по относительной объемной концентрации эмульгатора способствует существенной фрагментации.

8. По результатам выполненных экспериментов с использованием карт $\beta(We)$, $B(We)$, $We(Oh)$, $Re(Oh)$, $We(Ca)$ впервые установлены диапазоны смещения переходных границ между четырьмя режимами взаимодействия однородных и неоднородных капель. Показан вклад угла атаки, соотношений размеров и скоростей движения, вязкости, плотности, поверхностного натяжения составов, их температуры нагрева, способствующей испарению и формированию вокруг капель паровой оболочки.

9. Для всех топливных композиций можно обеспечить реализацию каждого из четырех режимов взаимодействий. При этом данными режимами можно управлять за счет варьирования группы рассмотренных эффектов и факторов. Например, можно обеспечить интенсивное дробление капель топлив даже при относительно невысоких значениях We и Re за счет варьирования углов атаки, прицельного расстояния между каплями, компонентного состава жидкостей.

10. Установлены характеристики дробления капель, как функции от большой группы факторов: скорость движения капли, размер, число Вебера, угол атаки, температура стенки и тепловые потоки, теплофизические свойства материала стенки, шероховатость стенки, гидрофильность и гидрофобность поверхности, однородность и неоднородность состава капли,

вязкость и поверхностное натяжение жидкости, эффект влияния нескольких последовательно движущихся капель. Показано, что при контроле данных параметров можно варьировать характеристики измельчения капель в достаточно широких диапазонах.

11. Проведенные эксперименты показали, что наиболее перспективная комбинация схем измельчения представляет собой соударения между собой капель или со стенкой, а затем нагрев образующихся жидкостных фрагментов до состояния вскипания и последующего микро-взрывного разрушения. При такой комбинации можно обеспечить рост отношения S_1/S_0 более чем в 100 раз. Применение схемы дробления капель за счет удара воздушной средой можно рекомендовать в качестве некоторой дополнительной в случае крайней необходимости. Это связано с тем, что при использовании такой схемы образующиеся фрагменты жидкости могут налипать на противоположную (относительно движения потока воздуха) стенку камер или коагулировать с другими каплями при встречном направлении потока капель с потоком. Интенсивность измельчения во многом будет зависеть от параметров генерации капель. В случае больших аэрозольных потоков, образующихся при первичном распылении жидкости, сложно в широких диапазонах варьировать характеристики капель в разных сечениях аэрозольного облака.

12. Наиболее рациональной комбинацией схем измельчения можно считать соударение капель на первом этапе между собой, а на втором – микро-взрывное дробление фрагментов от первого этапа. В этом случае может быть затрачена минимальная энергия на разогрев капель на втором этапе, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа. Поэтому скорее всего рационально использовать системы первичного распыления жидкостей, спроектированные таким образом, чтобы потоки жидкостей пересекались в камерах сгорания или выпаривания жидкостей. После соударения капель образующиеся двухкомпонентные капли будут

фрагментировать в режиме микро-взрыва. Площадь поверхности жидкости может быть увеличена в десятки раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель можно регистрировать достоверно при варьировании параметров аэрозолей и газов в широких диапазонах, соответствующих энергетическим установкам. Выполнены экспериментальные оценки влияния углового и линейного параметров взаимодействия капель на частоту возникновения основных режимов взаимодействия с учетом доминирования влияния размеров и скоростей перемещения капель. Показано, что данные частоты могут быть применимы для прогнозирования условий интенсивного вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в камерах сгорания энергетических установок.

2. Увеличение вязкости жидких и композиционных топлив (от 0.001 до 0.0063 Па·с) приводит к смещению границ дробления и разлета в сторону больших чисел Вебера ($We \approx 153$ и $We \approx 58$, соответственно) и снижению количества вторичных фрагментов с радиусом менее 0.15 мм практически на 40%.

3. Снижение поверхностного натяжения (от 0.07269 до 0.036 Н/м) топлив приводит уменьшению критических (переходных между режимами) чисел Вебера для дробления и разлета на 67% и 63%, соответственно, и к росту отношения площадей свободной поверхности капель практически на 20%. Снижение поверхностного натяжения жидкости создает условия для реализации синергетических эффектов, способствующих развитию цепных механизмов вторичного измельчения капель.

4. Снижение межфазного натяжения (от 0.04257 до 0.00341 Н/м) эмульгированных топлив позволяет получить большее количество вторичных фрагментов, чем у исходной эмульсии без эмульгатора практически на 70%. Т.е. введение в состав капли даже нескольких процентов по относительной объемной концентрации эмульгатора способствует существенной фрагментации.

5. По результатам выполненных экспериментов с использованием карт $\beta(We)$, $B(We)$, $We(Oh)$, $Re(Oh)$, $We(Ca)$ установлены диапазоны смещения переходных границ между четырьмя режимами взаимодействия однородных и неоднородных капель. Показан вклад угла атаки, соотношений размеров и скоростей движения, вязкости, плотности, поверхностного натяжения составов, их температуры нагрева, способствующей испарению и формированию вокруг капель паровой оболочки.

6. Для всех топливных композиций можно обеспечить реализацию каждого из четырех режимов взаимодействий. При этом данными режимами можно управлять за счет варьирования группы рассмотренных эффектов и факторов. Например, можно обеспечить интенсивное дробление капель топлив даже при относительно невысоких значениях We и Re за счет варьирования углов атаки, прицельный расстояний между каплями, компонентного состава жидкостей.

7. Наиболее перспективная комбинация схем вторичного измельчения капель для получения мелкодисперсного аэрозоля представляет собой соударения между собой капель или со стенкой, а затем нагрев образующихся жидкостных фрагментов до состояния вскипания и последующего микро-взрывного разрушения. При такой комбинации обеспечивается рост отношения S_1/S_0 более чем в 100 раз. В этом случае затрачена минимальная энергия на разогрев капель на втором этапе, и не требуются большие скорости взаимодействия в рамках первого этапа.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Номенклатура:

B – линейный параметр взаимодействия;

b – расстояние между центрами масс капель, м;

D_d – диаметр капли, м;

E_{ch} – кинетическая энергия капель после взаимодействия, Дж;

E_{dr} – кинетическая энергия капель до взаимодействия, Дж;

m_{ch} – масса вторичных фрагментов, кг;

m_{d1} – масса первой капли, кг;

m_{d2} – масса второй капли, кг;

m_{dr} – масса исходной капли, кг;

N – количество вторичных фрагментов, шт.;

N_{ti} – количество видимых новообразованных капель, шт.;

N_{tv} – количество не видимых новообразованных капель, шт.;

P_0 – мощность тепловыделения при сжигании исходных капель, Вт;

P_1, P_2, P_3, P_4 – относительные частоты реализации коагуляции, разлета, дробления и отскока капель;

Q – тепловой поток, Вт/м²;

Q_c – теплота сгорания, Дж/кг;

Q_i – теплота парообразования, Дж/кг;

R_a – среднеарифметическое отклонение профиля, м;

R_d – радиус исходной капли, м;

R_{d1} – радиус первой капли, м;

R_{d2} – радиус второй капли, м;

R_f – радиус жидкой пленки, м;

