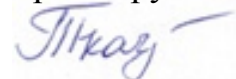


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Ткаченко Павел Петрович

2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук, профессор
Стрижак Павел Александрович

Томск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖУЩИХСЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ	14
1.1. Типичные параметры работы тепломассообменных установок	14
1.2. Вторичное измельчение капель и струй жидкости.....	22
1.3. Влияние свойств жидкости на последствия столкновений капель и струй .	24
1.4. Взаимодействие капель воды с твердыми стенками	28
1.5. Разделение компонентов газопарокапельных потоков	33
Выводы по первой главе.....	38
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	40
2.1. Параметры работы энергетического оборудования с газопарокапельными потоками.....	40
2.2. Бинарное взаимодействие капель жидкостей и твердых частиц при нормальных условиях	41
2.3. Соударения капель жидкостей и твердых частиц при варьировании температуры и давления газовой среды.....	55
2.4. Соударения капель жидкостей и твердых частиц в спреях	59
2.5. Выбор составов для изучения влияния вязкости и поверхностного натяжения жидкости на характеристики взаимодействия капель	63
Выводы по второй главе.....	67

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	69
3.1. Бинарные соударения капель жидкостей в энергетическом оборудовании.....	69
3.2. Взаимодействие капель жидкостей с твердыми частицами в энергетическом оборудовании.....	87
3.3. Перемешивание и разделение компонентов жидкостей при соударении капель и частиц.....	108
3.4. Коллективные эффекты при соударении капель жидкостей и твердых частиц	129
3.5. Влияние условий, характерных теплообменному оборудованию, на соударения капель жидкостей и твердых частиц	151
3.6. Изменение дисперсности газопарокапельных сред в элементах топливного цикла	176
3.7. Рекомендации по использованию результатов исследований для повышения эффективности энергетического оборудования с газопарокапельными потоками.....	186
Выводы по третьей главе.....	194
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	199
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	203
ЛИТЕРАТУРА	205
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Основные публикации по теме диссертации.....	227
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Перечень научных конференций, на которых выполнена апробация результатов диссертационных исследований.....	228
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Заявки на патенты РФ	230

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Перечень проектов, в рамках которых получены результаты диссертационных исследований	231
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Материалы об использовании результатов диссертационных исследований	232

ВВЕДЕНИЕ

Изучению интенсификации теплообменных и физико-химических процессов и фазовых превращений за последние 50 лет посвящено большое количество работ российских и зарубежных исследователей, в частности [1–3]. Область практического применения газопарокапельных смесей [4–6] включает борьбу с природными и техногенными пожарами, химическую и нефтяную промышленность, теплообменное оборудование и др. [7–10]. Большой интерес вызывает их применение в системах впрыска топлива в двигателях внутреннего сгорания и котельных агрегатах. В условиях ограниченности водных ресурсов актуальна область термической очистки воды. В теплоэнергетике подобные процессы протекают в градирнях, деаэраторах, смешивающих подогревателях, испарителях, гравитационных и гидравлических классификаторах, пылеулавливающих установках и других теплообменных аппаратах [11].

При очистке газов, содержащих частицы несгоревшего топлива, золу или пыль, применяются различные способы осаждения твердых частиц [12–14]: сухая и мокрая очистка, фильтры и электрофильтры. К одному из наиболее эффективных способов очистки газов относится мокрая очистка, предполагающая пропускание потока дымовых газов через распыляемую воду [15,16] или барботирование через слой воды [17–19]. Такой способ является наиболее эффективным для улавливания частиц размерами 0,3-1 мкм [20,21]. Для улавливания более мелких частиц размером (менее 0,1 мкм) используются электрофильтры [22,23]. Они не применимы для осаждения крупных витающих частиц. Эффективность мокрого способа очистки газов может быть снижена из-за повторного выделения твердых частиц в атмосферу. Одной из причин этого является эффект столкновения капель, содержащих твердые частицы на высокой скорости. Повышенную эффективность в очистке дымовых газов демонстрируют уловители твердых частиц с трубками Вентури. В таких конструкциях поток

уходящих газов орошается водой из форсунок, установленных радиально или тангенциально потоку. Таким способом, можно достигнуть степени очистки уходящих газов выше 0,99. Существенным недостатком любых фильтров и пылеуловителей, к которым относятся вышеперечисленные тепло- и массообменные установки, является увеличение гидродинамического сопротивления потоку от 6 до 12 кПа. В связи с этим возникает необходимость настройки режимов работы установок производства, преобразования и потребления энергии для улавливания максимального объема твердых частиц в газах при снижении сопротивления. Кроме этого, существенным недостатком мокрого пылеулавливания является образование шламосодержащих стоков. Эти стоки также необходимо очищать и обезвреживать перед доставкой к месту захоронения. Высокую эффективность в очистке промышленных стоков показал термический способ. Для повышения его коэффициента полезного действия также целесообразно использовать вторичное измельчение капель за счет их соударения друг с другом. Таким образом, изучение агломерирования и разделения компонентов суспензий при соударении капель и частиц в энергетическом оборудовании представляет значительный интерес для решения задач интенсификации процессов тепло- и массопереноса в системах и установках, использующих тепло, оптимизации параметров тепловых технологических процессов и разработки оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах.

Целью диссертационной работы является определение характеристик и условий агломерирования и разделения компонентов суспензий при соударении капель и частиц в энергетическом оборудовании для решения задач интенсификации процессов тепломассопереноса и фазовых превращений в энергетическом оборудовании.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики, создание стендов, планирование и проведение исследований взаимодействия движущихся капель жидкостей в газовой среде с разной температурой и влажностью.
2. Выбор характеристик жидкости и газовой среды, методик и систем для приготовления водных растворов, эмульсий, суспензий с обеспечением варьирования их свойств в диапазонах, соответствующих энергетическим установкам.
3. Изучение закономерностей взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц для стабильной реализации требуемых режимов взаимодействия (отскок, коалесценция, разлет, дробление) и определение критических значений безразмерных чисел для каждого режима.
4. Регистрация и вычисление интегральных характеристик вторичных фрагментов жидкости после взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц.
5. Установление влияния основных параметров (температура, относительная скорость, угол атаки, компонентный состав, форма и концентрация капель жидкостей в аэрозольном потоке) на режимы взаимодействия капель и частиц, а также вторичные фрагменты жидкости.
6. Исследование влияния процессов взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц на характеристики и условия теплообмена.
7. Разработка способов формирования газопарокапельных потоков с заданным компонентным составом при отдельной подаче твердых и жидких компонентов с разными параметрами внешней газовой среды.
8. Формулирование рекомендаций по практическому применению результатов исследований для повышения эффективности работы энергетических установок и систем.

Научная новизна работы. Разработана методика экспериментального исследования взаимодействия движущихся капель жидкостей и твердых частиц в газовой среде с варьируемой температурой, давлением и влажностью. При

проведении экспериментов использовалась методика, включающая применение оптических методов («Particle Image Velocimetry» и «Interferometric Particle Imaging»). Установлены параметры (критические значения чисел Вебера, Онезорге, Рейнольдса, капиллярности, углы атаки, скорости движения и др.), необходимые для реализации четырех режимов взаимодействия (отскок, коалесценция, разлет и дробление) капель жидкостей между собой и с твердыми частицами. Эксперименты проведены на стендах с параметрами, близкими к условиям работы теплоэнергетического оборудования. Получены аппроксимационные выражения для прогнозирования характеристик газопарокапельных потоков с учетом совокупности соударений капель и частиц.

Практическая значимость работы. Полученные экспериментальные данные, аппроксимационные выражения и теоретические положения представляют основу для разработки и создания теплотехнических систем, работающих с многокомпонентными и многофазными потоками. Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при параметрической оптимизации тепловых технологических процессов и разработке новых и совершенствовании известных установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества производимой продукции. Результаты исследований (карты режимов, функциональные связи выходных характеристик с входными параметрами, математические выражения, запатентованные технологические решения) целесообразно использовать при разработке и оптимизации параметров работы капельно-струйных оросителей, эжекционных градирен, деаэраторов и других теплотехнических установок и систем.

Степень достоверности полученных в ходе экспериментальных исследований результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных значениях основных параметров, использованием малоинерционных и высокоточных оптических

методов и программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными следствиями других авторов.

Связь работы с научно-образовательными программами и грантами.

Диссертационные исследования агломерирования и разделения компонентов суспензий при соударении капель жидкостей и твердых частиц в смешивающих устройствах выполнены при поддержке гранта РФ (Проект № 18–19–00056), их взаимодействия в режимах отскока, коалесценция, разлета и дробления с интенсификацией тепломассопереноса в камерах сгорания, реакторах, теплообменном оборудовании – при поддержке гранта РФ (№ 18–71–10002, № 18–71–10002П), изучение компонентного состава и интегральных характеристик вторичных фрагментов при слиянии и распаде капель жидкостей – в рамках проекта РФ № 21-71-10008.

Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям 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 федерального уровня, получившей высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»). Результаты диссертационных исследований использованы в образовательных программах НИ ТПУ для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника». На основе методики экспериментальных исследований составлены методические указания для проведения лабораторных работ по дисциплине «Методология экспериментальных исследований теплоэнергетических процессов».

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Вторичное измельчение капель за счет взаимодействия газопарокапельных струй и потоков твердых частиц способствует повышению площади испарения технологических жидкостей в несколько раз. Отношение площади поверхности

теплообмена жидкости в системах, генерирующих тепло, после и до соударений капель увеличивается в 1,2-4 раза.

2. Режим устойчивой агломерирования капель жидкостей с твердыми частицами при отношении их размеров от 0,5 до 1,5 в диапазоне значений числа Вебера от 50 до 100 реализуется при изменении вязкости жидкости от 1,0 мПа·с до 6,3 мПа·с и поверхностного натяжения от 36,1 мН/м до 72,7 мН/м. Рабочие жидкости для систем, генерирующих тепло, в частности, топлива, очистные растворы, растворительные эмульсии имеют свойства, соответствующие данным диапазонам.

3. Применение бесконтактных оптических методик с флуорофорами позволило обосновать, что за счет соударения капель жидкостей обеспечивается их смешение с получением фрагментов, содержащих требуемое соотношение объемов компонентов исходных капель. При изучении соударения капель технологических жидкостей, типичных теплоэнергетическим системам, определены режимы агломерирования с получением двух-, трех- и многокомпонентных капель.

4. Аэрозольные потоки претерпевают значительные изменения по составу капель и частиц при их движении в энергетических установках. В частности, при перемещении родительских капель в газовой среде с температурой от 20 °С до 500 °С их размеры меняются в несколько раз за счет интенсификации теплообмена, фазовых превращений и соударений. В завихрительных системах и охладительных блоках можно снизить продолжительность технологических циклов на 3-7 %.

5. Интегральные характеристики вторичных жидкостных фрагментов, полученных при соударении исходных капель и частиц, в случае варьирования давления от 0,09 до 0,5 МПа изменяются на 9–25 %, а температуры газовой среды от 20 до 700 °С – в 4–5 раз. Соответствующие эффекты позволяют повысить характеристики работы энергетических установок на 4-11 %.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментальных исследований, проведении серии опытов, обработке результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций использования полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные результаты, сформулированные положения и теоретические следствия диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: V Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2017), Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2018, 2019), III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020), XXXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (Балашиха, 2020), IX Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2020), XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России «Наука. Технологии. Инновации.» (Новосибирск, 2021), Всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ» (Иваново, 2021, 2022), Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках (Москва, 2021), XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2022), Восьмая Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2022), Внутренняя научно-практическая конференция молодых специалистов Уренгойского газопромыслового управления, посвященная 45-летию с даты образования ООО «Газпром добыча Уренгой» (Новый Уренгой, 2023), I Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика» (Красноярск, 2023), XXIV школа семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика

РАН А.И. Леонтьева, посвященная 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Казань, 2023), Всероссийская конференция с международным участием и элементами научной школы для молодых учёных «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2023).

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 22 печатных работах, в том числе 14 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Powder Technology» (Q1, ИФ=5,64), Defence Technology (Q1, ИФ=5,1), «Thermal Science and Engineering Progress» (Q1, ИФ=4,56), «International Journal of Heat and Mass Transfer» (Q1, ИФ=5,43), «Chemical Engineering Science» (Q1, ИФ=4,89), «Fuel» (Q1, ИФ=8,04) и др. Подготовлены две заявки на патенты: «Способ получения композиционного топлива», «Установка для изучения вторичного измельчения капель топлива».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 237 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков, 12 таблиц, 5 приложений. Библиография включает 230 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, обоснована их связь с научно-образовательными программами и грантами, выделен личный вклад автора диссертации.

В первой главе проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия движущихся капель жидкостей и твердых частиц в газовой среде с разной температурой и влажностью. Приведено описание направлений изучения движения капель и жидкостных массивов, взаимодействия капель между собой, с нагретыми твердыми стенками,

аэрозольных потоков и струй. Определены основные параметры, оказывающие влияние на режимы столкновений капель (температура жидкости и газовой среды, относительная влажность, давление, вязкость и поверхностное натяжение жидкости, скорость движения капель, угол взаимодействия). Обосновано отсутствие результатов экспериментального определения их комплексного влияния на движение капель жидкостей в газовой среде и их вторичное дробление. Выделены условия и системы, для которых в энергетических приложениях характерны интенсивные взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц. Показано, что эти взаимодействия могут существенно менять характеристики работы теплообменного оборудования.

Во второй главе приведено описание разработанных автором диссертации экспериментальных стендов и методик исследований, а также методов оценки погрешностей результатов измерений. Выполнено сравнение результатов и стендов с известными данными других авторов для обоснования адекватности разработанных методик исследований.

В третьей главе приведены результаты исследования движения капель жидкостей в газовой среде с разной температурой и влажностью. Установлены особенности взаимодействия капель при варьировании параметров жидкости и газовой среды, скорости движения капель и углов взаимодействия.

Получены зависимости отношения площади жидкости после и до взаимодействия, количественный и компонентный состав массивов вторичных фрагментов жидкости, полученных при взаимодействии капель. Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов в теплоэнергетике, а также развитию сформулированных теоретических следствий.

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

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖУЩИХСЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

1.1. Типичные параметры работы тепломассообменных установок

В настоящее время смешивающие теплообменные аппараты нашли широкое применение в промышленности. Тепломассообмен в таких установках реализуется без каких-либо разделительных элементов между теплоносителями. К смешивающим теплообменным аппаратам относятся [24–26]: кондиционеры, скрубберы, градирни, конденсаторы, деаэраторы, барботажные устройства и смешивающие подогреватели. Интерес к данной теме проявляется и в пищевой промышленности [27], где используются вакуумные сушильные камеры [28,29]. Схематичное изображение струйно-барботажного деаэратора приведено на рисунке 1.1.