R_z – высота неровностей профиля по 10 точкам, м;

r_d – радиус вторичных фрагментов, м;

r_d^a – средний размер образующихся фрагментов жидкости, м;

r_d^m – максимальный размер образующихся фрагментов жидкости, м;

r_i – радиус i частицы, м;
 S_0 – площадь поверхности капель, м²;
 S_1 – площадь поверхности вторичных фрагментов, м²;
 S_i – площадь вторичного фрагмента, м²;
 S_f – площадь жидкой пленки, м²;
 T_a – температура воздуха, °С;
 T_d – температура жидкости, °С;
 T_s – температура капли, °С;
 t – Время разрушения исходных капель с образованием аэрозоля, с;
 U_{ch} – скорость движения вторичных фрагментов, м/с;
 U_d – исходная скорость движения капли, м/с;
 U_{d1} – скорость движения первой капли, м/с;
 U_{d2} – скорость движения второй капли, м/с;
 U_g – скорость воздушного потока, м/с;
 U_{rel} – результирующая скорость движения капель, м/с;
 V_0 – объём капель до взаимодействия, м³;
 V_{ch} – объём вторичных фрагментов, м³;
 V_{d1} – объём первой капли, м³;
 V_{d2} – объём второй капли, м³;
 W_i – скорость выгорания топлива, кг/м²·с;
 W_b – скорость испарения жидкости, кг/м²·с.

Греческие символы:

$\alpha_d, \theta, \Upsilon$ – угол атаки, °;
 Δ – отношение размеров капель;
 β – угловой параметр взаимодействия;
 ΔP – разница тепловыделений, Вт;
 μ – динамическая вязкость, Па·с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 σ – поверхностное натяжение, Н/м;

σ_b – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴);

δU – относительная погрешность измерений.

Аббревиатура:

Oh – число Онезорге;

We – число Вебера;

Re – число Рейнольдса;

Ca – число капиллярности;

ВУТ – водоугольное топливо;

ОВУТ – органоводоугольное топливо;

КЖТ – композиционное жидкое топливо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] N. Lior, Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future, *Energy*. 33 (2008) 842–857. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.009>.
- [2] A.E. Kontorovich, L.V. Eder, Long-term and medium-term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century, *Russ. Geol. Geophys.* 55 (2014) 534–543. doi:[10.1016/J.RGG.2014.05.002](https://doi.org/10.1016/J.RGG.2014.05.002).
- [3] D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, M.Y. Chernetskii, Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review), *Therm. Eng.* 63 (2016). doi:[10.1134/S0040601516100037](https://doi.org/10.1134/S0040601516100037).
- [4] G.S. Nyashina, K.Y. Vershinina, M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak, Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal, *J. Hazard. Mater.* 347 (2018) 359–370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.014>.
- [5] O.O. Taskiran, M. Ergeneman, Trajectory based droplet collision model for spray modeling, *Fuel*. 115 (2014) 896–900. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.053>.
- [6] I. Malgarinos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises, Numerical investigation of heavy fuel droplet-particle collisions in the injection zone of a Fluid Catalytic Cracking reactor, Part I: Numerical model and 2D simulations, *Fuel Process. Technol.* 156 (2017) 317–330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.014>.
- [7] H. Zhao, Z. Wu, W. Li, J. Xu, H. Liu, Interaction of two drops in the bag breakup regime by a continuous air jet, *Fuel*. 236 (2019) 843–850. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.067>.
- [8] A. A. Shebeleva, A. V. Minakov, M. Chernetskiy, P. Strizhak, Deformation of a Droplet of an Organic Water—Coal Fuel in a Gas Flow, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 59 (2018) 653–661. doi:[10.1134/S0021894418040119](https://doi.org/10.1134/S0021894418040119).
- [9] S. V Alekseenko, L.I. Maltsev, A.R. Bogomolov, M.Y. Chernetskiy, I. V Kravchenko, A.I. Kravchenko, D.A. Lapin, S.A. Shevyrev, S.Y. Lyrshchikov,

Results of pilot-operating combustion of coal-water fuel in a low-capacity hot water boiler, *Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng.* 328 (2017) 16–28. [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.85040003107&partnerID=40&md5=feb7e66d065efcb2979ff93093355374)

[s2.0.85040003107&partnerID=40&md5=feb7e66d065efcb2979ff93093355374](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.85040003107&partnerID=40&md5=feb7e66d065efcb2979ff93093355374).

[10] Y. Suzuki, T. Harada, H. Watanabe, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets, *Proc. Combust. Inst.* (2011). doi:10.1016/j.proci.2010.05.115.

[11] H. Watanabe, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52 (2009) 3676–3684. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.033.

[12] Z. Yin, P. Nau, W. Meier, Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 82 (2017) 50–57. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.11.004.

[13] D. Tarlet, C. Josset, J. Bellettre, Comparison between unique and coalesced water drops in micro-explosions scanned by differential calorimetry, *Int. J. Heat Mass Transf.* 95 (2016) 689–692. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.054.

[14] K. Warncke, S. Gepperth, B. Sauer, A. Sadiki, J. Janicka, R. Koch, H.-J. Bauer, Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet, *Int. J. Multiph. Flow.* 91 (2017) 208–224. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.12.010.

[15] D. Tarlet, C. Allouis, J. Bellettre, The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion, *Int. J. Therm. Sci.* (2016). doi:10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.008.

[16] C. Cen, H. Wu, C. Lee, F. Liu, Y. Li, Experimental investigation on the characteristic of jet break-up for butanol droplet impacting onto a heated surface in the film boiling regime, *Int. J. Heat Mass Transf.* 123 (2018) 129–136. doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.02.059.

[17] M. Pasandideh-Fard, S.D. Aziz, S. Chandra, J. Mostaghimi, Cooling

effectiveness of a water drop impinging on a hot surface, *Int. J. Heat Fluid Flow*. 22 (2001) 201–210. doi:10.1016/S0142-727X(00)00086-2.

[18] S. Jung, S.D. Hoath, G.D. Martin, I.M. Hutchings, Experimental study of atomization patterns produced by the oblique collision of two viscoelastic liquid jets, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* 166 (2011) 297–306. doi:10.1016/j.jnnfm.2010.12.006.

[19] C. Planchette, E. Lorenceau, G. Brenn, Liquid encapsulation by binary collisions of immiscible liquid drops, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 365 (2010) 89–94. doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.12.011.

[20] X. Zhang, T. Li, B. Wang, Y. Wei, Superheat limit and micro-explosion in droplets of hydrous ethanol-diesel emulsions at atmospheric pressure and diesel-like conditions, *Energy*. 154 (2018) 535–543. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.176.

[21] M.M. Avulapati, L.C. Ganippa, J. Xia, A. Megaritis, Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends, *Fuel*. 166 (2016). doi:10.1016/j.fuel.2015.10.107.

[22] X.-K. Cao, Z.-G. Sun, W.-F. Li, H.-F. Liu, Z.-H. Yu, A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow, *Phys. Fluids*. 19 (2007) 57103.

[23] C.H. Lee, R.D. Reitz, An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream, *Int. J. Multiph. Flow*. 26 (2000) 229–244. doi:https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00020-8.