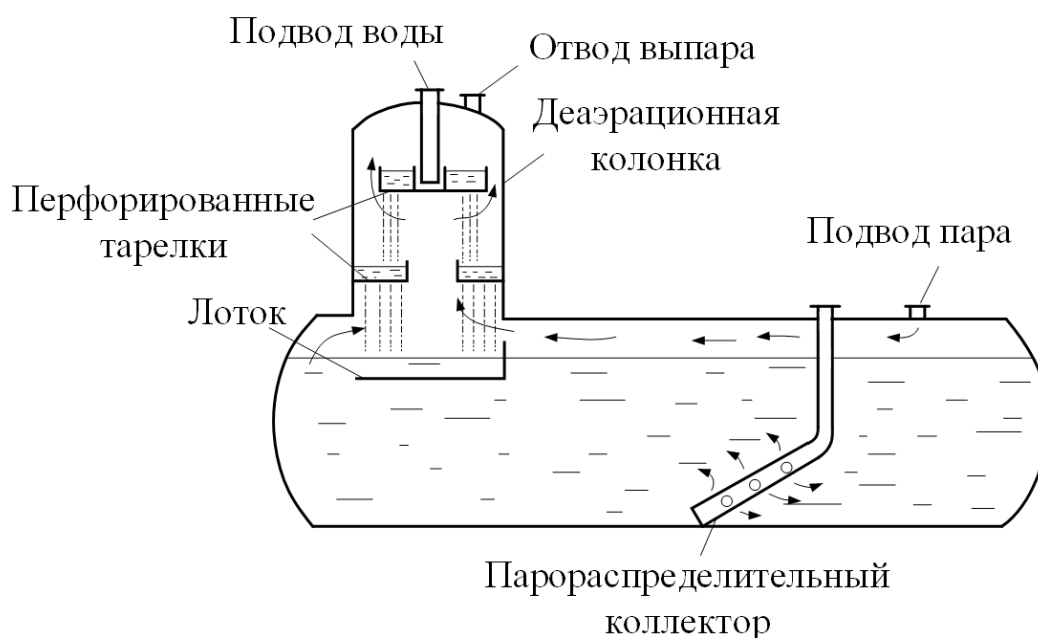


Рисунок 1.1 – Схема струйно-барботажного деаэратора [30]

Деаэраторы питательной воды на ТЭС и АЭС в зависимости от давления пара разделены на три основных группы [11,31]: деаэраторы повышенного давления (ДП) (давление пара 0,6-1,25 МПа, температура воды 130–168 °С); атмосферные деаэраторы (ДА/ДСА) (давление пара 0,12 МПа, температура воды 100–104 °С); вакуумные деаэраторы (ДВ) (давление пара 0,0075-0,05 кПа, температура воды 25–70 °С). Перечисленные виды деаэраторов по способу увеличения площади контакта воды с греющим паром можно разделить на следующие категории [11,31,32]: капельные, струйные, пленочные, с насадками, барботажные, комбинированные. Распыление воды в капельных деаэраторах осуществляется с помощью сопел и форсунок. В струйных деаэраторах вода, подаваемая в верхнюю часть колонки, направляется в водораспределительное устройство, под которыми установлены сита. Проходя через соответствующие дырчатые тарелки поток воды разделяется на струи и образует струйно-капельную завесу, в которую подается греющий пар. Принцип работы пленочных деаэраторов основан на разделении потока воды и ее стеканию по прямоугольным или концентрическим листам. В противоток движению воды, снизу вверх, подается греющий пар. Внутренний объем деаэратора с насадками заполняется деревянными решетками, кольцами Рашига, металлическими и керамическими кольцами и другими объектами специальной формы [33–35]. Перечисленные типы насадок располагаются на поддерживающих ситах или перфорированных металлических листах. Питательная вода подается в верхнюю часть колонки деаэратора и при прохождении через насадки разделяется на тонкие струйки и пленки. Греющий пар в данном типе деаэраторов также подается в нижнюю часть колонки и прогревает стекающую воду по противоточной схеме. В барботажных деаэраторах греющий пар пропускается через слой воды. Такая схема имеет максимальную площадь контакта пара и воды. Однако существенным недостатком барботажных деаэраторов является недостаточное количество теплоты, сообщаемое воде для ее нагрева до температуры насыщения. По этой причине барботаж используют в качестве второй ступени деаэрации совместно со

струйным или насадочным способом разделения воды [11,31,32]. В колонках струйно-барботажных деаэраторах происходит нагрев воды до температуры насыщения и первичное удаление газов. Деаэрация протекает на втором этапе (в баке-аккумуляторе) посредством пропускания пара через весь объем воды [11,31]. Технические характеристики колонок атмосферных деаэраторов и деаэраторов повышенного давления представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.1 – Характеристики деаэрационных колонок КДА [31]

Тип установки	КДА-5	КДА-10	КДА-15	КДА-25	КДА-35	КДА-50	КДА-100
Производительность, т/ч	5	10	15	25	35	50	75
Давление в колонке, МПа	0,12						
Давление греющего пара, МПа	0,5			0,6		0,7	
Температура питательной воды, °С	104,25						
Габаритные размеры, мм							
диаметр	512	512	512	720	1016	1016	1016
высота	2100	2100	2250	2790	2050	2050	2050

Таблица 1.2 – Характеристики деаэрационных колонок КДП [31]

Тип установки	КДП-80	КДП-225	КДП-500	КДП-700	КДП-1000	КДП-2000	КДП-2800
Производительность, т/ч	80	225	500	700	1000	2000	2800
Давление в колонке, МПа	0,12						
Давление греющего пара, МПа	0,5			0,6		0,7	
Температура питательной воды, °С	133-158		164	133	164-181	164	164-167
Габаритные размеры, мм							
диаметр	1000	1800	2000	2400	2400	3400	3400
высота	1600	4000	3670	3400	4730	5070	7170

Одной из основных причин недостаточно эффективной деаэрации подпиточной воды в теплотехническом оборудовании является несоблюдение температурного режима. Подпиточная вода не достигает необходимой температуры. При условии измельчения воды до капель оптимальных размеров

можно повысить эффективность ее нагрева, сохраняя на прежнем уровне или незначительно увеличив потери на выпаре [36,37].

Еще одной категорией промышленных тепловых установок, в которых применяется капельно-струйное орошение, являются градирни [32,38]. Они предназначены для охлаждения технологической воды на промышленных предприятиях, тепловых и атомных электростанциях и теплоэлектроцентралях с помощью атмосферного воздуха [32,38]. По принципу действия градирни разделены на: испарительные (или открытые) и сухие (закрытые). В испарительных градирнях нагретая вода разбрызгивается с помощью сопел и форсунок, смешивается с атмосферным воздухом и охлаждается. При этом часть распыленной воды испаряется и уносится в атмосферу. Подача воздуха в открытых градирнях может быть организована по одной из четырех схем: поперечноточная, противоточная, брызгальная или эжекционная. Охлаждение воды происходит за счет передачи теплоты холодному воздуху и при частичном испарении. В сухих градирнях вода охлаждается только за счет теплопередачи. Их главными преимуществами являются отсутствие капельного уноса, возможность работы на кипящей воде и закрытый контур, который предотвращает попадание примесей в воду. Однако сухие градирни имеют низкую эффективность охлаждения, высокую стоимость конструкции и материалов и требовательны к обслуживанию и чистке теплообменника [38]. Наиболее распространенными типами градирен являются вентиляторные и башенные. В случае башенных градирен необходимы большие капитальные затраты на строительство и ремонт, но при этом они подходят для больших расходов воды и не требуют затрат на электроэнергию при эксплуатации. Вентиляторные градирни имеют меньшие габариты, энергоэффективны и не обмерзают зимой [38,39]. Ограничения их использования обусловлены необходимостью в специально обученном персонале и загрязнением оборотной воды [40]. Для охлаждения воды с высокой температурой применяются эжекционные градирни. В них нет подвижных механических частей, что

упрощает ее эксплуатацию и ремонт [38,41]. Однако для создания необходимого давления в системе требуются большие энергозатраты, что ограничивает применение такого типа градирен. Еще одним недостатком эжекционных градирен является большой капельный унос для борьбы с которым используют водоуловители. При условии решения проблемы больших энергозатрат на распыление воды данный тип градирен может составить конкуренцию башенным и вентиляторным [41]. При определении и достижении эффективных размеров капель воды и соответствующей настройке эжекторов можно снизить капельный унос, снижая таким образом затраты.

В воздушно-капельных градирнях вода подается в верхнюю часть установки к водораспределительному устройству по трубопроводам и далее к разбрызгивающим соплам [38]. Проходя через них, вода разбивается на капли диаметром 2–3 мм и в виде завесы распределяется по всему объему градирни. Для турбулизация потока и увеличения охлаждающего эффекта в градирнях устанавливаются оросители. Навстречу капельному потоку воды подается холодный воздух, затем полученная паровоздушная выходит в атмосферу. Воздушный поток в зависимости от типа градирни создается естественной тягой или с помощью мощного вентилятора, который может устанавливаться в нижней (нагнетательный) или в верхней (отсасывающий) части градирни. Охлажденная вода собирается и накапливается в водосборной емкости (поддон или бетонный бассейн), откуда подается на теплопередающее или теплоиспользующее оборудование [38]. Так как оросители градирен в большинстве случаев изготавливаются из полимера, вентиляторные и башенные градирни имеют ограничение по максимальной температуре охлаждаемой воды. При температуре около 60 °С полимер, из которого изготавливаются оросители, становится мягким и пластичным, что может привести к его деформации и поломке. Однако эжекционные градирни не имеют оросителей и подходят для охлаждения горячей воды.

Активное развитие в последние два десятилетия получили альтернативные источники электроэнергии. К их числу относятся различные виды солнечных электростанций, тепловые насосы и другие установки для получения энергии из низкопотенциальных источников. Для охлаждения и конденсации теплоносителя в таких установках довольно часто используются градирни и различные виды теплообменных аппаратов [42,43]. Одним из способов повышения эффективности и скорости протекания фазовых превращений и химических реакций является измельчение взаимодействующих веществ для увеличения реагирующей площади поверхности [44]. В теплообменных аппаратах для этого используются различного вида насадки, сегментные полки, одно- и многотарельчатые разбрызгиватели и различного вида форсуночные устройства [33,45,46]. Проходящая через перечисленные элементы жидкость разделяется на струи или совокупности капель. Реализуется так называемое первичное измельчение жидкости [44,47].

Вследствие влияния совокупности параметров на процессы измельчения и охлаждения или нагрева жидкости, данная область технологии привлекает большое внимание научных исследователей. Так, например, в [48] экспериментально изучены характеристики теплопереноса в испарительной противоточной градирне с естественной тягой. Схема градирни представлена на рисунке 1.2. Определено влияние скорости движения поперечного потока воздуха (0–1 м/с), расхода (0,1–0,8 м³/ч) и начальной температуры воды (40–60 °С) в градирне на эффективность охлаждения. Наибольшая эффективность охлаждения достигалась при низком расходе воды с высокой температурой. Установлено снижение эффективности охлаждения при значении скорости поперечного потока около 0,48 м/с. После этого значения эффективность охлаждения увеличивалась. Влияние бокового воздушного потока на характеристики противоточной градирни с естественной тягой исследовано в [49]. Изучались параметры: перепад температуры капель, эффективность охлаждения и параметры самой градирни. Эксперименты проводились на модели градирни высотой 150 см. В

экспериментах варьировались температура воды на входе, расход воды и скорость бокового воздушного потока. Наличие потока воздуха позволило увеличить эффективность охлаждения на 4,5 % и разницу температур капель на входе и на выходе на 4 % относительно режима без него. Отмечено, что с увеличением начальной температуры воды на входе увеличивался перепад температур капель. Обосновано, что увеличение расхода привело к снижению перепада температур капель.

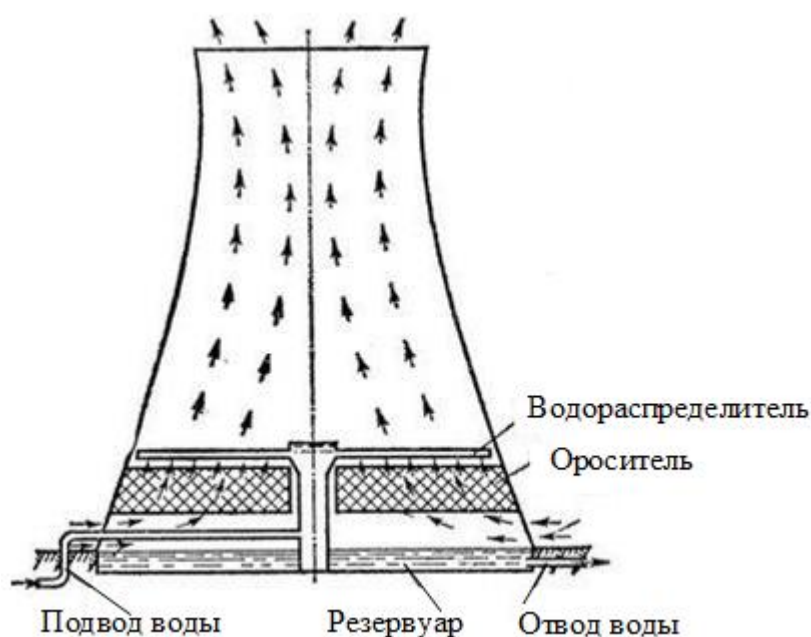


Рисунок 1.2 – Схема испарительной градирни с естественной тягой [30]

Повышение производительности распылительных опреснительных систем являлось целью исследований [30]. Изучалось распыление через форсунку с одним или пятью отверстиями, расположенным на удалении друг от друга на 30 мм или 60 мм. Угол раскрытия форсунок в эксперименте 65° , производительность 2 л/мин, диаметр капель изменялся от 0,28 до 0,41 мм. В начальный момент времени вода имела температуру 70°C . Впрыск воды проводился под давлением от 0,25 до 6 бар, расход жидкости составлял 1,7–17,8 л/мин. Объем впрыскиваемой воды во всех экспериментах составлял около 20 л. Объем испарившейся воды определялся путем измерения объема собранной воды после

распыления. Изменение давления впрыска от 0,25 бар до 6 бар незначительно повлияло на объем испарившейся воды (0,85–1,05 л). Наибольшее влияние на испарение оказало расположение сопел форсунки. Максимальное повышение КПД системы достигло 28 % при максимальном удалении друг от друга отверстий.

Численное моделирование позволяет получить данные о процессах, которые сложно проверить экспериментально. В [50] приведена одномерная модель работы вентиляторной градирни в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Уравнения описывают изменения скоростей капель, их размеров и температуры, и изменение параметров пара. При сравнении результатов, полученных с помощью модели, с экспериментальными данными, расхождения составили не более 3 %. В [50] показано, что тепловой КПД градирни находится в сильной зависимости от отношения высоты падения капли к ее радиусу. Установлено, что температурный профиль воздуха и температура на поверхности накопителя жидкости не могут быть описаны при рассмотрении множества капель. Также установлено, что доля испарившейся воды зависит от давления окружающей среды. В данном случае на испарение уходило до 3 % от массового расхода воды. В [51] с помощью численных методов определено влияние параметров воды и окружающей воздушной среды на процесс фазового перехода. Учтено влияние начальной температуры воды (5–97 °С), температуры (до 1000 °С) и относительной влажности газа (5–35 %), а также процесс нагрева капель. Учитывались также конвективное движение жидкости в капле, нагрев излучением и теплопередача как внутри, так и на границе капель. Предложено уравнение фазового превращения для инженерных расчетов. Полученное уравнение необходимо адаптировать для каждого отдельного случая. Измерение параметров аэрозольных потоков воды для охлаждения в сухой градирне с естественной тягой с помощью численных методов проведено в [52]. В начальных условиях модели высота распыления равнялась 3 м, размер частиц воды – 20 мкм, массовый расход воды 0,1–1 кг/с, температура воды 28 °С. Вода распылялась в

воздух температурой 40 °С и относительной влажностью 40 %. Регистрировались профили скорости движения аэрозольного облака. Определено изменение размеров и скоростей движения капель со временем при различных расходах жидкости. При низкой и умеренной скорости распыления вода успевает почти полностью испариться. При высоких скоростях поток воздуха вблизи аэрозольного облака препятствует эффективному охлаждению и снижает отвод теплоты. С помощью численного моделирования в [53] изучено влияние направления впрыска жидкости на эффективность охлаждения в сухой градирне с естественной тягой. Изучался метод решения проблемы снижения эффективности охлаждения при повышенной температуре воздуха (40 °С). Для этого предложено использовать мелкодисперсные водные аэрозоли. Аэрозоль генерировался полноконусной форсункой. Установлено что угол впрыска изменяется в зависимости от высоты расположения сопла. При высоте градирни до 2,5 м рекомендуется впрыск воды со направлено движению воздуха. При большей высоте рекомендована противоточная схема впрыска.

1.2. Вторичное измельчение капель и струй жидкости

Одним из способов повышения эффективности теплообменных процессов является вторичное (дополнительное после традиционного распыления) измельчение капель и струй жидкости [54–56]. Для определения эффективности первичного и вторичного измельчения капель принято измерять минимальный, средний и максимальный радиусы образованных вторичных капель как при моделировании [57], так и в экспериментальных исследованиях [58–60]. Выделяют четыре подхода к вторичному измельчению капель: дробление за счет соударений капель с твердой поверхностью (стенкой) [61,62], при движении в газовом потоке с высокой скоростью [63,64], вследствие перегрева двухфазных капель до условий вскипания одного из веществ и микро-взрывной фрагментации [65–67], а также за счет их столкновения между собой [68,69]. Большое внимание

научной общественности уделяется последнему подходу – измельчению за счет столкновения капель. Эффективность измельчения исходных капель можно оценить по характеристикам вторичных капель. При изучении процессов обработки распылением важным является вторичное измельчение капель жидкостей [70]. Определяющую роль играют факторы формы капель, режимы их взаимодействия, характеристики вторичных фрагментов. В [71] исследовано влияние углового и линейного параметров взаимодействия капель воды разной формы (сфера, эллипсоид, жидкий диск) на режимы столкновений капель (коалесценция, отскок, разлет, дробление). Построены карты режимов взаимодействия. Установлено, что при столкновении сферических капель преобладающим режимом является коалесценция и разлет, а столкновение, сопровождающееся дроблением, характерно столкновениям эллиптических дисков. Исследование [72] посвящено сравнению интегральных характеристик вторичного измельчения при различных механизмах: микро-взрывной распад, столкновение капель с твердой поверхностью, между собой, комбинация данных схем измельчения с варьированием их последовательности. Установлено, что за счет микро-взрывного измельчения капель (вследствие существенного перегрева) возможно увеличение площади поверхности жидкости в 60–70 раз, в результате взаимодействия капель со стенкой или между собой – в 2–10 раз. Показано [72], что наиболее эффективное вторичное измельчение капель возможно за счет комбинаций схем измельчения (например, соударения капель между собой и последующий микро-взрывной распад вторичных фрагментов). В [73] приведены результаты исследования соударений капель с однородным и многокомпонентным составом. Установлены условия интенсивного вторичного измельчения капель с разным компонентным составом.

В [74] рассмотрены соударения капель воды, нагретых до температуры 80 °С, в газовом потоке. Рассчитаны частоты реализации режимов соударений капель в зависимости от характеристик среды и начальной температуры жидкости. Подробно изучен режим отскока капель при движении в

газовоздушной среде. В [75] приведены результаты экспериментального исследования процессов слияния и разрушения капель после их столкновения. Установлено, что при столкновении капель реализуются два основных режима: коалесценция и дробление. Показано, что чем больше отношение размеров капель, тем большему количеству колебаний они подвергаются после соударения. В [76] изучены бинарные центричные (лобовые) столкновения капель жидкости при малых скоростях движения. Выделены основные исходы столкновений капель: отскок, коалесценция, частичный отскок после слияния (разлет). Установлено значение времени контакта капель, которое составило около 17,5 мс. Результаты исследований процессов взаимодействия двух капель в струе приведены в [77]. Исследовано влияние безразмерного расстояния между каплями на режим взаимодействия. Закономерности каждого из режимов взаимодействия (режим коалесценции, скрещивания, линейного и непрямого контакта) достаточно детально проанализированы. Изучено влияние относительного положения капель на время их взаимодействия в рамках каждого из режимов [77].

1.3. Влияние свойств жидкости на последствия столкновений капель и струй

Повышенный интерес к процессам соударения капель жидкости между собой обусловлен их широкой распространенностью в различных отраслях: топливные технологии [78], пожаротушение [79], теплообменное оборудование [80]; фармацевтическая и пищевая промышленности [54] и др. В данных отраслях в качестве рабочих жидкостей используются разного рода растворы, суспензии, эмульсии, отличающиеся как по компонентному составу, так и по их свойствам (в частности, плотность, вязкость, поверхностное и межфазное натяжение). В связи с этим возникает необходимость изучения влияния свойств жидкости на условия, характеристики и последствия процессов взаимодействия капель, и положение границ переходов между реализуемыми режимами (отскок, коалесценция, разлет, дробление). При изучении влияния вязкости, поверхностного и межфазного

натяжения жидкости на условия, режимы и последствия взаимодействия капель достаточно трудно создать жидкостные составы с двумя фиксированными параметрами и одним отличным, т.к. зачастую при изменении вязкости жидкости изменяется и ее поверхностное натяжение. В частности, в [81] рассмотрены характеристики испарения топливных аэрозолей в камере сгорания. Основные заключения [81] состоят в том, что варьирование температуры топлива или температуры в камере сгорания может существенно изменять его вязкость и поверхностное натяжение. Известны результаты исследований соударений капель с разной вязкостью и поверхностным натяжением [82–84]. В частности, молочные и глицериновые эмульсии изучены в [82]. Вязкость менялась от 4,3 мПа·с для молочной эмульсии и до 88,8 мПа·с для состава с глицерином. Поверхностное натяжение варьировалось от 46,1 мН/м до 68,5 мН/м. Получено выражение для границы перехода между коалесценцией и рефлексивным разделением для молочной эмульсии [82]: $We = 17,05 + 510 \cdot Oh$. Определены значения критического числа Вебера и безразмерного линейного параметра для данных составов. В [83,84] изучены особенности соударений капли этанола с наклонной движущейся поверхностью. Установлено, что образованные фрагменты капель после измельчения вследствие соударения с твердой поверхностью движутся в том же направлении, что и сама поверхность. В [85] сделан акцент на доминирующую роль взаимодействия капель в условиях двухфазного потока в камере термической очистки воды (одна капля имеет большую вязкость, чем другая за счет различного содержания твердых частиц). Отмечена задержка по времени слияния, которая имеет место на начальной стадии столкновения капель с различной вязкостью. Установлено образование воздушного зазора на границе соударения капель. Определены физические условия достижения режима дробления, которыми являются разности внутренних давлений в каплях. Изучение вязкости проведено авторами в исследованиях [86,87]. В [87] изучалось поведение несмешиваемых капель жидкости. Определено влияние вязкости на положение границы между коалесценцией и разделением капель в зависимости от

скорости и безразмерного линейного параметра. Изучались капли глицерина и силиконовые масла SOM3, SOM5. Вязкость у данных составов изменялась в диапазоне от 1,76 до 6 мПа·с. Полученные номограммы показывают, что с увеличением скорости критическое значение безразмерного линейного параметра между коалесценцией и разделением уменьшается. При этом авторы выделили отдельный вид разделения для несмешиваемых капель жидкости – скрещивающее или перекрестное разделение. В результате такого разделения формируются вторичные капли, состоящие из одной жидкости. Влияние межфазного натяжения на процессы коалесценции изучены в экспериментах [88,89].

Испарение капель соленой воды в потоке воздуха с температурой (25–45 °С) и скоростью движения (0,5–2,5 м/с) изучено в [90]. Показано увеличение эффективности охлаждения на 8 % относительно охлаждением обессоленной водой. В [90] соответствующий эффект обоснован снижением скорости движения капель из-за увеличения ее плотности. Однако нерешенной остается проблема сбора соли с поверхностей теплообмена и взаимодействие капель соленой воды с поверхностями теплообмена. В [91] представлена модель испарения капли жидкости при ее движении в высокотемпературной среде. Валидация модели проведена при сравнении данных модели [91] и экспериментов [92]. Окружающая среда в модели [91] имела температуру 400–700 К и давление 0,1 МПа. В [91] изучено влияние начальной температуры распыляемой воды на характеристики капель в аэрозоле. Повышение температуры воды перед впрыском приводит к уменьшению начального распределения капель по размерам. Капли нагретой воды в среднем испарялись быстрее на 11 %, а количество отводимой теплоты аэрозольным облаком увеличилось на 12 %. Сформулирован вывод о том, что при одинаковом количестве отводимой теплоты расход предварительно нагретой воды будет ниже, чем воды без нагрева. При скорости столкновения 16 м/с между каплями образовывалась четко видимая межфазная пленка, состоящая из н-гептана. Так, например, в [93] приведены результаты экспериментов, выполненных с высоковязкими растворами. Изучалось взаимодействие двух

струй жидкости. Капли имели диаметр около 0,85 мм и скорость движения от 1 до 6 м/с. Установлены предельные скорости движения капель с учетом углов атаки, при которых происходит их интенсивное дробление.

Наряду с экспериментальными исследованиями процессов взаимодействия капель жидкостей в газовой среде достаточно активно проводится теоретическое изучение столкновений капель. Так, например, в [94] приведены результаты обобщения требований к моделированию бинарных столкновений капель. Идентификация столкновений капель в модели проводится детерминистическим или стохастическим способом. Описаны подходы, используемые для построения карт режимов взаимодействия капель. Наиболее важным результатом исследований [94] является определение положения границ на картах режимов соударений. Установлено влияние на них группы факторов (соотношение размеров капель, свойств жидкости и др.). В [95] приведены результаты численного исследования бинарных столкновений капель одного размера при варьировании значений чисел Вебера и Рейнольдса. В основу численного исследования положено уравнение Навье-Стокса с использованием метода конечных объемов. Результаты моделирования позволили исследовать процессы столкновения капель с учетом формирования вторичных капель и контролем их размеров. В [96] изучено влияние значения числа Вебера на центричные столкновения капель неравного размера. Моделирование проведено с использованием метода объемной жидкости. Исследовано влияние комбинации основных влияющих параметров на характеристики столкновения (например, соотношение размеров капель и значение числа Вебера). Также изучено влияние данных параметров на деформацию капель и образование спутниковых (вторичных) жидкостных фрагментов. В [97] приведены результаты численного моделирования процессов распыления водного спрея. Распределения капель по размерам и объемные доли водяного пара использованы для определения оптических свойств среды, в частности, коэффициентов излучения, поглощения и преломления излучения.

Интерес представляет изучение режима взаимодействия капель при разных начальных температурах жидкости. Особенно важно рассмотреть условия соударений капель с максимально отличающимися температурами. Например, для капель воды максимальной может быть разность температур 75–95 °С. В этом случае возможны синергетические эффекты влияния группы факторов на режимы и последствия соударений капель. Например, проведены экспериментальные исследования столкновений падающей капли и капли, находящейся, на горячей поверхности [98]. Температура падающей капли составляла 20 °С, температура второй капли 67–70 °С. Исследования проводились с целью изучения процессов тепломассопереноса в условиях распыления жидкости. По результатам исследований [98] сформулировано заключение о том, что варьирование температуры даже одной из двух соударяющихся капель является очень важным инструментом управления режимами соударений капель и их последствиями. В [99] рассмотрены четыре схемы вторичного измельчения: соударение между собой, соударение со стенкой, микро-взрывное измельчение, разрушение капли в потоке воздуха. Определены синергетические эффекты от совместного применения каждой схемы разрушения капель и необходимое количество энергии для достижения максимальной возможной степени измельчения. В рамках настоящего диссертационного исследования изучено влияние начальной температуры капель на характеристики их соударения.

1.4. Взаимодействие капель воды с твердыми стенками

В большинстве технологических процессов для защиты оборудования от механического и коррозионного износа необходимо поддерживать степень подготовки рабочей среды на высоком уровне [100,101]. Помимо экспериментальных и теоретических исследований столкновений капель между собой активно изучаются процессы взаимодействия капель с твердыми частицами в газовой среде. Это обусловлено тем, что нередко применяются

технологии (например, распылительная сушка [102], фильтрация [103] и др.), в которых происходит захват взвешенных частиц каплями. Одной из ключевых проблем таких исследований является анализ распределений по размерам капель и частиц в двухфазных потоках. В [104] приведены результаты моделирования процессов столкновений капель с частицами. Определены последствия таких взаимодействий с выделением диапазонов параметров столкновений. Показано, что отношение диаметра капли к диаметру частицы, а также число капиллярности оказывают влияние на длительность столкновения, а значение числа Вебера влияет на исход столкновения. Характеристики столкновений практически не зависят от формы частицы. Исследование [105] посвящено также изучению закономерностей столкновений капель и частиц между собой. Выделены основные исходы взаимодействия капли с частицей: слияние (агломерирование), сопровождающееся прилипанием частицы к капле, а также растяжение (отрыв), сопровождающийся отделением частицы от капли. Изучены закономерности образования вторичных капель. Исследование [106] направлено на изучение основных режимов и характеристик взаимодействия между каплей и частицей. Проанализировано влияние смесиваемости частиц на характеристики столкновений. Отмечено, что для гидрофобной твердой частицы (в отличие от нейтральной) характерно отталкивание (отскок). В случае гидрофильной твердой частицы зарегистрировано ее прохождение через каплю, в результате чего последняя разделяется на несколько фрагментов.

В теплообменниках аппаратах капли воды могут встречать на своем пути движения различные препятствия. Столкновения с ними приводят к измельчению капель, их торможению и налипанию на поверхности. Примером таких аппаратов является сепаратор жидкости (рисунок 1.4). При этом внутренние поверхности теплообменников аппаратов имеют различные формы, углы, шероховатость и материал изготовления.

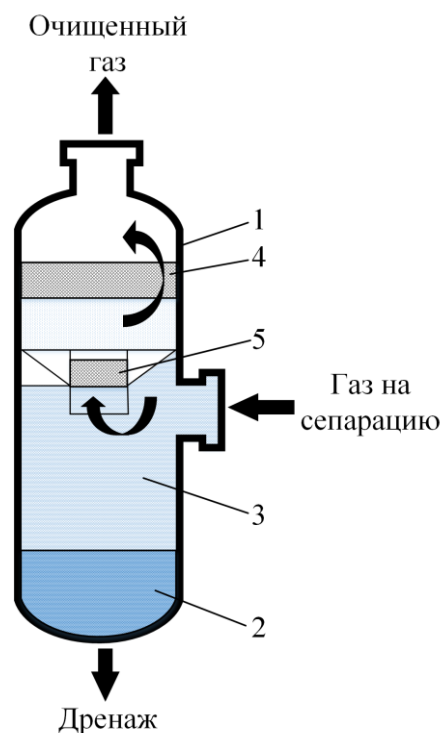


Рисунок 1.4 – Схема гравитационно-инерционного газового сепаратора с сетчатой насадкой [107]: 1 – корпус; 2 – сборник жидкости; 3 – секция предварительной (гравитационной) сепарации; 4 – сетчатая насадка; 5 – сетчатый коагулятор

Падающие капли на плоскую подложку с различной гидрофобностью изучены в [108]. Рассмотрены капли со значением числа Вебера от 14,5 до 160 и температурой от 5 до 85 °С. Показано, что при низкой температуре (до 30 °С) капли отскакивают от поверхности до 7 раз перед их растеканием. При нагреве подложки выше 50 °С капли сразу прилипали к подложке. В [109] сформировано предположение о том, что механизм столкновения капель с металлической подложкой, имеющей температуру ниже 100 °С, существенно отличается от случаев с нагревом ее до высокой температуры (более 200 °С). Основной отличительной особенностью последнего случая является нахождение капли в состоянии Лейденфроста [110–112]. Данное явление приводит к усложнению организации управляемого процесса теплообмена между жидкостью и поверхностью. В [109] представлены результаты экспериментального исследования контакта капли воды с металлической подложкой при высокой

температуре. Обнаружено смещение капли жидкости к области с более высоким значением коэффициента теплопередачи. В [113] исследованы столкновения капля с плоской подложкой, двигавшейся перпендикулярно направлению движения капли и имевшей разные углы наклона. Рассматривалось два типа материала подложки – алюминий и тефлон, с разной шероховатостью – гладкая, шероховатая и текстурированная. С помощью нержавеющей наконечников шприца генерировались капли диаметром 0,95 мм и 1,3 мм. Задание скорости движения подложки до 27 м/с осуществлялось с помощью пневматического поршня. По результатам обработки экспериментальных данных [113] установлено, что при идентичных характеристиках шероховатости подложки более гидрофобный материал позволил снизить критическую скорость для разбрызгивания жидкости. Полученные данные имеют большой потенциал для промышленного использования с учетом развития материалов для защиты от обледенения и коррозии.

Помимо объектов с плоской поверхностью в тепломасообменных аппаратах встречаются криволинейные поверхности. В [114] экспериментально изучены столкновения капля с неподвижной стеклянной сферической частицей диаметром 2 мм. Угол смачивания в экспериментах изменялся в диапазоне 70-118°, значение числа Вебера – от 0,1 до 1146. Капли сбрасывались с высоты до 1,5 м для достижения скорости движения перед столкновением – от 0,5 до 5 м/с. Во время свободного падения капля двигалась в полости стеклянной трубы для исключения различных возмущений. После столкновения капли, движущейся с высокой скоростью, с гидрофобной частицей на последней формировалась тонкая пленка жидкости. При этом степень гидрофобности частицы не влияла на толщину пленки. Итогом исследования [114] стала карта исходов столкновения капля с частицей с изменением значения числа Вебера. Отличием [115] от [114] являлся нагрев гидрофобной поверхности сферической частицы до 275 °С при температуре жидкости 20 °С, ограничение диапазона значений числа Вебера от 0,9 до 47,1 и размеры капля воды от 2,48 до 2,61 мм, сферической частицы 3 мм.