[24] B. Boughton, A. Horvath, Environmental Assessment of Used Oil Management Methods, *Environ. Sci. Technol.* 38 (2004) 353–358. doi:10.1021/es034236p.

[25] V. V Ermakov, A. Bogomolov, D.E. Bykov, Oil sludge depository assessment using multivariate data analysis, *J. Environ. Manage.* 105 (2012) 144–151. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.041.

[26] V. Kapustina, J. Havukainen, T. Virkki-Hatakka, M. Horttanainen,

System analysis of waste oil management in Finland, *Waste Manag. Res.* 32 (2014). doi:10.1177/0734242X14523663.

[27] G. Liang, I. Mudawar, Review of drop impact on heated walls, *Int. J. Heat Mass Transf.* 106 (2017) 103–126. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.031.

[28] G. Liang, I. Mudawar, Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film, *Int. J. Heat Mass Transf.* 101 (2016) 577–599. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.062.

[29] Š. Šikalo, M. Marengo, C. Tropea, E.N. Ganić, Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 25 (2002) 503–510. doi:https://doi.org/10.1016/S0894-1777(01)00109-1.

[30] J. Xie, T.N. Wong, F. Duan, Modelling on the dynamics of droplet impingement and bubble boiling in spray cooling, *Int. J. Therm. Sci.* 104 (2016) 469–479. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.02.016.

[31] A.A. Shebeleva, A. V Minakov, M.Y. Chernetskii, P.A. Strizhak, Deformation of a Droplet of an Organic Water---Coal Fuel in a Gas Flow, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 59 (2018) 653–661. doi:10.1134/S0021894418040119.

[32] D. V Antonov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak, An explosive disintegration of heated fuel droplets with adding water, *Chem. Eng. Res. Des.* 140 (2018) 292–307. doi:https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.031.

[33] M.S. Gad, A. Mahfouz, A. Emara, Spray and combustion characteristics for light diesel/waste cooking oils blended with fuel additives inside an industrial boiler, *Fuel.* 286 (2021) 119247. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119247.

[34] A. Mahfouz, H.A. Moneib, A. El-fatih, A.F. El-Sherif, H.S. Ayoub, A. Emara, Comparative study among waste cooking oil blends flame spectroscopy as an alternative fuel through using an industrial burner, *Renew. Energy.* 159 (2020) 893–907. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.041.

[35] T. Daho, G. Vaitilingom, O. Sanogo, Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in a non-modified domestic boiler,

Fuel. 88 (2009) 1261–1268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.12.021>.

[36] C.T. Chong, S. Hochgreb, Fundamental Spray Combustion Characteristics of Rapeseed Biodiesel, Diesel and Blend, Energy Procedia. 75 (2015) 2394–2399. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.186>.

[37] S. Sharma, R. Kumar, A. Chowdhury, Y. Yoon, S. Kumar, On the effect of spray parameters on CO and NO_x emissions in a liquid fuel fired flameless combustor, Fuel. 199 (2017) 229–238. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.102>.

[38] Е.А. Блинов, Топливо и теория горения, СПб. Изд-ВоСЗТУ. (2007).

[39] H.Y. Park, K. Han, H.H. Kim, S. Park, J. Jang, G.S. Yu, J.H. Ko, Comparisons of combustion characteristics between bioliquid and heavy fuel oil combustion in a 0.7 MWth pilot furnace and a 75 MWe utility boiler, Energy. 192 (2020) 116557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116557>.

[40] Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, С.И. Лазарев, Д.А. Лапин, Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности, Теплоэнергетика. (2014) 25–30.

[41] A. Zenkov, D. Gvozdyakov, V. Gubin, Analysis of coal-water fuel flow structure in the process of coaxial spraying, in: AIP Conf. Proc., 2019: p. 20064. doi:10.1063/1.5120701.

[42] D. Gvozdyakov, A. Zenkov, V. Gubin, Experimental research of flow characteristics of coaxially atomized coal-water fuel, J. Phys. Conf. Ser. 1359 (2019) 12040. doi:10.1088/1742-6596/1359/1/012040.

[43] P. Lu, M. Zhang, Experimental Investigation on Atomization Properties of Coal-Water Paste Fired Into Pressurized Fluidized Bed Combustor, in: 2003. doi:10.1115/FBC2003-119.

[44] H. Zhao, Y.-B. Hou, H.-F. Liu, X.-S. Tian, J.-L. Xu, W.-F. Li, Y. Liu, F.-Y. Wu, J. Zhang, K.-F. Lin, Influence of rheological properties on air-blast atomization of coal water slurry, J. Nonnewton. Fluid Mech. 211 (2014) 1–15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2014.06.007>.

[45] R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Statistical analysis of consequences of collisions between two water droplets upon their motion in a high-temperature gas flow, *Tech. Phys. Lett.* 41 (2015). doi:10.1134/S1063785015090126.

[46] D. V Antonov, R.S. Volkov, G. V Kuznetsov, P.A. Strizhak, Experimental Study of the Effects of Collision of Water Droplets in a Flow of High-Temperature Gases, *J. Eng. Phys. Thermophys.* 89 (2016) 100–111. doi:10.1007/s10891-016-1356-1.

[47] N. Ashgriz, P. Givi, Coalescence efficiencies of fuel droplets in binary collisions, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 16 (1989) 11–20. doi:https://doi.org/10.1016/0735-1933(89)90037-7.

[48] A.E. Komrakova, O. Shardt, D. Eskin, J.J. Derksen, Effects of dispersed phase viscosity on drop deformation and breakup in inertial shear flow, *Chem. Eng. Sci.* 126 (2015) 150–159. doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.12.012.

[49] J. Song, J.G. Lee, Characterization of spray formed by diesel-water mixture jet injected into an air crossflow, in: *Proc. ASME Turbo Expo*, 2017. doi:10.1115/GT2017-64939.

[50] X.-K. Cao, Z.-G. Sun, W.-F. Li, H.-F. Liu, Z.-H. Yu, A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow, *Phys. Fluids*. 19 (2007). doi:10.1063/1.2723154.

[51] Y. Jin, X.D. Chen, Entropy production during the drying process of milk droplets in an industrial spray dryer, *Int. J. Therm. Sci.* 50 (2011) 615–625. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.10.013.

[52] D. V. Antonov, P.A. Strizhak, Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow, *Chem. Eng. Res. Des.* (2019). doi:10.1016/j.cherd.2019.03.037.

[53] M.Y. Khan, Z.A. Abdul Karim, A.R.A. Aziz, I.M. Tan, Experimental investigation of microexplosion occurrence in water in diesel emulsion droplets during the leidenfrost effect, *Energy and Fuels*. 28 (2014). doi:10.1021/ef501588z.