Также помимо воды в экспериментах использовались растворы глицерина концентрацией 15–35 %. Вследствие нагрева поверхности гидрофобной частицы тонкая пленка раствора глицерина вскипала на границе жидкость-твердое тело. В пленке образовывались пузырьки пара и регистрировался выброс микрокапель жидкости. Столкновения капель воды и изопропилового спирта со сферической частицей, нагретой до 250–350 °С и пленочное кипение жидкости на ней изучены в [116]. Капли генерировались с помощью игольчатых наконечников 21 G, 25 G и 30 G. Такой подход позволил получить капли воды диаметром от 2,28 до 2,87 мм и капли изопропилового спирта диаметром от 1,61 до 2,12 мм. Значения числа Вебера в экспериментах изменялись в диапазоне от 3,9 до 103,6 для капель воды и от 8,6 до 194,6 для капель изопропилового спирта. Отмечено увеличение площади контакта жидкости и твердой частицы с ростом значения числа Вебера, при этом время их контакта снижалось. С помощью энергетического баланса предложена теоретическая модель максимального диаметра разброса жидкости. Модель показала хорошее согласование при небольших значениях We , однако при их увеличении рассогласование достигало 40 %. Поверхности теплообмена могут изготавливаться с различными элементами для увеличения площади контакта с жидкостью. Столкновение и отскок капель от макроструктурированных супергидрофобных подложек исследовано в [117]. Обеспечено время контакта жидкости с поверхностью ниже теоретического путем измельчения исходной капли при ее ударе по ребрению. Результаты [117] сравнивались с данными теоретических расчетов [118]. Путем структурирования поверхности подложки удалось достигнуть времени контакта капли с гидрофобной поверхностью 5,5 мс. Дальнейшее снижение этого времени ограничено физическими процессами дробления, деформации и отскока капли воды.

В условиях сложности реализации экспериментальных исследований из-за ограниченности диапазона параметров актуальными являются численные исследования процессов столкновения капель и твердых объектов. Philippi и др. [119] с применением численных методов исследовали начальные стадии

воздействия капли жидкости на твердую плоскую подложку. При небольших значениях числа Вебера капли отскакивают от поверхности, либо плавно растекаются по ней, образуя тонкую пленку, что подтверждено более ранними экспериментальными данными [120,121]. Так как в типичных тепломассообменных аппаратах одновременно движется совокупность капель, на поверхностях теплообмена происходят их столкновения. Трехмерная динамика теплопереноса в таких каплях с помощью численных методов изучена в [122]. Установлено [122], что паразитное тепловое излучение снижает эффективность теплопередачи до 30 %. Численное исследование взаимодействия капель воды со сферическими объектами представлено в [123]. Варьируемыми параметрами в [123] являлись значение числа Вебера ($We=4-150$), смачиваемость поверхности ($\theta_{eqi}=20-160^\circ$) и отношения размеров капель и неподвижной частицы ($\Delta=1/3-2$). В [123] выявлено 7 исходов столкновений: осаждение, частичный отскок, полный отскок, полное покрытие, гравитационный распад, импульсный распад и разбрызгивание. Верификация разработанной модели столкновения проведена на основе экспериментальных результатов [114]. После обработки результатов численного моделирования представлены карты режимов взаимодействия $We(\theta_{eqi})$ для диапазона $\Delta = 1/3-2$.

1.5. Разделение компонентов газопарокапельных потоков

Высокие температуры с неоднородным градиентом, турбулентные течения в многофазных потоках, нестационарные режимы и пульсации различных параметров характерны для многих технологических установок. Включения твердых и жидких фаз в газовый поток приводят к усложнению управлением технологическими процессами, поэтому для очистки газов используют различные фильтры, отстойные газоходы, центрифуги и другие установки [124,125]. Например, в барботажно-пенных пылеуловителях (рисунок 1.5) газы для очистки

пропускаются через слой жидкости, которая задерживает твердые частицы. Экспериментальное изучение столкновения капель с твердыми частицами в потоках осложнено влиянием совокупности факторов окружающей среды.

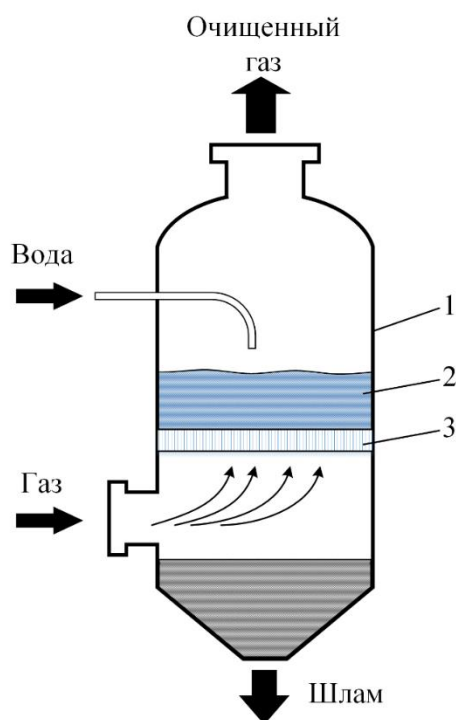


Рисунок 1.5 – Схема барботажно-пенного пылеуловителя [124]: 1 – корпус; 2 – слой жидкости; 3 – насадка

Результаты моделирования [126] имеют очень хорошую сходимость с экспериментальными данными [127] в диапазоне $We=6,84-104,11$, $B=0,1-0,9$ и $\Delta=10/15-20/15$. Разработанные модели могут быть эффективно применены в широкой группе приложений. В частности, немаловажную роль в улучшении экологических показателей работы промышленных предприятий играет очистка газообразных выбросов и очистка сточных вод [128–131]. Подавляющее большинство работ по теме соударения капель предполагают применение жидкостей без добавления в них твердых частиц [132–134]. Добавление в жидкость другой фазы вносит существенную неоднородность и значительно изменяет механизм взаимодействия капель при их соударении [135]. Проведено большое количество исследований в направлении высококонцентрированных

водоугольных и органоводоугольных суспензий. Такие составы используются в качестве экологической альтернативы прямому сжиганию угля [135–137].

В [105,138] приведены результаты изучения столкновений капель воды с частицами стекла. В [105] построены карты режимов соударений с учетом значений линейного параметра взаимодействия и числа Вебера. Установлены границы перехода между режимом агломерирования частиц и капель воды и режимом разделения. Установлено, что наибольшее количество спутниковых (вторичных) капель соответствует диапазону безразмерного линейного параметра взаимодействия B от 0,4 до 0,8. Закономерности взаимодействия капли жидкости с частицей стекла также рассмотрены в [139]. Изучены столкновения частиц (характерные диаметры 1,10-1,15 мм) с неподвижной каплей (диаметр 3,4 мм). Диапазон изменения значений числа Вебера составил 0,2–13,5. Оптимальные размеры капель для улавливания мелкой пыли согласно моделированию и экспериментам [20] определены в диапазоне от 14 до 30 мкм и скорости их движения 20–30 м/с. Отмечено [20], что при отношении размеров капли к частице равным 2 и более, капли полностью обволакивают частицы удерживая их в себе. Это значительно улучшает качество воздуха в рабочей зоне. Эволюцию изменения морфологии частиц при распылительной сушке на примере одиночной капли изучено в [140]. Описаны основные способы для изучения одиночных капель при сушке: левитирующие, свободно падающие, подвешенные и покоящиеся капли. В экспериментах [141] доказано, что повышенная температура воздуха в зоне распыления препятствует агломерированию. Это обусловлено формированием корки на поверхности, из-за которой капли не слипаются.

Схемы многоуровневого расположения форсунок в сушильной камере предложены в [142]. Обобщив данные широкой совокупности исследований в [142] сформулирован вывод о том, что распыление из нескольких форсунок способствует агломерированию за счет увеличения скорости столкновения, частоты столкновений и эффективности. Основные закономерности, протекающие при целенаправленном столкновении потоков аэрозоля для

процессов сушки, изучены в [143]. В то время как для пищевой промышленности немаловажным фактором является агломерирование капель для укрупнения твердых частиц [143]. В [144] с помощью численного моделирования изучили столкновения капли жидкости с движущейся частицей под действием силы тяжести. При варьировании значений числа Бонда (Bo) и B , смачиваемости поверхности, отношения размеров капель и частиц установлены основные закономерности. Агломерирование регистрировалось при значениях Bo до 0,83, при дальнейшем увеличении числа Бонда происходила фрагментация капли. В [145] приведены результаты выполненного математического моделирования взаимодействия капель жидкости со сферическими твердыми частицами с применением метода VOF. Также в [145] приведены результаты экспериментальных исследований процессов столкновений капель со сферой при комнатной температуре и достаточно малых значениях числа Вебера (до 30). Определено влияние сил инерции и вязкости на характеристики процесса столкновения капли с частицей с помощью числа Вебера и отношения размеров капли и частицы. Установлено, что для капель, размер которых меньше размера частиц, взаимодействие происходит подобно столкновению капли с твердой плоской поверхностью. В частности, зарегистрирован интенсивный отскок капли. В случае высокого значения соотношения размеров капель и частиц, а также малых значениях числа Вебера происходит отскок. Однако при увеличении We зарегистрировано обволакивание частицы каплей. Также установлено, что при высоких значениях числа Вебера (более 40) и малых значениях соотношения размеров капли и частицы (менее 0,62) скорость перемещения образовавшихся в результате столкновения вторичных жидкостных фрагментов на 50–80 % превышает скорость движения первичной капли перед соударением с поверхностью. Результаты численных и экспериментальных исследований кинетических характеристик процессов столкновений капли с частицей представлены в [146]. Результаты применения предложенной модели дают возможность определить, при каких параметрах капли и частицы произойдет

отрыв или ее осаждение на капле. Отмечается, что исход столкновений в большей мере зависит от угла атаки. При малых значениях последнего происходит налипание капли на поверхность частицы, в то время как при большом угле регистрировалось разделение твердой частицы и жидкости. Модель термо- и гидродинамики многокомпонентного парок капельного потока в цилиндрическом канале построена в [147]. Модель [147] учитывает столкновения капель и фазовые переходы компонентов потока. Установлено [147], что при высокой концентрации пара в потоке увеличивается интенсивность коалесценции капель в крупные вторичные фрагменты. После достижения значения критического числа Вебера начинается дробление сформированных фрагментов. Таким образом, происходит заикливание процессов конденсация-коалесценция-дробление-испарение-конденсация. Такие циклы происходят до достижения потоком состояния двухскоростной равновесной системы. Двухфазные жидкостно-пузырьковые потоки нашли широкое применение в энергетике, химической технологии и других областях технологий. Потоки пузырьков в жидкости чаще всего являются турбулентными. В таком режиме происходит активное перемешивание в жидкости, что вызвало естественный интерес для области очистки промышленных стоков и отходов, загрязненных мелкодисперсными нерастворимыми примесями. Пузырьковый поток в системе пузырьки-в воде захватывает находящиеся в объеме жидкости частицы и перемещает их к поверхности. Этот процесс удаления взвешенных частиц в объеме основной фазы подобен процессам очистки газов в системе капли-в газе.

Из анализа процитированных работ правомерен вывод о том, что на режим и последствия столкновений капель определяющее влияние оказывает совокупность факторов, в частности, размеры и скорости движения капель, их компонентный состав, угол атаки и др. Фактор нагрева, как правило, учитывается при исследовании процессов столкновений капель с твердой стенкой [148–151]. Этот фактор может быть определяющим и для соударяющихся капель между собой. Пока влияние температуры капель и газовой среды на

характеристики их взаимодействия изучено для ограниченного диапазона, не превышающего температуры кипения жидкостей [72]. В современных и перспективных газопарокапельных технологиях температуры могут быть существенно выше (до 1000 °С). Капли суспензий представляют неустойчивые структуры в процессе полета как до соударения между собой, так и после. В связи с этим возрастает интерес к изучению процессов столкновений капель при повышенных значениях температуры и давления газовой среды, а также в условиях, приближенных к теплоэнергетическим установкам и системам для генерации и трансформации энергоносителей, в том числе, основанных на принципах их комбинированного производства.

Выводы по первой главе

1. В технологиях охлаждения пароводяных смесей в теплотехническом оборудовании, промышленных градирнях, системах высокотемпературной очистки воды и водоподготовки на теплоэнергетических объектах, а также при создании теплоносителей на базе уходящих высокотемпературных дымовых газов и альтернативных источников энергии определяющими являются не только начальные параметры струйно-капельных потоков, но и эффекты столкновения капель, аэрозолей и струй жидкостей.
2. Экспериментальные исследования параметров столкновения капельных потоков в газовых средах с различными параметрами до конца XX века сдерживались отсутствием соответствующих методик и оборудования. Активное развитие высокоскоростных оптических программно-аппаратных комплексов с 90-х годов XX века позволило организовать экспериментальное изучение закономерностей трансформации поверхности капель жидкостей в газовой среде при движении с различной скоростью, а также при воздействии на нее совокупности факторов и эффектов.

3. Целесообразно проведение экспериментальных исследований параметров столкновений аэрозольных потоков, струй жидкостей, одиночных капель, твердых частиц и полидисперсных потоков. Это даст возможность исследовать процессы, интенсифицирующие тепломассообмен, с большей точностью и изучить влияние совокупности технологических параметров: температура (20-700 °С), давление газовой среды (0,09-0,6 МПа), относительная влажность (20-100 %), температура жидкости (20-100 °С).
4. Основными задачами таких экспериментов целесообразно принять: определение минимальных параметров движения и столкновения капель для реализации различных режимов взаимодействия, количественный и качественный анализ вторичных фрагментов воды и составов на ее основе, выявление основных закономерностей отскока, коалесценции, дробления и разлета капель жидкостей.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Параметры работы энергетического оборудования с газопарокапельными потоками

Эжекционные градирни разбрызгивают воду через форсунки под давлением 0,05–0,4 МПа. Преобладающий размер капель воды около 0,2 мм, скорость их движения 16–20 м/с. Капельный поток увлекает за собой атмосферный воздух, формируя таким образом газожидкостный факел [38,41]. В вентиляторных градирнях отсасывающего типа воздух выбрасывается со скоростью 6–10 м/с, в нагнетательных – воздух выходит из градирен со скоростью 1,7–2,5 м/с [38].

При работе градирен в атмосферу с уходящей паровоздушной смесью уносятся капли воды размерами 100–500 мкм [38]. Водоуловители вентиляторных градирен работают при скорости движения потока воздуха от 2 до 3 м/с (в типовых не более 2,5 м/с); в малогабаритных – до 4 м/с; в башенных – от 0,7 до 1,3 м/с. Водораспределитель должен обеспечивать диапазон размеров капель и пленок жидкости 2–3 мм в диаметре для недопущения образования струй в оросителе и уменьшения капельного уноса. Однако в эжекционных градирнях одним из основных требований является достижения как можно большей площади теплообмена за счет снижения среднего размера капель воды. Это приводит к увеличению капельного уноса. В связи с этим эжекционные градирни обычно рассматривают отдельно от градирен с традиционными водораспределительными устройствами. Последние разделяют на три основных вида: разбрызгивающие; без разбрызгивания; подвижные. Разбрызгивающие устройства делятся на безнапорные, исполняемые в виде открытых лотков, желобов и т.п., и напорные, исполняемые в виде закрытых желобов или труб с разбрызгивающими форсунками или соплами. В настоящее время к разбрызгивающим соплам с целью повышения ресурсоэффективности

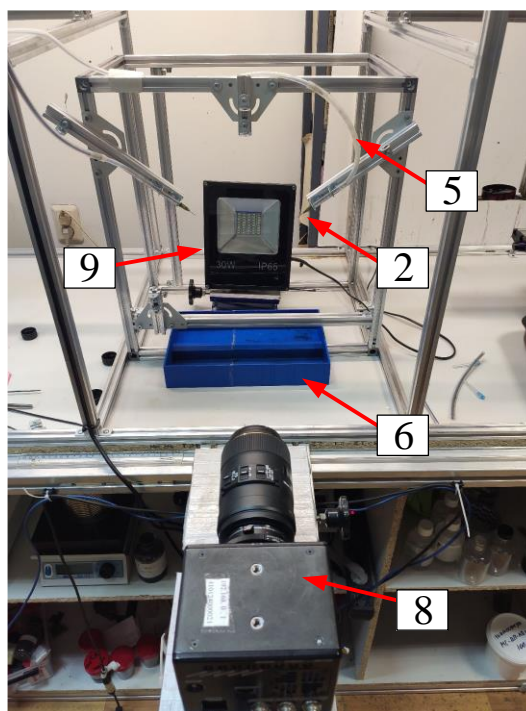
предъялены требования формирования развитого факела жидкости радиусом 1,5–2 м при напоре 5–30 кПа. Большинство современных сопел изготавливают из полимерных материалов. Они имеют меньшую шероховатость, не подвергаются коррозии, проще и дешевле в изготовлении, чем литые из чугуна или цветных металлов.

В установках для очистки уходящих газов параметры газов и жидкостей значительно отличаются от теплотехнических установок контуров генерации на ТЭС. Для скрубберов характерны высокие скорости движения проходящих газов, до 170 м/с, размер включений (твердых частиц) до 1 мкм, температура газового потока до 400 °С. Характеристики капель орошающей жидкости в скрубберах примерно сопоставимы с параметрами капель воды в градирня – размер капель до 2 мм, начальная температура жидкости до 60 °С. Для парокапельных потоков в передвижных парогенерирующих установках максимальные параметры работы составляют: температура потока – до 310 °С, давление – до 0,98 МПа. Однако обычно параметры парокапельного потока в рабочем режиме ниже максимальных: температура – до 250 °С, давление – до 0,6 МПа. Важную роль в подготовке твердого топлива на электростанциях, сырья для строительной сферы, продуктов пищевой и фармацевтических сфер играют атмосферные сушильные аппараты различных принципов действия (барабанные, лотковые, вихревые, пневматические). Если для сырья и топлива температура в рабочей зоне сушильной установки может достигать до 1000 °С, то для пищевой промышленности необходим диапазон от 30 до 90 °С, а сушка и сублимация фармацевтических препаратов протекают при температурах до 200 °С.

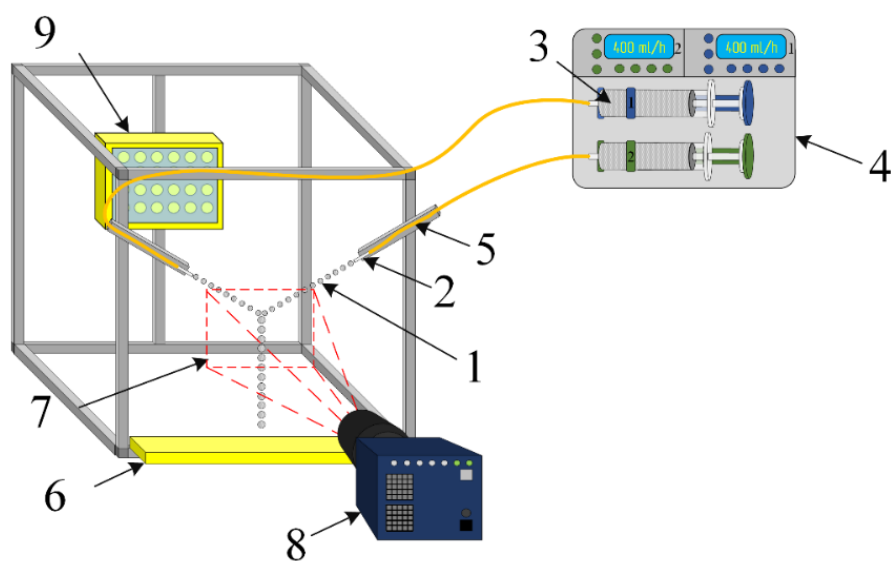
2.2. Бинарное взаимодействие капель жидкостей и твердых частиц при нормальных условиях

Для проведения экспериментов с бинарными столкновениями капель жидкостей при нормальных условиях использовался стенд №1, представленный

на рисунке 2.2.1 [157,158]. Капли (1) генерировались через сменные сопла (2) с различными внутренними диаметрами (0,51-1,12 мм). Экспериментальный состав подавался в сопла из шприцов (3) объемом 50 мл, установленных в шприцевом насосе (4) с поддержанием постоянного расхода жидкости 600–1200 мл/ч по силиконовым трубкам (5). Внизу экспериментальной установки установлены емкости для сбора жидкости (6). Область регистрации (7) выбиралась и настраивалась таким образом, чтобы имелась возможность отследить начальные параметры одиночных капель и параметры сформировавшихся вторичных фрагментов после соударения. Процесс соударения капель, содержащие твердые частицы, между собой регистрировалась высокоскоростной видеокамерой (8) Photron mini UX100 с разрешением съемки 1280×1000 и объективами Nikon ED AF Micro Nikkor 100 mm и AF-S NIKKOR 200 mm f/5.6E ED VR. Съемка осуществлялась с частотой 5000 кадр/с и межкадровой задержкой 1/20000. Область регистрации настраивалась таким образом, чтобы можно было детально проанализировать процесс столкновения капель (моменты сближения и взаимодействия, а также режим столкновения). Камера располагалась фронтально к области исследования. Такое расположение позволяло достоверно определить угол столкновения капель и линейный параметр взаимодействия. Для подсветки использовался диодный прожектор мощностью 50 Вт (9).



a



б

Рисунок 2.2.1 – Внешний вид (*a*) и схема (*б*) стенда №1: 1 – капли, содержащие твердые частицы; 2 – сменные сопла различного диаметра; 3 – шприц с жидкостью; 4 – шприцевой насос; 5 – силиконовые трубки; 6 – емкость для сбора жидкости; 7 – область регистрации; 8 – высокоскоростная видеокамера; 9 – диодный прожектор

Основные параметры генерируемых капель: радиус 0,1–1 мм, скорость движения 0,1–10 м/с, угол атаки 0–90°. Выбранный диапазон изменения размеров капель объясняется тем, что капля при таких размерах имеет стабильную форму во время движения в газовой среде. Диапазон скоростей выбирался таким образом, чтобы реализовать различные режимы столкновения капель.

При обработке результатов выделялись четыре режима взаимодействия [107,159,160]: отскок, коалесценция, разлет и дробление. Отскок характеризовался упругим ударом капель, после которого они разлетаются без формирования новых частиц и, без разрушения поверхностной оболочки друг друга. При коалесценции капли после соударения сливались в одну и не распадались при дальнейшем движении. Разлет характеризовался тем, что при его реализации нарушалась целостность капель, но при их расхождении новые фрагменты жидкости не образовывались. При дроблении после столкновения капель происходило их дробление с образованием вторичных капель. Схема регистрации характеристик соударяющихся капель приведена на рисунке 2.2.2.

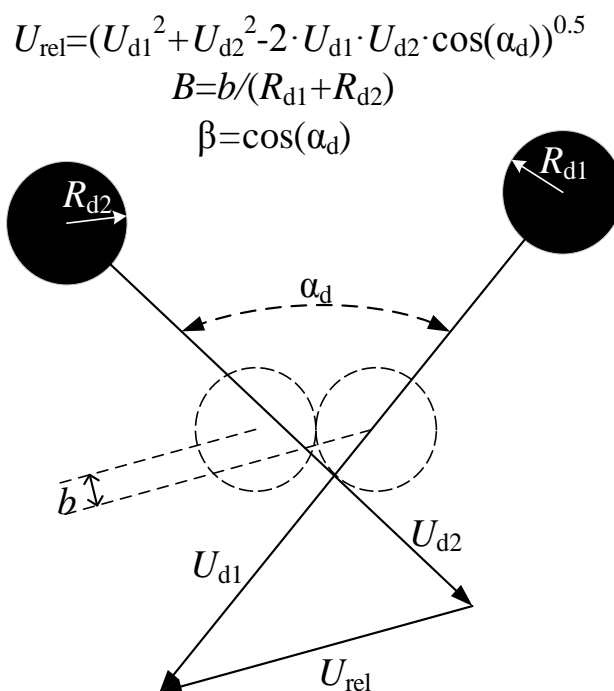


Рисунок 2.2.2 – Схема регистрации характеристик процесса соударения капель

При проведении экспериментов с каплями жидкости, нагретыми до температуры 90 °С, капилляры нагревались газовой горелкой (мощность 1,1 кВт, максимальная температура 1300 °С) одну минуту. Температура жидкости контролировалась хромель-алюмелевой термопарой (диапазон измерения от -50 °С до 1200 °С, диаметр спая около 0,5 мм, погрешность ± 1 °С, время тепловой инерции около 1 с).

По измеренным скоростям и углу атаки рассчитывалась относительная скорость взаимодействия капель по теореме косинусов [101,161,162], которая позволила учесть скорость движения каждой капли и угол атаки между ними:

$$U_{rel}=(U_{d1}^2+U_{d2}^2-2\cdot U_{d1}\cdot U_{d2}\cdot \cos(\alpha_d))^{0,5}. \quad (1)$$

С использованием вектора относительной скорости взаимодействия и расстояния между центрами масс капель рассчитывался безразмерный линейный параметр взаимодействия, который позволял учесть центричность удара [101,161,162]:

$$B=b/(R_{d1}+R_{d2}) \quad (2)$$

Далее вычислялось значение числа Вебера, которое позволяло одновременно учесть плотность и поверхностное натяжение жидкости, относительную скорость взаимодействия и размеры капель [101,161,162]:

$$We=2\cdot \rho\cdot R_{d1}\cdot U_{rel}^2/\sigma. \quad (3)$$

Также определялись значения числа Онезорге, показывающего отношение сил вязкости к силам инерции и поверхностного натяжения:

$$Oh=\mu/(\rho\cdot \sigma\cdot 2\cdot R_d\cdot 10^{-3})^{0,5}. \quad (4)$$

Число капиллярности выражает соотношение между вязким трением и поверхностным натяжением и определяется по формуле:

$$Ca=\mu\cdot U_{rel}/\sigma. \quad (5)$$

Число Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам вязкого трения:

$$Re=(2\cdot \rho\cdot R_d\cdot 10^{-3}\cdot U_{rel})/\mu. \quad (6)$$

При построении карт режимов соударений капель использование безразмерного линейного параметра обусловлено тем, что он одновременно позволяет учесть в себе как центричность удара, так и угол атаки. Также нередко применяется угловой параметр взаимодействия, который позволяет учесть только угол атаки капель, но не учитывает центричность удара [162]:

$$\beta = \cos(\alpha_d). \quad (7)$$

Как следствие, в настоящей работе при анализе результатов применялся безразмерный линейный параметр взаимодействия B .

Процесс дробления капель представляет наибольший интерес для использования в промышленных установках, принцип работы которых основан на применении газопарокапельных потоков. Для таких установок особенно важным является, насколько удалось измельчить капли относительно начальных размеров. Для этого из полученных видеogramм эксперимента выделялся режим дробления. Измерялся радиус (r_d) всех образованных вторичных фрагментов и их количество (N_t). Далее проводился расчет начального объёма жидкости, участвующего в процессе взаимодействия капель, т.е. для двух исходных капель:

$$V_0 = 4 \cdot \pi \cdot (R_{d1}^3 + R_{d2}^3) / 3. \quad (8)$$

Для учета всех сформировавшихся вторичных фрагментов рассчитывался их объём с учетом радиуса и количества:

$$V_1 = 4 \cdot \pi \cdot \sum r_{di}^3 / 3. \quad (9)$$

Так как не все образованные фрагменты оставались в области регистрации, либо находились не в фокусном расстоянии, то объём начальных капель был существенно больше аналогичного параметра для мелких фрагментов. Для учета этого фактора вводился поправочный коэффициент, который прямо пропорционально увеличивал количество фрагментов в зависимости от их радиуса, до достижения равенства $V_0 = V_1$. Для демонстрации эффективности измельчения начальных капель относительно образованных вторичных фрагментов рассчитывалось отношение площади свободной поверхности

образованных фрагментов к аналогичному параметру для исходных капель (S_1/S_0) по формулам:

$$S_0=4\cdot\pi\cdot(R_{d1}^2+R_{d2}^2), \quad (10)$$

$$S_1=4\cdot\pi\cdot\Sigma r_{di}^2. \quad (11)$$

Также для промышленных теплообменных установок интерес представляет площадь покрытия образованных вторичных фрагментов. Для расчета такой площади измерялся радиус аэрозольного облака, наполненного вторичными фрагментами. При его вычислении все мелкие капли начинали менять вектор скорости под действием силы тяжести:

$$S_a=4\cdot\pi\cdot R_a^2. \quad (12)$$

Для слежения за перемещением межфазной границы сталкивающихся капель, а также для определения времени их полного смешения при коалесценции сконструирован и собран экспериментальный стенд №2. Использовалась методика на основе Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF), которая подобна описанной в [163,164]. При создании плоскости регистрации в капле использовался непрерывный лазер FTI OPTRONIC мощностью 10 Вт, длина волны 532 нм. Луч лазера преобразовывался в плоский нож при помощи системы линз. Угол раскрытия лазерного ножа составлял 8° , толщина ножа в измерительной области – около 0,5 мм. Концентрация флуорофора Rhodamine B в жидкости составляла 1000 мкг/л. Ранние исследования [163,164] показали, что такой концентрации достаточно для возникновения явления флуоресценции в капле и последующего измерения интенсивности эмитированного красителем (флуорофором) излучения. В другую емкость добавлялся синий растворимый краситель объемной концентрацией 0,5 %. Такая концентрация красителя позволила в достаточной мере максимально затемнить каплю на видеозаписи камеры и, как следствие, хорошо визуализировать смешивание слоев жидкости [165,166]. Внешний вид и схема экспериментального стенда №2 приведены на рисунке 2.2.3.

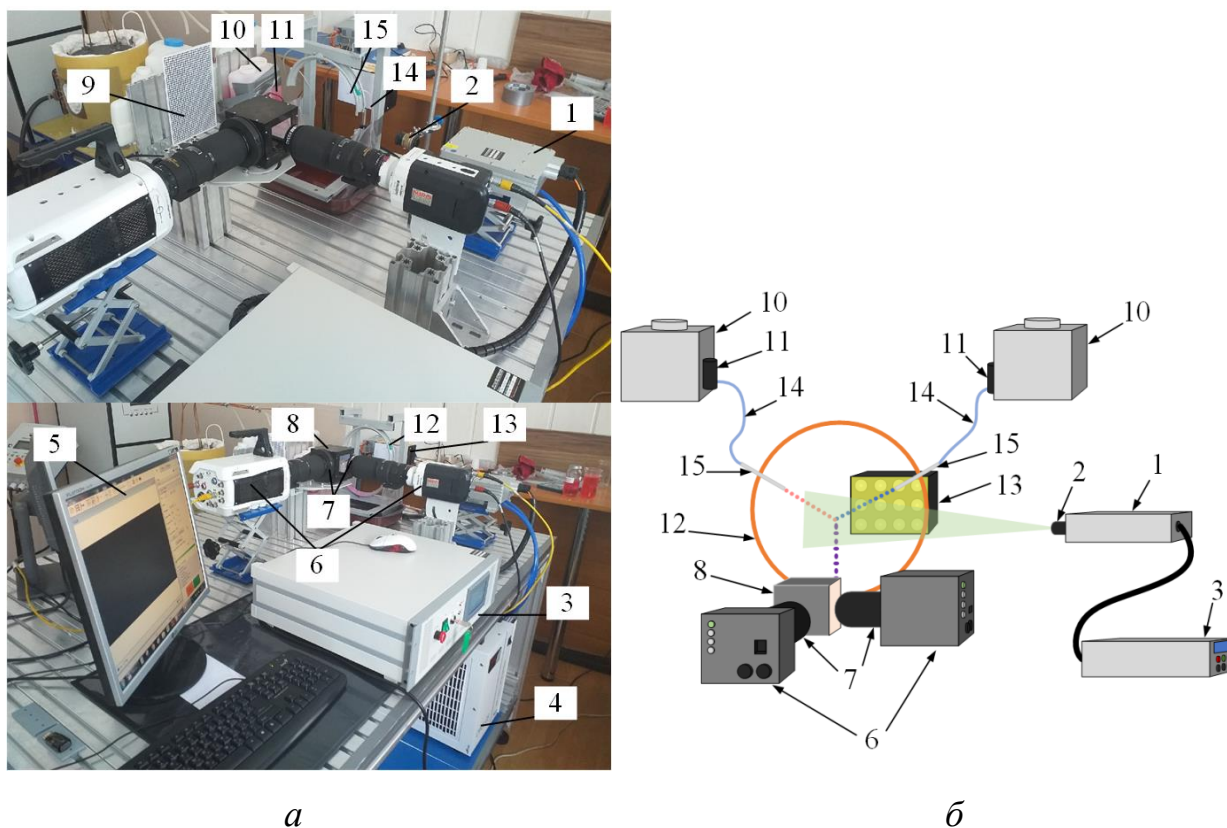


Рисунок 2.2.3 – Внешний вид (а) и схема (б) стенда №2: 1 – Nd:YAG лазер; 2 – лазерный коллиматор; 3 – пульт управления лазером; 4 – блок охлаждения лазера; 5 – компьютер; 6 – высокоскоростные видеокамеры; 7 – макрообъективы с установленными светофильтрами 600–10 нм и 530–10 нм; 8 – светоделитель; 9 – калибровочная мишень; 10 – емкость с жидкостью; 11 – насос для подачи жидкости; 12 – дисковый держатель для установки сопел; 13 – источник света; 14 – капилляры для подвода жидкости; 15 – сопла

Регистрация взаимодействия капель проводилась с помощью высокоскоростной видеокамеры (при разрешении 1280×720 пикс и частоте регистрации от 1000 до 5000 кадр/с). Первичная обработка полученных видеogramм (определение характеристик столкновения капель) проводилась с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Использование данного программного обеспечения позволило определить размеры и скорости движения капель, угол взаимодействия, дистанцию между центрами капель перед столкновением и тип взаимодействия. Систематическая погрешность при

измерении размеров капель определялась величиной масштабного коэффициента, и составила 0,052 мм/пикс, скоростей движения 0,061 м/с и углов атаки 1,1°. Максимальное значение случайной погрешности при измерении размеров капель составило 5,1 %, скоростей движения 4,1 %, углов атаки 3,1 %. Регистрация характеристик соударяющихся капель и режимов взаимодействия выполнялась аналогично методике, использованной для экспериментального стенда №1.