- [54] В.В. Фисенко, Критические двухфазные потоки, М. Атомиздат. 160 (1978).
- [55] Н.А. Фукс, Механика аэрозолей, АН СССР, 1955.
- [56] В.Г. Лабейш, Гидромеханика и газодинамика, Л. Изд-Во СЗПИ. (1973).
- [57] Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.М. Подвысоцкий, Двухфазные моно-и полидисперсные течения газа с частицами, М. Машиностроение. 176 (1980).
- [58] М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов, Газодинамика двухфазных сред, Энергия, 1968.
- [59] С.С. Кутателадзе, В.Е. Накоряков, Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах, Наука. Сиб. отд-ние, 1984.
- [60] М.С. Волынский, Необыкновенная жизнь обыкновенной капли, Знание, 1986.
- [61] Л. Лойцянский, Механика жидкости и газа, Рипол Классик, 1950.
- [62] Р.И. Нигматулин, Динамика многофазных сред: В 2-х частях Ч. 2, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
- [63] В.А. Архипов, И.М. Васенин, В.Ф. Трофимов, А.С. Усанина, Устойчивость формы частиц дисперсной фазы при малых числах Рейнольдса, Известия Российской Академии Наук. Механика Жидкости и Газа. (2013) 5–14.
- [64] В.В. Дубровский, В.В. Подвысоцкий, А.А. Шрайбер, Измерение периода собственных колебаний капель и двухкомпонентных частиц, Инженерно-Физический Журнал. 58 (1990) 804.
- [65] A.A. Shraiber, A.M. Podvysotsky, V. V Dubrovsky, Deformation and breakup of drops by aerodynamic forces, At. Sprays. 6 (1996) 667–692. doi:10.1615/AtomizSpr.v6.i6.30.
- [66] V.A. Arkhipov, I.M. Vasenin, V.F. Trofimov, Stability of colliding drops of ideal liquid, J. Appl. Mech. Tech. Phys. 24 (1983) 371–373. doi:10.1007/BF00909756.

[67] J. Eggers, E. Villermaux, Physics of liquid jets, Reports Prog. Phys. 71 (2008). doi:10.1088/0034-4885/71/3/036601.

[68] M. Orme, Experiments on droplet collisions, bounce, coalescence and disruption, Prog. Energy Combust. Sci. 23 (1997) 65–79. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031337132&partnerID=40&md5=6f227bc5f12d67e7569b389618c88569>.

[69] W. Rommel, E. Blass, Hydrodynamic Modeling of Droplet Coalescence at Liquid-Liquid Interfaces, Sep. Sci. Technol. 27 (1992) 129–159. doi:10.1080/01496399208018870.

[70] Y. Li, Z. Ning, M. Lü, Experimental study on fusion and break-up motion after droplet collision, Chinese J. Chem. Eng. (2020). doi:10.1016/j.cjche.2019.09.002.

[71] B. Buck, Y. Tang, N.G. Deen, J.A.M. Kuipers, S. Heinrich, Dynamics of wet particle–wall collisions: Influence of wetting condition, Chem. Eng. Res. Des. 135 (2018) 21–29. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.014>.

[72] Z. Peng, Y. Pei, J. Qin, L. Lu, Q. Zhu, Z. Peng, Experimental Study on Impingement of Single Gasoline Droplet on Different Substrates [汽油单液滴撞击不同壁面试验研究], Neiranji Gongcheng/Chinese Intern. Combust. Engine Eng. 40 (2019) 36–42 and 49. doi:10.13949/j.cnki.nrjgc.2019.06.006.

[73] E.-S.R. Negeed, N. Ishihara, K. Tagashira, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, Experimental study on the effect of surface conditions on evaporation of sprayed liquid droplet, Int. J. Therm. Sci. 49 (2010) 2250–2271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.08.008>.

[74] Y. Pei, Q. Zhu, Z. Peng, J. Qin, L. Lu, Z. Peng, Y. Liu, Characteristics of Single Droplet Impact on Liquid Film with Different Viscosity [单液滴撞击不同黏度液膜特性研究], Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue Yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal Tianjin Univ. Sci. Technol. 52 (2019) 949–958. doi:10.11784/tdxbz201809053.

[75] B. Wang, B. Ke, B. Chen, R. Li, R. Tian, Study on the size of secondary droplets generated owing to rupture of liquid film on corrugated plate wall, *Int. J. Heat Mass Transf.* 147 (2020). doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118904.

[76] S. Huang, G. Zheng, R. Huang, T. Lan, Z. Yang, Y. Liu, Influence of Altitude on Diesel Oil Spray Impingement and Attaching Wall Combustion [海拔对柴油喷雾和附壁燃烧过程的影响], *Neiranji Xuebao/Transactions CSICE (Chinese Soc. Intern. Combust. Engines)*. 37 (2019) 522–528. doi:10.16236/j.cnki.nrjxb.201906067.

[77] M. Szakáll, I. Urbich, Wind tunnel study on the size distribution of droplets after collision induced breakup of levitating water drops, *Atmos. Res.* 213 (2018) 51–56. doi:10.1016/j.atmosres.2018.05.007.

[78] C.-K. Kuan, K.-L. Pan, W. Shyy, Study on high-Weber-number droplet collision by a parallel, adaptive interface-tracking method, *J. Fluid Mech.* 759 (2014) 104–133. doi:10.1017/jfm.2014.558.

[79] K.Y. Vershinina, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, A comparison of ignition characteristics of slurry fuels prepared using coal processing waste and finely divided coal, *J. Energy Inst.* 92 (2019) 1167–1177. doi:10.1016/j.joei.2018.06.001.

[80] H. Chen, D.L.S. Hung, M. Xu, J. Zhong, A dynamic thresholding technique for extracting the automotive spark-ignition direct-injection pulsing spray characteristics, *J. Vis.* 17 (2014) 197–209. doi:10.1007/s12650-014-0203-8.

[81] B.E. Gelfand, Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag, *Prog. Energy Combust. Sci.* 22 (1996) 201–265. doi:https://doi.org/10.1016/S0360-1285(96)00005-6.

[82] A. Amani, N. Balcázar, E. Gutiérrez, A. Oliva, Numerical study of binary droplets collision in the main collision regimes, *Chem. Eng. J.* 370 (2019) 477–498. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.188.

[83] G.H. Ko, H.S. Ryou, Droplet collision processes in an inter-spray

impingement system, *J. Aerosol Sci.* 36 (2005) 1300–1321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.02.005>.

[84] H. Fujimoto, T. Ogino, H. Takuda, N. Hatta, Collision of a droplet with a hemispherical static droplet on a solid, *Int. J. Multiph. Flow.* 27 (2001) 1227–1245. doi:[https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00075-6).

[85] V. Bertola, An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* 85 (2015) 430–437. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.084>.

[86] H. Fujimoto, Y. Oku, T. Ogihara, H. Takuda, Hydrodynamics and boiling phenomena of water droplets impinging on hot solid, *Int. J. Multiph. Flow.* 36 (2010) 620–642. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.04.004>.

[87] A.K. Flock, D.R. Guildenbecher, J. Chen, P.E. Sojka, H.-J. Bauer, Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops, *Int. J. Multiph. Flow.* 47 (2012) 37–49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.06.008>.

[88] C.H. Wang, W.G. Hung, S.Y. Fu, W.C. Huang, C.K. Law, On the burning and microexplosion of collision-generated two-component droplets: Miscible fuels, *Combust. Flame.* 134 (2003) 289–300. doi:[10.1016/S0010-2180\(03\)00087-7](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(03)00087-7).