При идентичных условиях проводилась серия из 3–5 экспериментов. По результатам каждого эксперимента получена серия из 1000–8000 кадров со столкновениями капель. В каждой серии регистрировались 10–50 различных взаимодействий. Для конечной обработки видеogramм с целью определения последствий столкновения и характеристик смешения капель использовалось программное обеспечение DaVis 10.

Определение интенсивности свечения капель проводилось в рамках нескольких этапов. Для удаления фона и выделения капель на все видеogramмы накладывались алгоритмические маски (пикселям с “нежелательным” значением светимости присваивалось значение интенсивности, равное нулю). Так как использовались капли с Rhodamine B и гелиевым красителем, то накладывались две маски: для вычитания фона и капель с гелиевым красителем в одном случае и капель с Rhodamine B и фона во втором. Определение средней интенсивности свечения (I) проводилось в выделенной области регистрации движения капель за 50–100 кадров. Средняя интенсивность свечения капель воды с гелиевым красителем составляла от 5 до 80 ед. Светимость фона в зависимости от области кадра составляла 500–590 ед. Области с неравномерной подсветкой фона удалялись также с помощью наложения маски. Наибольшей светимостью обладали капли с Rhodamine B (значения I величиной от 1200 до 2000 ед). Светимость вторичных фрагментов в зависимости от режима изменялась в диапазоне 30–1200 ед. Такие значения светимости позволили с высокой точностью разделить разные капли жидкости. При смешении капель их светимость изменялась с течением времени вследствие перемешивания слоев жидкости.

При выборке кадров для последующей оценки скоростей конвекции в каплях выделены три случая (рисунок 2.2.4):

Случай 1. Капли с умеренной степенью деформации поверхности, рассекаемые ножом лазера по оси симметрии.

Случай 2. Поверхность капель могла незначительным образом деформироваться или оставаться практически без изменений, формы капель также были различны. Нож лазера рассекал капли не по оси симметрии (вблизи передней, либо задней кромки капли).

Случай 3. Поверхность капель сильно деформирована. Нож лазера рассекал капли по оси симметрии. Вследствие деформации поверхности образы трассирующих частиц оказывались размытыми.

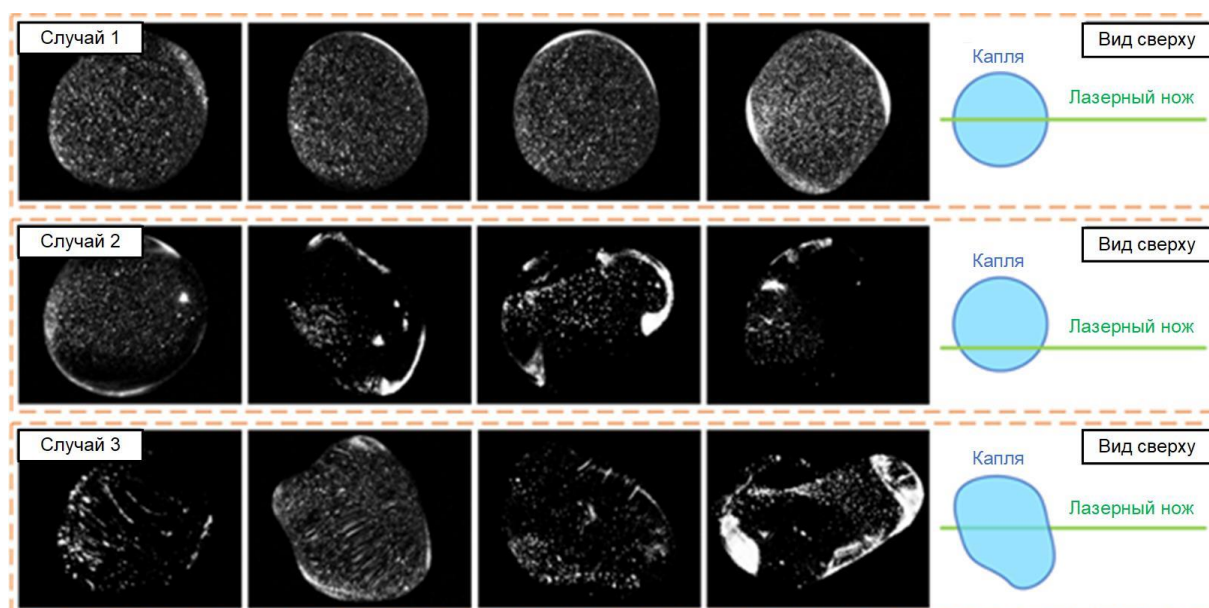


Рисунок 2.2.4 – Типичные кадры из проведенных экспериментов: Случай 1 – капли с умеренной степенью деформации поверхности, рассекаемые ножом лазера по оси симметрии; Случай 2 – капли с различной степенью деформации поверхности, рассекаемые ножом лазера не по оси симметрии; Случай 3 – капли с сильной деформацией поверхности, рассекаемые ножом лазера по оси симметрии

Вследствие невозможности достоверного определения скорости конвекции при сильной (если скорости смещения слоев жидкости при деформации много выше скоростей конвекции) деформации поверхности капель расстояние от зоны их столкновения до области видеорегистрации камеры 2 выбиралось таким образом, чтобы осцилляции капли были минимальны и не влияли на погрешности определения скорости конвекции. В экспериментах установлено, что таким минимальным расстоянием является 130-150 мм. Отобранные кадры с каплей воды (Случай 1 на рисунке 2.2.4) загружались в ПО Actual Flow. Последовательность действий при обработке изображений и построении полей скорости конвекции в каплях показана на рисунке 2.2.5.

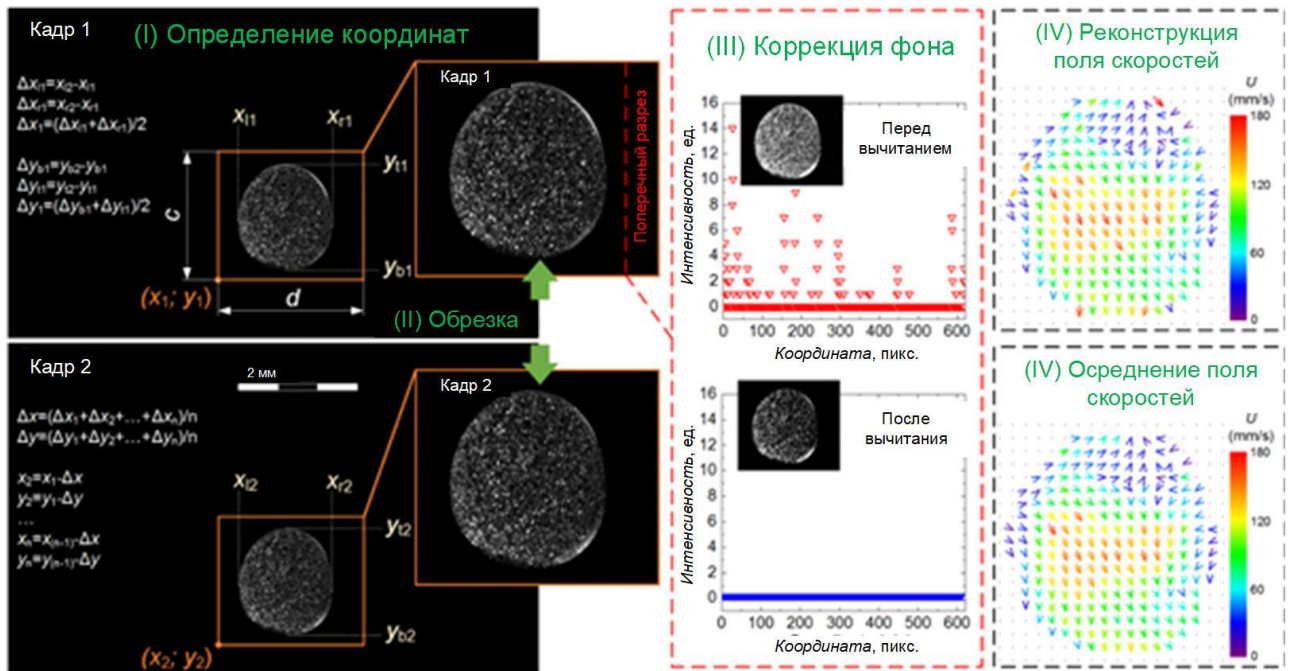


Рисунок 2.2.5 – Алгоритм регистрации поля скорости конвекции в капле жидкости

Обработка данных и построение полей скорости конвекции в капле осуществлялись в рамках пяти последовательных шагов (рисунок 2.2.5):

(I) Определение координат. Определение скорости движения трассирующих частиц в капле должно учитывать ее перемещение. Смещение капли в кадре

компенсировалось путем обрезки каждого отдельного изображения. Для этих целей определялись координаты крайних точек капли в каждом кадре: верхней (y_{tn}), нижней (y_{bn}), левой (x_{ln}), правой (x_{rn}). Вычислялось смещение границ капли по горизонтали и вертикали между кадрами: Δx_{ln} , Δx_{rn} , Δy_{tn} , Δy_{bn} . Рассчитывалось среднее смещение капли по горизонтали и вертикали между кадрами: Δx_n , Δy_n . Вычислялись средние арифметические значения перемещений капли в горизонтальном и вертикальном сечениях (для анализируемой группы кадров рассматриваемой капли): Δx , Δy (принималось допущение, что за время движения капли в кадре ее скорость не изменяется).

(II) Увеличение и обрезка. Так как значения параметров Δx и Δy были дробными, то исходные кадры перед обрезкой зуммировались в 2 раза. Значения параметров Δx и Δy также увеличивались в 2 раза и округлялись до ближайшего целого числа. Это позволило снизить погрешность при смещении трассирующих частиц в капле до 0,25 пикс (случайная ошибка). Задавались размеры прямоугольника (ширина – d ; высота – c), описывающего каплю, а также координаты его левой нижней вершины на первом кадре ($x_1; y_1$). Далее определялись координаты той же точки на всех кадрах капли. Выполнялась обрезка каждого изображения.

(III) Коррекция заднего фона. Каждый кадр содержал фоновый шум в диапазоне 1-16 ед. Для коррекции шумов интенсивность каждого кадра уменьшалась на 16 ед. Использовалась процедура *subtracting*. На рисунке 2.2.5 показано распределение интенсивности вдоль вертикального сечения до и после процедуры вычитания.

(IV) Реконструкция поля скоростей. При обработке данных использовался кросскорреляционный алгоритм [27, 28]. Выполнялась разбивка полученных изображений на элементарные области (размером 64×64 пикс), для каждой области рассчитывался максимум корреляционной функции. Смещение координат пика корреляционной функции в каждой элементарной области между соседними кадрами (задержка кадра – 250 мкс) соответствовало среднему

перемещению трассирующих частиц: строился вектор скорости. Полученный набор векторов представлял собой двумерное двухкомпонентное регулярное поле скорости конвекции в капле. Точность используемого при определении смещений трассирующих частиц алгоритма составляла 0,2 пикс (систематическая ошибка).

(V) Интерполяция поля скоростей. Вследствие постоянной деформации границ капли концентрация частиц TiO_2 в некоторых полученных в результате разбивки изображения элементарных областях была непостоянна. Это, зачастую, приводило к возникновению ошибочных векторов (с неправильным направлением либо численным значением скорости). В ходе интерполяции модуль и направление вектора скорости корректировалось с учетом соседних векторов.

Дополнительно с целью установления влияния режима и характеристик столкновения на скорости конвекции в капле осуществлялась съемка на Cam #2 движущихся капель воды без столкновений между собой. Генерация капель и обработка результатов выполнялась аналогично описанному ранее алгоритму. Для капель без столкновений варьировались скорости движения (U_d) и размеры (R_d). После построения полей скорости конвекции в каплях для каждого отдельного поля выполнялось осреднение значения скорости конвекции. Определялось среднее арифметическое значение скорости перемещения трассеров: значения модуля скорости всех ненулевых векторов на полученном поле скорости суммировались и делились на число векторов.

Для изучения особенностей соударения одиночных капель жидкости с твердыми частицами использовался экспериментальный стенд №3. Схема экспериментального стенда №3 представлена на рисунке 2.2.6. Капли жидкости генерировались с помощью сопла (7) диаметром 1 мм, что позволяло добиться радиуса R_d около 0,5 мм. Жидкость подавалась из емкости (5), куда помещался погружной насос. К его входам подключался регулятор напряжения (6), который позволял изменять скорость движения капель (U_d). Подготовленные частицы угля порционно засыпались в воронку (4), из которой по капилляру (11) подавались в камеру взаимодействия. Процессы столкновения капель с твердыми частицами

регистрировались видеочкамерой (1) (разрешение 1152×864 пикс, частота регистрации от 3000 до 10⁵ кадр/с). Для варьирования угла атаки (α_d) применялся кольцевой держатель (10). За счет изменения размера частиц (R_d) и высоты воронки (4) варьировалась скорость движения твердых частиц (U_d).

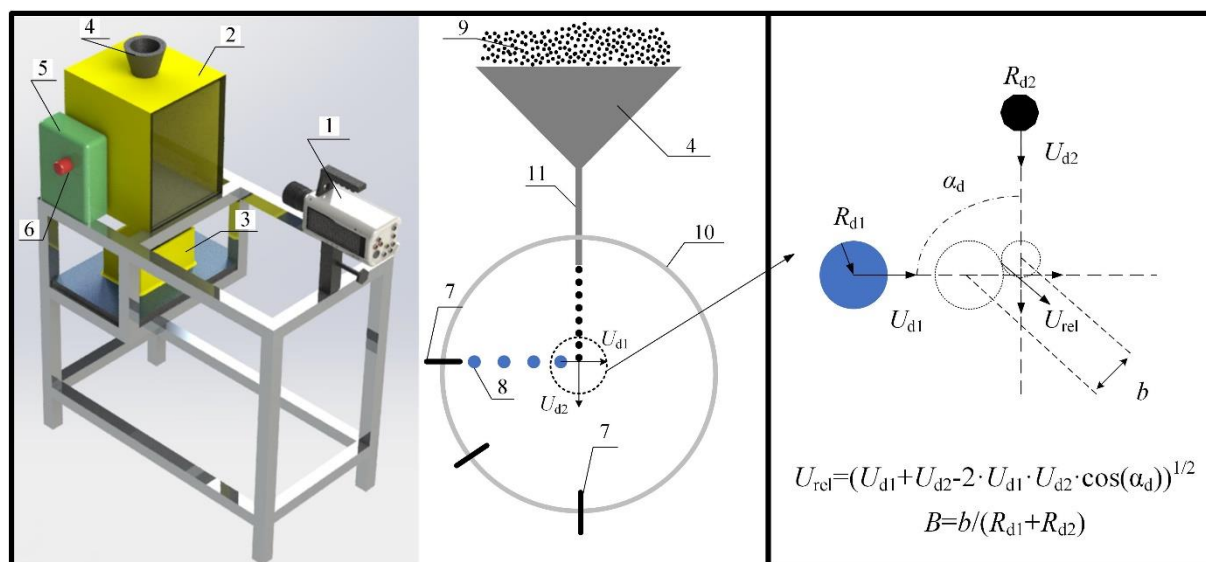


Рисунок 2.2.6 – Схемы стенда №3 и исследования процессов взаимодействия капель с частицами: 1 – видеочкамера; 2 – камера соударений; 3 – емкость для сбора воды и частиц; 4 – воронка для частиц; 5 – бак с жидкостью; 6 – регулятор подачи жидкости; 7 – капилляры подачи капель жидкости; 8 – капли жидкости; 9 – частицы угля; 10 – удерживающее кольцо; 11 – трубка подачи твердых частиц

При обработке исходных столкновений выделялись три режима взаимодействия капель и частиц: коалесценция, разлет и дробление. При коалесценции частица угля налипала на поверхность капли воды, либо же последняя поглощала частицу. В случае сквозного прохождения частицы через каплю воды регистрировался режим разлета. При столкновении угольной частицы с каплей воды и разрушении последней на несколько фрагментов ($N_{fi} > 1$) регистрировался режим дробления. Он реализовывался по двум типичным схемам: разрушение исходной капли на несколько примерно равных фрагментов; образование одной основной капли и нескольких мелких. При обработке

результатов экспериментов выполнялась выборка трех характерных форм угольных частиц: сферическая, параллелепипед и многогранник (рисунок 2.2.7). Также регистрировалось время взаимодействия капли с частицей.