[89] K. Meng, Y. Wu, Q. Lin, F. Shan, W. Fu, K. Zhou, T. Liu, L. Song, F. Li, Microexplosion and ignition of biodiesel/ethanol blends droplets in oxygenated hot co-flow, *J. Energy Inst.* (2018). doi:[10.1016/J.JOEI.2018.07.021](https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2018.07.021).

[90] R.S. Volkov, G. V Kuznetsov, P.A. Strizhak, Statistical analysis of consequences of collisions between two water droplets upon their motion in a high-temperature gas flow, *Tech. Phys. Lett.* 41 (2015) 840–843. doi:[10.1134/S1063785015090126](https://doi.org/10.1134/S1063785015090126).

[91] Y.O. Williams, N. Roas-Escalona, G. Rodríguez-Lopez, A. Villa-Torrealba, J. Toro-Mendoza, Modeling droplet coalescence kinetics in microfluidic devices using population balances, *Chem. Eng. Sci.* 201 (2019) 475–483. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.02.040>.

[92] M.E. Tat, J.H. Van Gerpen, The kinematic viscosity of biodiesel and its blends with diesel fuel, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 76 (1999) 1511–1513. doi:10.1007/s11746-999-0194-0.

[93] J.H. Wood, G. Catacalos, S. V Lieberman, Adaptation of Commercial Viscometers for Special Applications in Pharmaceutical Rheology I: The Brookfield Viscometer, *J. Pharm. Sci.* 52 (1963) 296–298. doi:https://doi.org/10.1002/jps.2600520324.

[94] K. Lunkenheimer, K.D. Wantke, On the applicability of the du Nouy (ring) tensiometer method for the determination of surface tensions of surfactant solutions, *J. Colloid Interface Sci.* 66 (1978) 579–581. doi:https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90079-6.

[95] G. Finotello, S. De, J.C.R. Vrouwenvelder, J.T. Padding, K.A. Buist, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M. Kuipers, Experimental investigation of non-Newtonian droplet collisions: the role of extensional viscosity, *Exp. Fluids*. 59 (2018). doi:10.1007/s00348-018-2568-2.

[96] C. Hu, S. Xia, C. Li, G. Wu, Three-dimensional numerical investigation and modeling of binary alumina droplet collisions, *Int. J. Heat Mass Transf.* 113 (2017) 569–588. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.094.

[97] T. Krebs, C.G.P.H. Schroën, R.M. Boom, Coalescence kinetics of oil-in-water emulsions studied with microfluidics, *Fuel*. 106 (2013) 327–334. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.067.

[98] R.-H. Chen, W.-C. Wang, Y.-W. Chen, Like-drop collisions of biodiesel and emulsion diesel, *Eur. J. Mech. - B/Fluids*. 60 (2016) 62–69. doi:https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2016.07.009.

[99] A. Munnannur, R.D. Reitz, A new predictive model for fragmenting and non-fragmenting binary droplet collisions, *Int. J. Multiph. Flow*. 33 (2007) 873–896. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.003.

[100] J. QIAN, C.K. LAW, Regimes of coalescence and separation in droplet collision, *J. Fluid Mech.* 331 (1997) 59–80. doi:10.1017/S0022112096003722.

- [101] J.-P. Estrade, H. Carentz, G. Lavergne, Y. Biscos, Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets – a model for droplet coalescence and bouncing, *Int. J. Heat Fluid Flow*. 20 (1999) 486–491. doi:[https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00036-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00036-3).
- [102] yi ting Koh, S. A Higgins, J. S Weber, W. Kast, Immunological consequences of using three different clinical/laboratory techniques of emulsifying peptide-based vaccines in incomplete Freund's adjuvant, *J. Transl. Med.* 4 (2006) 42. doi:[10.1186/1479-5876-4-42](https://doi.org/10.1186/1479-5876-4-42).
- [103] G. Finotello, R.F. Kooiman, J.T. Padding, K.A. Buist, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M. Kuipers, The dynamics of milk droplet--droplet collisions, *Exp. Fluids*. 59 (2017) 17. doi:[10.1007/s00348-017-2471-2](https://doi.org/10.1007/s00348-017-2471-2).
- [104] K.G. Krishnan, E. Loth, Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes, *Int. J. Multiph. Flow*. 77 (2015) 171–186. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.08.003>.
- [105] S. Kim, D.J. Lee, C.S. Lee, Modeling of binary droplet collisions for application to inter-impingement sprays, *Int. J. Multiph. Flow*. 35 (2009) 533–549. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.02.010>.
- [106] I. Malgarinos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises, A numerical study on droplet-particle collision dynamics, *Int. J. Heat Fluid Flow*. 61 (2016) 499–509. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.06.010>.
- [107] H. Zhang, Y. Li, J. Li, Q. Liu, Study on separation abilities of moisture separators based on droplet collision models, *Nucl. Eng. Des.* 325 (2017) 135–148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.09.030>.
- [108] H. Kan, H. Nakamura, S. Watano, Effect of collision angle on particle-particle adhesion of colliding particles through liquid droplet, *Adv. Powder Technol.* 29 (2018) 1317–1322. doi:[10.1016/j.appt.2018.02.026](https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.02.026).
- [109] R.S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas, *Int. J. Heat Mass Transf.* 85 (2015) 1–11. doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.078](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.078).

- [110] O.V. Vysokomornaya, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak, Breakup of heterogeneous water drop immersed in high-temperature air, *Appl. Therm. Eng.* 127 (2017). doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.162.
- [111] Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating, *Chem. Eng. Res. Des.* 127 (2017) 72–80. doi:10.1016/J.CHERD.2017.09.008.
- [112] O. V Vysokomornaya, N.E. Shlegel', P.A. Strizhak, Interaction of Water Droplets in Air Flow at Different Degrees of Flow Turbulence, *J. Eng. Thermophys.* 28 (2019). doi:10.1134/S1810232819010016.
- [113] G.H. Ko, H.S. Ryou, Modeling of droplet collision-induced breakup process, *Int. J. Multiph. Flow.* 31 (2005) 723–738. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.02.004.
- [114] В.А. Архипов, Г.С. Ратанов, В.Ф. Трофимов, Экспериментальное исследование взаимодействия капель при столкновениях, *Журнал Прикладной Механики и Технической Физики.* (1978) 73–77.
- [115] В.А. Архипов, И.М. Васенин, В.Ф. Трофимов, К устойчивости капель идеальной жидкости при столкновениях, *Прикладная Механика и Техническая Физика.* (1983) 95–98.
- [116] Д.Г. Пажи, В.С. Галустов, Основы техники распыливания жидкостей, *М. Химия.* 254 (1984).
- [117] P.A. Strizhak, R.S. Volkov, G. Castanet, F. Lemoine, O. Rybdylova, S.S. Sazhin, Heating and evaporation of suspended water droplets: Experimental studies and modelling, *Int. J. Heat Mass Transf.* 127 (2018) 92–106. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.103.
- [118] S.K. Pawar, F. Henrikson, G. Finotello, J.T. Padding, N.G. Deen, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M.H. Kuipers, An experimental study of droplet-particle collisions, *Powder Technol.* 300 (2016) 157–163. doi:10.1016/j.powtec.2016.06.005.
- [119] L.-P. Hsiang, G.M. Faeth, Drop properties after secondary

breakup, *Int. J. Multiph. Flow.* 19 (1993) 721–735. doi:[https://doi.org/10.1016/0301-9322\(93\)90039-W](https://doi.org/10.1016/0301-9322(93)90039-W).

[120] Y. Suzuki, T. Harada, H. Watanabe, M. Shoji, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets, *Proc. Combust. Inst.* 33 (2011) 2063–2070. doi:[10.1016/j.proci.2010.05.115](https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.115).

[121] K. Sun, P. Zhang, C.K. Law, T. Wang, Collision Dynamics and Internal Mixing of Droplets of Non-Newtonian Liquids, *Phys. Rev. Appl.* 4 (2015) 54013. doi:[10.1103/PhysRevApplied.4.054013](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.4.054013).

[122] S. Chen, P. Bartello, M.K. Yau, P.A. Vaillancourt, K. Zwijssen, Cloud droplet collisions in turbulent environment: Collision statistics and parameterization, *J. Atmos. Sci.* 73 (2016) 621–636. doi:[10.1175/JAS-D-15-0203.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0203.1).

[123] M. Liu, D. Bothe, Numerical study of head-on droplet collisions at high Weber numbers, *J. Fluid Mech.* 789 (2016) 785–805. doi:[10.1017/jfm.2015.725](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.725).

[124] M. V Piskunov, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, Experimental research into collisions of homogeneous and multi-component liquid droplets, *Chem. Eng. Res. Des.* 150 (2019) 84–98. doi:[10.1016/j.cherd.2019.07.030](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.07.030).

[125] C. Rabe, J. Malet, F. Feuillebois, Experimental investigation of water droplet binary collisions and description of outcomes with a symmetric Weber number, *Phys. Fluids*. 22 (2010) 47101. doi:[10.1063/1.3392768](https://doi.org/10.1063/1.3392768).

[126] M. Sommerfeld, M. Kuschel, Modelling droplet collision outcomes for different substances and viscosities, *Exp. Fluids*. 57 (2016) 187. doi:[10.1007/s00348-016-2249-y](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2249-y).

[127] J. Li, Macroscopic model for head-on binary droplet collisions in a gaseous medium, *Phys. Rev. Lett.* 117 (2016). doi:[10.1103/PhysRevLett.117.214502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.214502).

[128] V.A. Arkhipov, I.M. Vasinin, V.F. Trofimov, A.S. Usanina,

Stability of dispersed-particle shape at small Reynolds numbers, *Fluid Dyn.* 48 (2013) 143–150. doi:10.1134/S0015462813020026.

[129] M.C. Yuen, L.W. Chen, Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.* 21 (1978) 537–542. doi:10.1016/0017-9310(78)90049-2.

[130] W.E. Ranz, W.R. Marshall, Evaporation from drops: Part 2, *Chem. Eng. Prog.* 48 (1952) 173–180.

[131] H. Fujimoto, A.Y. Tong, H. Takuda, Interaction phenomena of two water droplets successively impacting onto a solid surface, *Int. J. Therm. Sci.* 47 (2008) 229–236. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.02.006.

[132] N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, R.S. Volkov, Collision Behavior of Heterogeneous Liquid Droplets, *Microgravity Sci. Technol.* (2019). doi:10.1007/s12217-019-9702-5.

[133] S.K. Pawar, F. Henrikson, G. Finotello, J.T. Padding, N.G. Deen, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M.H. Kuipers, An experimental study of droplet-particle collisions, *Powder Technol.* 300 (2016) 157–163. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.005.

[134] S. Lin, B. Zhao, S. Zou, J. Guo, Z. Wei, L. Chen, Impact of viscous droplets on different wettable surfaces: Impact phenomena, the maximum spreading factor, spreading time and post-impact oscillation, *J. Colloid Interface Sci.* 516 (2018) 86–97. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.12.086.

[135] D. Li, X. Duan, Numerical analysis of droplet impact and heat transfer on an inclined wet surface, *Int. J. Heat Mass Transf.* 128 (2019) 459–468. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.025.

[136] C.E. Clavijo, J. Crockett, D. Maynes, Hydrodynamics of droplet impingement on hot surfaces of varying wettability, *Int. J. Heat Mass Transf.* 108 (2017) 1714–1726. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.076.

[137] S. Sen, V. Vaikuntanathan, D. Sivakumar, Impact dynamics of alternative jet fuel drops on heated stainless steel surface, *Int. J. Therm. Sci.* 121 (2017) 99–110. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.006.

- [138] J. Philippi, P.-Y. Lagrée, A. Antkowiak, Drop impact on a solid surface: short-time self-similarity, *J. Fluid Mech.* 795 (2016) 96–135. doi:10.1017/jfm.2016.142.
- [139] I. V Roisman, J. Breitenbach, C. Tropea, Thermal atomisation of a liquid drop after impact onto a hot substrate, *J. Fluid Mech.* 842 (2018) 87–101. doi:10.1017/jfm.2018.123.
- [140] J. Senda, T. Kanda, M. Al-Roub, P. V. Farrell, T. Fukami, H. Fujimoto, Modeling Spray Impingement Considering Fuel Film Formation on the Wall, *SAE Tech. Pap.* (1997). doi:10.4271/970047.
- [141] H. Fujimoto, S. Yoshimoto, K. Takahashi, T. Hama, H. Takuda, Deformation behavior of two droplets successively impinging obliquely on hot solid surface, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 81 (2017) 136–146. doi:https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.10.009.
- [142] E.-S.R. Negeed, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, Effect of the surface roughness and oxidation layer on the dynamic behavior of micrometric single water droplets impacting onto heated surfaces, *Int. J. Therm. Sci.* 70 (2013) 65–82. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.03.004.
- [143] Deendarlianto, Y. Takata, M. Kohno, S. Hidaka, T. Wakui, A.I. Majid, H.Y. Kuntoro, Indarto, A. Widyaparaga, The effects of the surface roughness on the dynamic behavior of the successive micrometric droplets impacting onto inclined hot surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.* 101 (2016) 1217–1226. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.132.
- [144] P.K. Unnikrishnan, V. Vaikuntanathan, D. Sivakumar, Impact dynamics of high Weber number drops on chemically modified metallic surfaces, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 459 (2014) 109–119. doi:https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.06.027.
- [145] E.-S.R. Negeed, M. Albeirutty, Y. Takata, Dynamic behavior of micrometric single water droplets impacting onto heated surfaces with TiO₂ hydrophilic coating, *Int. J. Therm. Sci.* 79 (2014) 1–17. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.12.011.