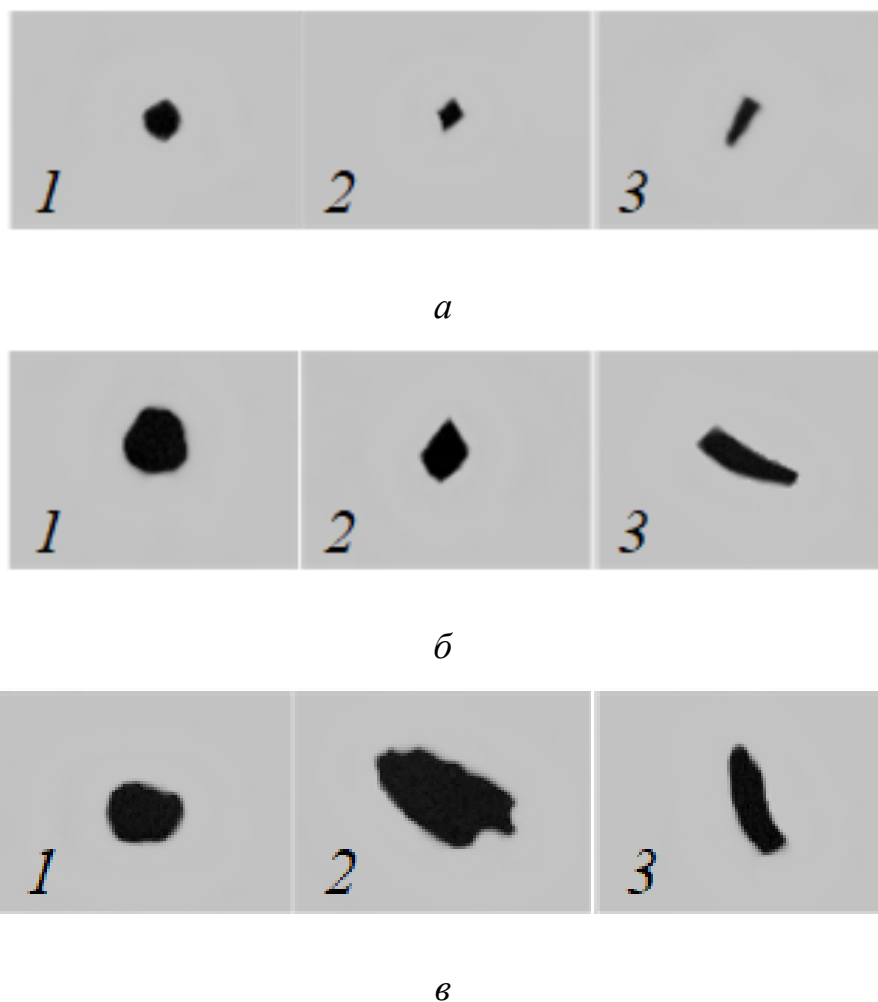


Рисунок 2.2.7 – Типичные разновидности использованных твердых частиц
 (а) $R_p < 0,25$ мм; (б) $0,25 < R_p < 0,5$ мм; (в) $0,5 < R_p < 0,75$ мм: 1 – близкая к сфере;
 2 – многогранник; 3 – параллелепипед

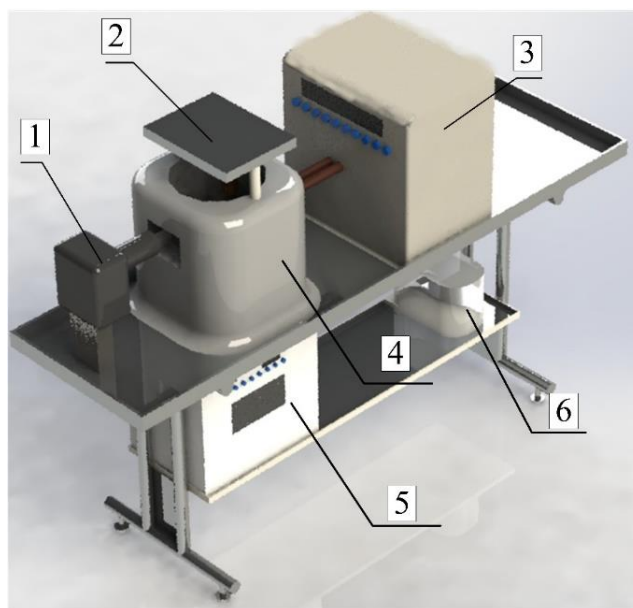
2.3. Соударения капель жидкостей и твердых частиц при варьировании температуры и давления газовой среды

Для варьирования температуры газовой среды использовался стенд №4 с системой индукционного нагрева «ЭЛСИТ-40/20-70» (рисунок 2.3.1), который состоит из: силового блока преобразователя; индуктора; выносного

пульта управления; станции охлаждения СОЖ-1ВТН. Принцип действия установки основан на индуцировании в металле вихревых электрических токов (токов Фуко) под действием высокочастотного переменного электромагнитного поля. В результате реализации этих процессов металлические стенки камеры нагреваются, далее прогревается воздух внутри последней. Охлаждение силового блока преобразователя и индуктора проводится автономно с помощью станции охлаждения СОЖ-1ВТН. Пульт управления позволяет устанавливать необходимые параметры для осуществления работы; производить технологические операции процесса нагрева; отображать параметры рабочего режима, режима программирования, режима отладки и состояния защит; осуществлять программирование параметров. При создании стенда преследовались цели видеорегистрации соударений капель в газовой среде с варьируемой температурой и влажностью. Поэтому использовано жаропрочное кварцевое стекло толщиной 5 мм.



a



б

Рисунок 2.3.1 – Внешний вид (а) и схема (б) стенда №4: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – платформа держателей форсунок; 3 – преобразователь частоты; 4 – теплоизоляция цилиндра из жаропрочных материалов; 5 – пульт управления; 6 – емкость для сбора воды

Процесс взаимодействия капель жидкостей регистрировался высокоскоростной видеокамерой Phantom Miro M310. Частота съемки при проведении экспериментов составляла 5000 кадр/с при разрешении 768x768 пикс. Использовался объектив Nikon 200mm f/4D ED-IF AF Micro-Nikkor (фокусное расстояние 200 мм, диафрагма F4–F32, максимальное расстояние фокусировки 0,5 м. Для подсветки области регистрации применялся светодиодный прожектор (7700 лм, 100 Вт, с регулировкой мощности и углом рассеивания 30°), устанавливаемый напротив видеокамеры. Обработка видеофрагментов осуществлялась в программном обеспечении Phantom Camera Control.

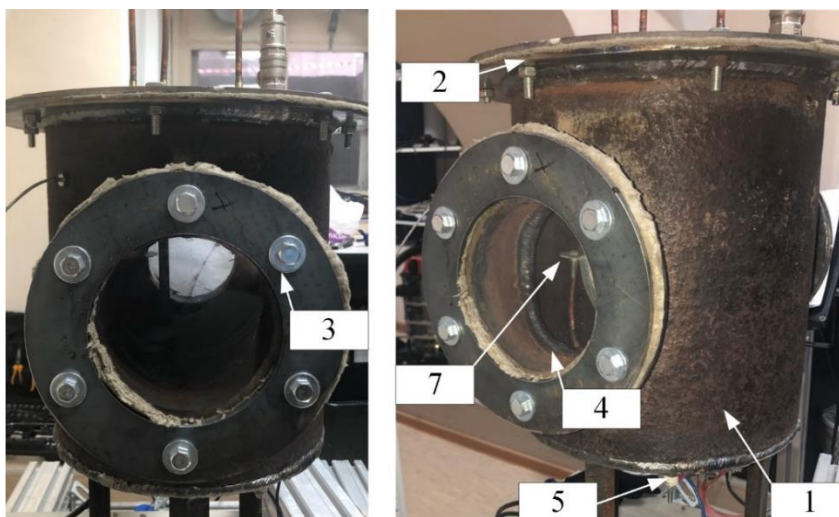
Для проведения исследований по соударению капель при варьировании давления газовой среды Разработан экспериментальный стенд №5, схема и внешний вид которого приведены на рисунке 2.3.2. Спроектирована камера для варьирования давления и температуры газовой среды, представляющая

цилиндр из нержавеющей стали диаметром 25 см и высотой 30 см. В верхней части цилиндра выполнены разъёмные отверстия для стягивания крышки болтами с основной камерой. В крышку установлен штуцер для накачки давления. Капли генерировались с помощью сменных сопел различного диаметра, позволяющие варьировать размеры капель R_d в диапазоне от 0,1 до 0,8 мм. Жидкость к сменным соплам подавалась погружными насосами производительностью до 600 л/ч. Начальная скорость движения капель варьировалась путем регулирования напряжения питания насосов. Начальная скорость движения капель U_d в экспериментах устанавливалась в диапазоне от 0,5 до 10 м/с. Нагрев газовой среды до 100 и 200 °С осуществлялся с помощью воздушных термоэлектрических нагревателей. Регулирование температуры осуществлялось терморегулятором ОВЕН ТРМ500. Температура в камере измерялась с помощью платинородий-платиновой термопарой (тип S) с пределом допускаемых отклонений ± 1 °С.

Давление в камере создавалось и поддерживалось с помощью воздушного компрессора производительностью 170 л/мин и максимальным создаваемым давлением 8 ати, а также вакуумного насоса. Выбор температуры и давления газовой среды в области столкновения капель основан на наиболее часто встречающихся в промышленных установках [30,167,168]. Эксперименты проводились с водой при начальной температуре 20 °С и 80 °С. Свойства воды принимались аналогично раннему исследованию [169], в котором варьировалась начальная температура жидкости.



a



б

Рисунок 2.3.2 – Схема (*a*) и внешний вид (*б*) стенда №5: 1 – камера повышенного давления; 2 – крышка камеры; 3 – крепление смотровых окон; 4 – кварцевое стекло; 5 – ТЭН; 6 – регулятор температуры; 7 – кольцевой держатель сопел

2.4. Соударения капель жидкостей и твердых частиц в спреях

Для проведения экспериментальных исследований использовался модернизированный экспериментальный стенд №5, в котором сопла генерации потока одиночных капель заменены на полосовые форсунки. Схема стенда представлена на рисунке 2.4.1. Капли генерировались с использованием

полосовых форсунок, расположенных под углом 45° друг к другу в одной плоскости. Форсунки генерировали жидкостной факел, который имел угол раскрытия около 60° . Угол атаки (α_d) устанавливался в диапазоне от 0 до 90° , начальные радиусы капель (R_{d1} , R_{d2}) от $0,1$ до $1,2$ мм. Скорости движения капель (U_{d1} , U_{d2}) изменялись от 2 до 12 м/с. Температура воздуха (T_g) в цилиндре варьировалась в диапазоне $20\text{--}400$ °С. Она снижалась в цилиндре после распыления воды на $10\text{--}50$ °С. Поэтому далее по тексту указана температура воздуха в момент начала эксперимента. При определении изменения размера капли в процессе ее движения в разогретой газовой среде использовалось отношение $(R_{d0}-R_{d1})/R_{d0}$, которое учитывает радиусы капли в два фиксированных момента времени, соответствующих входу (R_{d0}) и выходу (R_{d1}) из области регистрации или глубины резкости объектива.

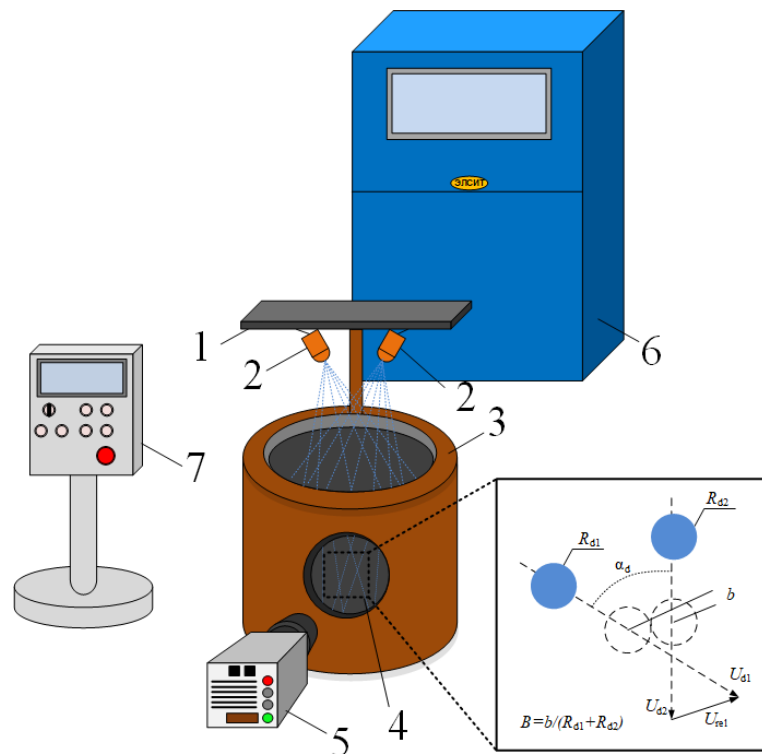


Рисунок 2.4.1 – Схема стенда при регистрации соударений частиц и капель в спреях: 1 – держатель форсунок; 2 – форсунки; 3 – индукционный нагреватель; 4 – область регистрации; 5 – высокоскоростная видеокамера; 6 – транзисторный преобразователь частоты; 7 – блок управления

При подаче жидкости через разогретые каналы форсунок достаточно быстро происходило ее вскипание. Это приводило к периодическому формированию двухфазных капель, т.е. содержащих пузырьки. Последние существенно меняли структуру капель. Важную роль играла толщина пленки жидкости вокруг пузырька. Она менялась произвольным образом. Этот фактор стал основной причиной того, что при обработке видеокadres аэрозольного облака рассматривались капли только при отсутствии в них пузырьков пара, т.е. однофазные капли. Для выполнения этого условия регистрация столкновения капель начиналась с задержкой 5–7 с, чтобы медные подводящие трубки и форсунки успели охладиться ниже температуры кипения жидкости.



Рисунок 2.4.2 – Типичные видеокadres двухфазных капель (вода–пар) после выхода из разогретых форсунок при температуре газовой среды $T_g=100\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$

На первых видеокadres регистрировались капли жидкости, содержащие один или несколько пузырьков пара. Капли имели сильно деформированную форму. Пузырьки пара в них двигались в сторону поверхности, после достижения которой лопались. Это приводило к микро-взрывному дроблению капли [170–172]. При дрейфе пузырьков пара к поверхности в некоторых случаях они объединялись в единый пузырь. В таком случае при дроблении капель с пузырьками пара капли разрушались на большее количество вторичных фрагментов.

Для исследования процессов соударения аэрозольных потоков капель жидкости с твердыми частицами проектировался экспериментальный стенд №6,

представленный на рисунке 2.4.3. Регистрация параметров соударения капель и частиц проводится через два смотровых окна для регистрации соударений и подсветки области взаимодействия. Для регистрации соударений использовалась высокосортная видеокамера Fastcam Mini UX100. Твердые частицы подавались в камеру соударений пневматическим пистолетом. Частицы представляли угольную пыль фракцией менее 1 мм. Уголь измельчался на роторной мельнице Pulverisette 14. Скорость вращения ротора изменялась от 60 до 20000 об/мин в зависимости от необходимой фракции угля. Далее измельченный уголь просеивался при помощи вибрационного грохота Analysette 18. Для распыления частиц к пескоструйному пистолету подключается компрессор. Для варьирования скорости движения частиц на компрессоре выставлялось давление 2–6 кгс/см². Для распыления жидкости в камере соударений используется специализированный пистолет с резервуаром. Такой пистолет подключался к компрессору и за счёт варьирования давления от 2 до 6 кгс/см² изменялись значения скорости движения и размеров капель.