- [146] Š. Šikalo, C. Tropea, E.N. Ganić, Impact of droplets onto inclined surfaces, *J. Colloid Interface Sci.* 286 (2005) 661–669. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.050>.
- [147] I. Roisman, Inertia dominated drop collisions. II. An analytical solution of the Navier–Stokes equations for a spreading viscous film, *Phys. Fluids*. 21 (2009) 52104. doi:10.1063/1.3129283.
- [148] E. Mura, R. Calabria, V. Califano, P. Massoli, J. Bellettre, Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 56 (2014). doi:10.1016/j.expthermflusci.2013.11.020.
- [149] D. Antonov, J. Bellettre, D. Tarlet, P. Massoli, O. Vysokomornaya, M. Piskunov, Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets, *Energies*. 11 (2018). doi:10.3390/en11123307.
- [150] S. Mandato, E. Rondet, G. Delaplace, A. Barkouti, L. Galet, P. Accart, T. Ruiz, B. Cuq, Liquids' atomization with two different nozzles: Modeling of the effects of some processing and formulation conditions by dimensional analysis, *Powder Technol.* 224 (2012) 323–330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.014>.
- [151] L. Juslin, O. Antikainen, P. Merkkü, J. Yliruusi, Droplet size measurement: I. Effect of three independent variables on droplet size distribution and spray angle from a pneumatic nozzle, *Int. J. Pharm.* 123 (1995) 247–256. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-5173\(95\)00081-S](https://doi.org/10.1016/0378-5173(95)00081-S).
- [152] I.S. Voitkov, R.S. Volkov, A.O. Zhdanova, G. V Kuznetsov, V.E. Nakoryakov, Physicochemical Processes in the Interaction Of Aerosol with the Combustion Front of Forest Fuel Materials, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 59 (2018) 891–902. doi:10.1134/S0021894418050176.
- [153] A.E. Ashikhmin, M. V Piskunov, V.A. Yanovskii, Hydrodynamic Regimes of Interaction between a Droplet of Water-in-Diesel Microemulsion and a Horizontal Heated Wall, *Tech. Phys. Lett.* 45 (2019) 544–548. doi:10.1134/S1063785019060038.

- [154] H.H. Kim, Y.H. Park, K. Han, J.H. Jang, H.Y. Park, Y.S. Seo, Combustion and emission characteristics of a reprocessed used lubricating oil as a renewable fuel for boiler cold start-up operation, *Energy*. 222 (2021) 119784. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119784>.
- [155] V.E. Nakoryakov, R.S. Volkov, G. V Kuznetsov, P.A. Strizhak, Explosive Decay of Emulsion Drops Based on Water and Oil Products under Conditions of High-Temperature Purification of Liquids, *Dokl. Phys.* 63 (2018) 462–466. doi:[10.1134/S1028335818110101](https://doi.org/10.1134/S1028335818110101).
- [156] R.S. Volkov, P.A. Strizhak, Motion of water droplets in the counter flow of high-temperature combustion products, *Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung*. 54 (2018) 193–207. doi:[10.1007/s00231-017-2121-5](https://doi.org/10.1007/s00231-017-2121-5).
- [157] I. Voytkov, R. Volkov, P. Strizhak, Reducing the flue gases temperature by individual droplets, aerosol, and large water batches, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 88 (2017) 301–316. doi:<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.06.009>.
- [158] F. Fathinia, M. Khiadani, Y.M. Al-Abdeli, A. Shafieian, Performance improvement of spray flash evaporation desalination systems using multiple nozzle arrangement, *Appl. Therm. Eng.* 163 (2019) 114385. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114385>.
- [159] C. Tang, M. Qin, X. Weng, X. Zhang, P. Zhang, J. Li, Z. Huang, Dynamics of droplet impact on solid surface with different roughness, *Int. J. Multiph. Flow*. 96 (2017) 56–69. doi:[10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.07.002).
- [160] A.M. Ithnin, H. Noge, H.A. Kadir, W. Jazair, An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study, *J. Energy Inst.* 87 (2014) 273–288. doi:[10.1016/j.joei.2014.04.002](https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.04.002).
- [161] A. V Demidovich, S.S. Kropotova, M. V Piskunov, N.E. Shlegel, O. V Vysokomornaya, The impact of single-and multicomponent liquid drops on a heated wall: Child droplets, *Appl. Sci.* 10 (2020). doi:[10.3390/app10030942](https://doi.org/10.3390/app10030942).
- [162] Y. Solomatin, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, Atomization of

promising multicomponent fuel droplets by their collisions, *Fuel*. 255 (2019) 115751. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115751>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Перечень основных публикаций по теме диссертации

1. Solomatin Y. S., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Secondary atomization of firefighting liquid droplets by their collisions // *Atomization and Sprays*, 2019, Vol. 29 - №. 5, p. 429-454.
2. Shlegel N. E., Strizhak P. A., Volkov R. S. Collision Behavior of Heterogeneous Liquid Droplets // *Microgravity Science and Technology*, 2019, Vol. 31, p. 1-17.
3. Shlegel N. E., Strizhak P. A., Tarlet D., Bellettre J. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, Vol. 108, Article number 104329, p. 1-11.
4. Piskunov M. V., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Disruption of colliding liquid droplets with different surface geometries // *Powder Technology*, 2019, Vol. 355, p. 526-534
5. Kuznetsov G. V., Shlegel N. E., Solomatin Y. S., Strizhak P. A. Combined techniques of secondary atomization of multi-component droplets // *Chemical Engineering Science*, 2019, Vol. 209, Article number 115199. p. 1-17.
6. Solomatin Y. S., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions // *Fuel*, 2019, Vol. 255, Article number 115751, p. 1-15.
7. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Recovery of waste-derived and low-grade components within fuel slurries // *Energy*, 2019, Vol. 183, p. 1266-1277.
8. Nyashina G. S., Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Effective incineration of fuel-waste slurries from several related industries // *Environmental Research*, 2019, Vol. 176, Article number 108559, p. 1-13.
9. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Relative combustion efficiency of composite fuels based on of wood processing and oil production wastes // *Energy*, 2019, Vol. 169, p. 18-28.

10. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: Experimental study // *Fuel*, 2019, Vol. 238, p. 275-288.
11. Piskunov M. V., Shlegel N. E., Strizhak P. A., Volkov R. S. Experimental research into collisions of homogeneous and multi-component liquid droplets // *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, Vol. 150, p. 84-98.
12. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Promising components of waste-derived slurry fuels // *Journal of the Energy Institute*, 2020, Vol. 93 - №. 5, p. 2044-2054.
13. Piskunov M. V., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Effects of target and projectile parameters on collision characteristics of water droplets // *Atomization and Sprays*, 2020, Vol. 30 - №. 3, p. 171-187.
14. Shlegel N. E., Solomatin Y. S., Strizhak P. A. Experimental research into the characteristics of child droplets formed due to collisions of liquid fragments in a gas // *Powder Technology*, 2020, Vol. 363. p. 122-134.
15. Antonov D.V., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Secondary atomization of gas-saturated liquid droplets as a result of their collisions and micro-explosion// *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, 162, p. 200–211
16. Shlegel N. E., Tkachenko P. P., Strizhak P. A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions // *Chemical Engineering Science*, 2020, Vol. 220, Article number 115639, p. 1-13.
17. Antonov D. V., Shlegel N. E., Strizhak P. A., Tarlet D., Bellettre J. Energy analysis of secondary droplet atomization schemes // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, Vol. 116, Article number 104666, p. 1-10.
18. Tkachenko P.P., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Collisions of water droplets in the high-temperature air// *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 170, 121011

19. Tkachenko P.P., Shlegel N.E., Volkov R.S., Strizhak P.A. Experimental study of miscibility of liquids in binary droplet collisions// Chemical Engineering Research and Design, 2021, 168, p. 1–12
20. Shlegel N. E., Strizhak P. A. Collisions Of Water Drops In A Gas-Vapor Environment At High Temperatures And Vapor Concentrations // Thermal Science, 2021, 25 (5), pp. 3441-3451.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Перечень научных мероприятий, на которых
выполнена апробация результатов диссертационных исследований**

1. XV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2018).
2. XXIII Международном симпозиуме имени М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2019).
3. XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам «ВМСППС 2019» (Алушта, 2019).
4. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019).
5. III Международная конференция «Современные проблемы Теплофизики и Энергетики» (Москва, 2020).
6. Всероссийская научно-техническая конференция «Энергия 2021» (Иванова, 2021).
7. XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках" (Екатеринбург, 2021).
8. VIII Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2021).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акты об использовании результатов диссертационных исследований



А К Т

о практическом использовании диссертационной работы
Шлегель Никиты Евгеньевича

В результате рассмотрения материалов и результатов диссертационной работы Шлегель Н.Е. «Комбинированные схемы вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в камерах энергетических установок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, комиссией в составе Каменского Д.Е., главного инженера, Морозова В.П., начальника электротехнической лаборатории, был составлен настоящий акт, свидетельствующий о следующем:

- результаты диссертационной работы Шлегель Н.Е. признаны актуальными, полезными с практической точки зрения для развития процессов распыления жидких и композиционных топлив в топках паровых и водогрейных котлов;
- полученные графические и аппроксимационные выражения были использованы при выборе энергоэффективных режимов работы энергоблоков, имеющих в распоряжении ОАО «БЕЛОВСКОЕ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЕ»;
- сформулированные в диссертационной работе выводы использованы в виде практических рекомендаций соответствующим подразделением ОАО «БЕЛОВСКОЕ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЕ» с целью улучшения технологий топливоподготовки и подачи жидкого и композиционного топлива в топках паровых и водогрейных котлов.

Члены комиссии:

Д.Е. Каменский

В.П. Морозов

УТВЕРЖДАЮ

и.о. проректора по науке

д.т.н.

Степанов И.Б.

« 04 » 10 2021 г.

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы

Шлегеля Никиты Евгеньевича

«Комбинированные схемы вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в камерах энергетических установок» при выполнении научных проектов, реализуемых сотрудниками Томского политехнического университета при поддержке Российского научного фонда

Представленные в диссертационной работе аспиранта Шлегель Никиты Евгеньевича результаты экспериментальных и теоретических исследований заслуживают внимания и использованы при проектировании и создании группы экспериментальных стендов, размещенных в Лаборатории тепломассопереноса ИШЭ ТПУ. Особый интерес, по мнению сотрудников НИ ТПУ, представляют методики и результаты экспериментальных исследований основных особенностей и механизмов вторичного измельчения капель композиционных и жидких топлив.

Настоящий акт подтверждает, что выводы и практические рекомендации, приведенные в диссертационной работе «Комбинированные схемы вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в камерах энергетических установок» аспиранта Шлегель Никиты Евгеньевича, используются для реализации проектов РНФ 21-71-10008 (НИР ТПУ 19.0037.РНФ.2021) «Исследование компонентного состава и интегральных характеристик вторичных фрагментов при слиянии и распаде капель жидкости в газовой среде» (2021–2024 гг.), РНФ 18-71-10002-П (НИР ТПУ 2.0032.РНФ.2021) «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах» (2018–2023 гг.):

- данные об условиях применения методов высокоскоростной видеорегистрации быстропотекающих процессов при проведении экспериментальных исследований механизмов вторичного измельчения капель композиционных и жидких топлив в камерах сгорания;
- разработанные и собранные экспериментальные стенды, позволяющие реализовывать схемы вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив, такие как: соударение капель между собой, с твердой преградой, воздействие на каплю воздушным потоком воздуха и микро-взрывное измельчение;
- полученные при выполнении диссертационного исследования сведения о характеристиках измельчения жидких и композиционных топлив позволили определить оптимальные схемы для вторичной фрагментации различных по вязкости и поверхностному натяжению капель топлив.

В рамках научного проекта РНФ 18-71-10002 за период с 2018 г. по 2021 г. опубликованы более 10 совместных статей в международных журналах Q1 (International Communications in Heat and Mass Transfer, Powder Technology, Chemical Engineering Science, Fuel, Energy и др.), индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

Руководитель проекта РНФ 18-71-10002-п

д.ф.-м.н., профессор, профессор ТПУ

Руководитель проекта РНФ 21-71-10008

к.т.н., доцент ТПУ

04.10.2021

Стрижак П.А.

Волков Р.С.

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИШЭ ТПУ

К.Т.Н., доцент

Матвеев А.С.

« 15 » 04 2021 г.

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы

Шлегеля Никиты Евгеньевича

«Комбинированные схемы вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив в камерах энергетических установок» в образовательном процессе, реализуемом сотрудниками

Научно-образовательного центра

И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики НИ ТПУ

Представленные в диссертационной работе аспиранта Шлегеля Никиты Евгеньевича результаты экспериментальных и теоретических исследований заслуживают внимания и приняты к рассмотрению в качестве рекомендаций по усовершенствованию технологий сжигания жидких топлив в распыленном виде. Особый интерес, по мнению сотрудников НОЦ И.Н. Бутакова, представляют результаты экспериментальных исследований основных особенностей и механизмов вторичного измельчения капель композиционных жидких топлив.

Разработана комбинация схем вторичного измельчения капель топливных композиций, которая позволяет увеличить эффективность распыления. Проведенный технико-экономический анализ позволили установить, что вторичное измельчение капель существенно выгоднее с экономической точки зрения по сравнению с первичным измельчением.

Настоящий акт подтверждает, что выводы и практические рекомендации, приведенные в диссертационной работе аспиранта Шлегеля Н.Е., используются при разработке образовательных курсов с целью обучения студентов и магистрантов ресурсоэффективным системам и энергоэффективным технологиям сжигания композиционных топлив в соответствующих камерах и установках. В частности, при разработке лекционных курсов и учебно-методических материалов для ведения дисциплин в рамках магистерских профилей автоматизации теплоэнергетических процессов и экологически чистых технологий использованы:

- данные об условиях применения методов высокоскоростной видеорегистрации быстротекающих процессов при проведении экспериментальных исследований механизмов вторичного измельчения капель композиционных жидких топлив в камерах сгорания;

- комбинация схем вторичного измельчения капель композиционных топлив для достижения наибольшей площади испарения вторичных фрагментов, минимального времени зажигания, снижения антропогенных выбросов и пр.;
- рекомендации по внедрению схем комбинированного вторичного измельчения при эксплуатации тепломассообменного оборудования.

Целесообразно также отметить, что результаты диссертационных исследований стали основанием для актуализации содержания дисциплины «Методология экспериментальных исследований теплоэнергетических процессов», направленной на обучение современным экспериментальным методикам магистрантов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», что подтверждается опубликованием методических указаний к выполнению лабораторных работ по указанной дисциплине.

В.И.В. Руководитель НОЦ И.Н. Бутакова
д.т.н., профессор

М.А.А. *Татлашова Т.С.*
Заворин А.С.