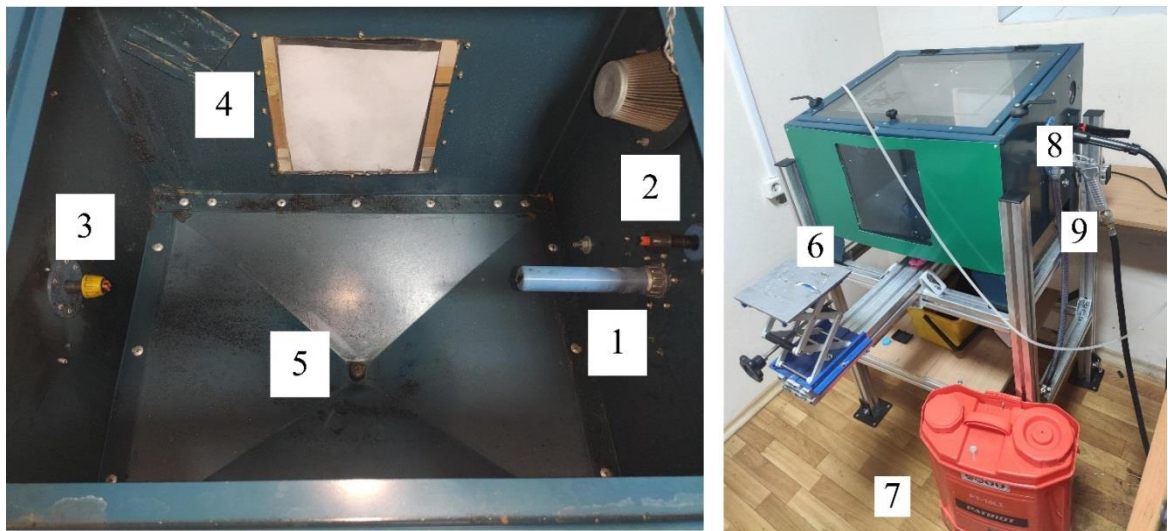


Рисунок 2.4.3 – Внешний вид стенда №6: 1 – форсунка для твердых частиц; 2, 3 – форсунка для жидкости; 4 – прожектор; 5 – камера соударений; 6 – окно для регистрации соударений; 7 – компрессор для распыления жидкости; 8 – клапан регулирования расхода жидкости; 9 – пневматический пистолет

2.5. Выбор составов для изучения влияния вязкости и поверхностного натяжения жидкости на характеристики взаимодействия капель

Определение влияния вязкости жидкости на вторичное измельчение исходных капель проводилось с помощью водных растворов глицерина при различной объемной концентрации (таблица 2.5.1).

Таблица 2.5.1 – Свойства использованных жидкостных составов

Наименование состава	Начальная температура T , °C	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , мН/м	Динамическая вязкость μ , мПа·с
Раствор глицерина, 10 %	20	1022	71,4	1,0
Раствор глицерина, 25 %	20	1060	69,4	2,2
Раствор глицерина, 50 %	20	1126	66,0	6,3
Дистиллированная вода	20	998	72,7	1,0
Раствор Твин-80, 0,5 %	20	998	47,4	1,0
Раствор Твин-20, 0,5 %	20	998	40,1	1,0
Раствор Неонола АФ9-12, 0,5 %	20	998	36,0	1,0

Измерения реологических свойств составов проводились с помощью вискозиметра Brookfield DV3T LV, при комнатной температуре жидкости (20–23 °C). Шпиндели позволяют измерять вязкости жидкостей в широком диапазоне: $\mu=0,5\text{--}6\cdot 10^6$ мПа·с. Скорость вращения шпинделей варьировалась 10–250 об/мин [89]. Погрешность измерения установки в соответствии с ГОСТ Р 53708-2009 [173] (аналог ASTM D445 [174]) составила ± 1 %. Поверхностное натяжение жидкости измерялось методом отрыва кольца [175] на тензиометре KRUSS К6. Тензиометр калибровался путем измерения поверхностного натяжения бидистиллированной воды.

Для проведения экспериментов по соударению капель жидкости в высокотемпературной газовой среде ($T_g=200$ °C) использованы составы, которые позволяли изменять вязкость и поверхностное натяжение в широких диапазонах. Сложность выбора составов заключалась в горении органических добавок при температуре стенки нагревателя около 400 °C и температуре

воздушной среды около 200 °С. В качестве потенциально пригодных для таких экспериментов составов рассматривались водные растворы с массовой концентрацией ПЭГ 6000 [176] 20 %, увеличивающий вязкость жидкости, и Неонола АФ9-12 [177] объемной концентрацией 0,5 %, снижающий поверхностное натяжение жидкости.

Выбор объемной концентрации для раствора Неонола АФ9-12 проводился с учетом обеспечения необходимых свойств состава (понижение поверхностного натяжения) и, в то же время, для сохранения свойств негорючести данного состава.

Добавление в воду полиэтиленгликоля (ПЭГ 6000) массовой концентрацией 20 % позволило увеличить вязкость практически в 11 раз по сравнению с водой (вязкость воды – 1,0 мПа·с, вязкость раствора ПЭГ 6000 – 10,8 мПа·с). Добавление к воде такого поверхностно-активного вещества, как Неонол АФ9-12 в объемной концентрации 0,5 %, позволило уменьшить поверхностное натяжение жидкости в 1,5 раза (поверхностное натяжение воды – 72,7 мН/м, вязкость раствора Неонола АФ9-12 – 48,0 мН/м). Свойства составов использованных для варьирования динамической вязкости и поверхностного натяжения приведены в таблице 2.5.2.

Таблица 2.5.2 – Свойства исследуемых составов

Состав	Температура, °С	Температура вспышки, °С	Плотность ρ , кг/м ³	Динамическая вязкость μ , мПа·с	Поверхностное натяжение σ , мН/м
Раствор ПЭГ 6000, 20 %	20	400	1058	10,8	66,0
Раствор Неонола АФ9-12, 0,5 %	20	–	998	1,0	48,0

Измерения динамической вязкости проводилось при двух температурах, 20 °С и 90 °С. Результаты измерений представлены в таблице 2.5.3.

Таблица 2.5.3 – Поверхностное натяжение жидкостей при различных температурах

Состав	Температура, °С	Динамическая вязкость μ , мПа·с
Раствор ПЭГ 6000, 20 %	25	10,8
	90	3,3
Раствор Неонола АФ9-12, 0,5 %	25	1,0
	90	1,0

Обобщенные результаты высокую пригодность растворов с массовой концентрацией ПЭГ 6000 20 % и Неонола АФ9-12 объемной концентрацией 0,5 % для экспериментов по столкновению капель в высокотемпературной среде. Это связано с тем, что они имеют меньший выход вредных веществ в сравнении, например, с пожаротушащими составами (в частности, с антипиреном), так как при высокой температуре последний выделяет аммиак, который вытесняет воздух из зоны горения, и таким образом подавляет горение. Измерение температуры воспламенения и вспышки и наличие дыма или летучих выделений при повышенной температуре проводилось в индуктивном нагревателе с помощью неподвижной металлической подложки. Капли составов помещались на подложку с ее последующим нагревом. Используемые составы являются негорючими вследствие малой концентрации в воде органических добавок (ПЭГ 6000 и Неонол АФ9-12).

Для изучения закономерностей трансформации границы сталкивающихся капель составов с разными свойствами в базовую жидкость – воду добавлялся Rhodamine В [178]. Флуорофор Rhodamine В способен поглощать свет длиной волны 500–560 нм и эмитировать свет длиной волны 570–650 нм [178]. Поэтому для возбуждения светимости использован непрерывный лазер FTI OPTRONIC мощностью 10 Вт, длина волны 532 нм. Для удаления отраженного от капель излучения на длине волны лазера (532 нм) на объективы камер устанавливались полосовые светофильтры с полосой пропускания 590 ± 10 нм. Таким образом, капля-мишень содержала Rhodamine В. В емкость, из которой генерировались

капли-снаряды, добавлялся краситель с концентрацией 5 г/л. В состав данной красящей добавки входят [179]: дистиллированная вода, глицерин, сульфат железа, декстрин, латекс, этанол, щавелевая кислота. Так как концентрация составляющих, которые способны изменить свойства воды, в составе гелиевой краски крайне мала, то принято допущение о том, что свойства воды при добавлении выбранных красителей изменились несущественно относительно воды без примесей.

Для проведения экспериментальных исследований по взаимодействию твердых частиц с жидкостью (водой) применялись угли разных марок: бурый (Б) (Назаровское месторождение, Красноярский край, Россия); слабо спекающийся (СС) (разрез Черниговский, Кемеровская область, Россия); тощий (Т) (разрез Калтанский, Кемеровская область, Россия). Выбор данных марок углей основан на существенном отличии их гидрофобных и гидрофильных характеристик. Для определения гидрофильности использовался метод статического контактного угла [180]. Для этого уголь измельчался и спрессовывался в таблетку диаметром около 12 мм и высотой 10 мм при помощи гидравлического пресса с давлением 10 т/см². Далее приготовленная таблетка помещалась на плоскую подложку. При помощи дозатора генерировалась капля дистиллированной воды объёмом 10 мкл. Затем она помещалась на поверхность таблетки. Сила гравитации не оказывает значительного влияния на контактный угол, когда радиус капли меньше капиллярной постоянной (3,83 мм, определена при теплофизических параметрах, соответствующих условиям проведения эксперимента) [181]. Для определения контактного угла применялся источник света с преобразователем рассеянного в плоскопараллельный свет. При помощи фотокамеры NIKON D7100 получалось теневое изображения. Далее полученные изображения обрабатывались специализированными методами гониометрии (LB-ADSA, «тангенциальным 1», «тангенциальным 2») [180]. Определялись геометрические параметры капли: контактный угол, диаметр, высота. Так, например, контактные углы для углей марок Т, СС и Б, соответственно, составили: 74.4°, 98.4° и 97.2°. На основе

результатов исследований сформулированы вывод о том, что самым гидрофобным используемым образцом является уголь марки СС, а гидрофильным – уголь марки Т. Все угли измельчались на роторной мельнице Pulverisette 14 (мощностью 1200 Вт), которая предназначена для быстрого и эффективного измельчения твердых материалов. Скорость вращения ротора изменялась от 60 до 20000 об/мин в зависимости от необходимой фракции угля. Далее измельченный уголь просеивался при помощи вибрационного грохота Analysette 18. Для этого в грохот помещались 4 сита. Первое из них позволяло отсеять частицы размерами более 1,5 мм, которые исключались из дальнейших исследований. Далее стояло сито размерами ячейки 1 мм. То есть, частицы, которые не прошли во второе сито, имели размеры от 1 мм до 1,5 мм. Третье сито имело размер ячейки 0,5 мм, четвертое – 0,25 мм. После просева угля выделялись три группы частиц размерами: 1–1,5 мм; 0,5–1 мм; 0,25–0,5 мм.

Выводы по второй главе

1. Проведен анализ свойств и состава жидкостей, целесообразных для экспериментального исследования взаимодействия движущихся капель и их вторичного измельчения за счет столкновений и позволяющих воспроизвести условия реализации аналогичных процессов в энергетических системах с газопарокапельными потоками.
2. Изучен мировой опыт развития методик вторичного измельчения жидкости. На основе сравнительного анализа предложена новая методика определения параметров движущихся капель, их столкновения и вторичного измельчения, включающая размеры и скорости движения капель, угол атаки и свойства капель жидкости.
3. Создан стенд для проведения экспериментальных исследований по изучению параметров столкновения движущихся капель жидкостей при нормальных

условиях, в условиях повышенной температуры и влажности и при нагреве исследуемых составов.

4. Создан стенд индукционного нагрева газовой среды для изучения особенностей взаимодействия движущихся капель жидкостей в высокотемпературной газовой среде. Данный стенд позволяет изучать параметры столкновения капель и вторичных фрагментов после дробления при температуре воздуха до 700 °С.
5. Создан стенд для определения межкапельной границы сталкивающихся капель и ее трансформации при дальнейшем движении капель. Предложена методика определения состава вторичных фрагментов при дроблении, разлете и коалесценции исходных капель.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Бинарные соударения капель жидкостей в энергетическом оборудовании

На сегодняшний день практически отсутствуют результаты исследований влияния солености воды на режимы соударений капель. Как правило, исследования направлены на изучение влияния свойств жидкости (вязкость, плотность, поверхностное натяжение). Для этого в воду добавляют специализированные компоненты (например, глицерин, ПАВ) [182], позволяющие варьировать перечисленные свойства в широких диапазонах, т.е. используют так называемые модельные жидкости. Однако в настоящем подразделе основной акцент сделан на проведение экспериментальных исследований с водой, имеющей характеристики, максимально приближенные к технологическим.

Эксперименты проводились при температуре окружающей среды и жидкости около 20 °С, так как при более высоких температурах концентрации примесей могут существенно меняться от эксперимента к эксперименту. В опытах варьировались размеры капель, скорости их движения и углы атаки в типичных для промышленных приложений диапазонах. В качестве экспериментальных жидкостей использованы: водопроводная вода, талая снеговая вода, два типа минеральной воды с примесями в виде солей на примере слабой (4–7 г/л) и средней (12–18,5 г/л) степени минерализации. Регистрировались режимы столкновений капель, количество и размеры вторичных фрагментов. Установлены отличия режимов соударений и распределений вторичных фрагментов по размерам. Вычислены площади поверхности жидкости после и до распада. Выполнено сравнение результатов с известными данными для капель различных жидкостей. Показаны условия, при которых наличие примесей в воде оказывает существенное влияние на режимы и характеристики соударений капель.

Изменение свойств воды осуществлялось только за счет изменения концентрации растворенных в ней солей. В исследованиях использованы: минеральная вода с разной степенью минерализации, талая и водопроводная вода. Минерализация жидкости представляет количественную концентрацию всех растворенных в воде минеральных веществ и веществ органического происхождения. Состав исследуемых жидкостей приведен в таблице 3.1.1, а свойства – в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.1 – Содержание примесей в исследованных жидкостях [183].

Наименование	Ионный состав		Минерализация, Анионы, г/л
	Анионы, г/л	Катионы, г/л	
Минеральная вода № 1	HCO ₃ ⁻ : 6-8 SO ₄ ²⁻ <0,05 Cl ⁻ : 2,3-4,3	Na ⁺ , Ca ⁺ : 3,5-6 Ca ²⁺ <0,25 Ca ²⁺ <0,25	12,0–18,5
Минеральная вода № 2	HCO ₃ ⁻ : 2,3-4 SO ₄ ²⁻ <0,15 Cl ⁻ : 0,2-0,65	Na ⁺ , Ca ⁺ : 1-3 Ca ²⁺ <0,05 Ca ²⁺ <0,1	4,0–7,0
Талая снеговая вода	---	---	Менее 0,1

Таблица 3.1.2 – Свойства исследованных жидкостей [183].

Наименование	Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, мПа·с	Поверхностное натяжение, мН/м
Минеральная вода № 1	20	1010–1016,5	1,1	76,5
Минеральная вода № 2	20	1002–1005	1,1	74,0
Талая снеговая вода	20	1000	1,0	60,4
Водопроводная вода [184]	20	1000	1,0	73,1
Дистиллированная вода [157]	20	998	1,0	72,7

Значительное снижение объемов забора воды для подпитки оборотной системы охлаждения на ТЭС может быть достигнуто за счет использования слабоминерализованных сточных вод от других производственных систем без или после их очистки. К таким водам относятся [185,186]: дождевые и талые с территории предприятия, стоки от промывки котлов, взрыхляющие и промывочные жидкости фильтров водоподготовительных установок,

продувочные воды котлов, вода после охлаждения подшипников вращающихся механизмов и другие нефтесодержащие стоки после их очистки от нефтепродуктов.

При изучении характеристик столкновений капель минерализованной жидкости зарегистрированы важные закономерности. Выделены четыре режима столкновения капель: дробление, коалесценция, отскок и разлет. На рисунках 3.1.1–3.1.3 представлены типичные видеокadres экспериментов с иллюстрацией столкновений капель воды с разной степенью минерализации.

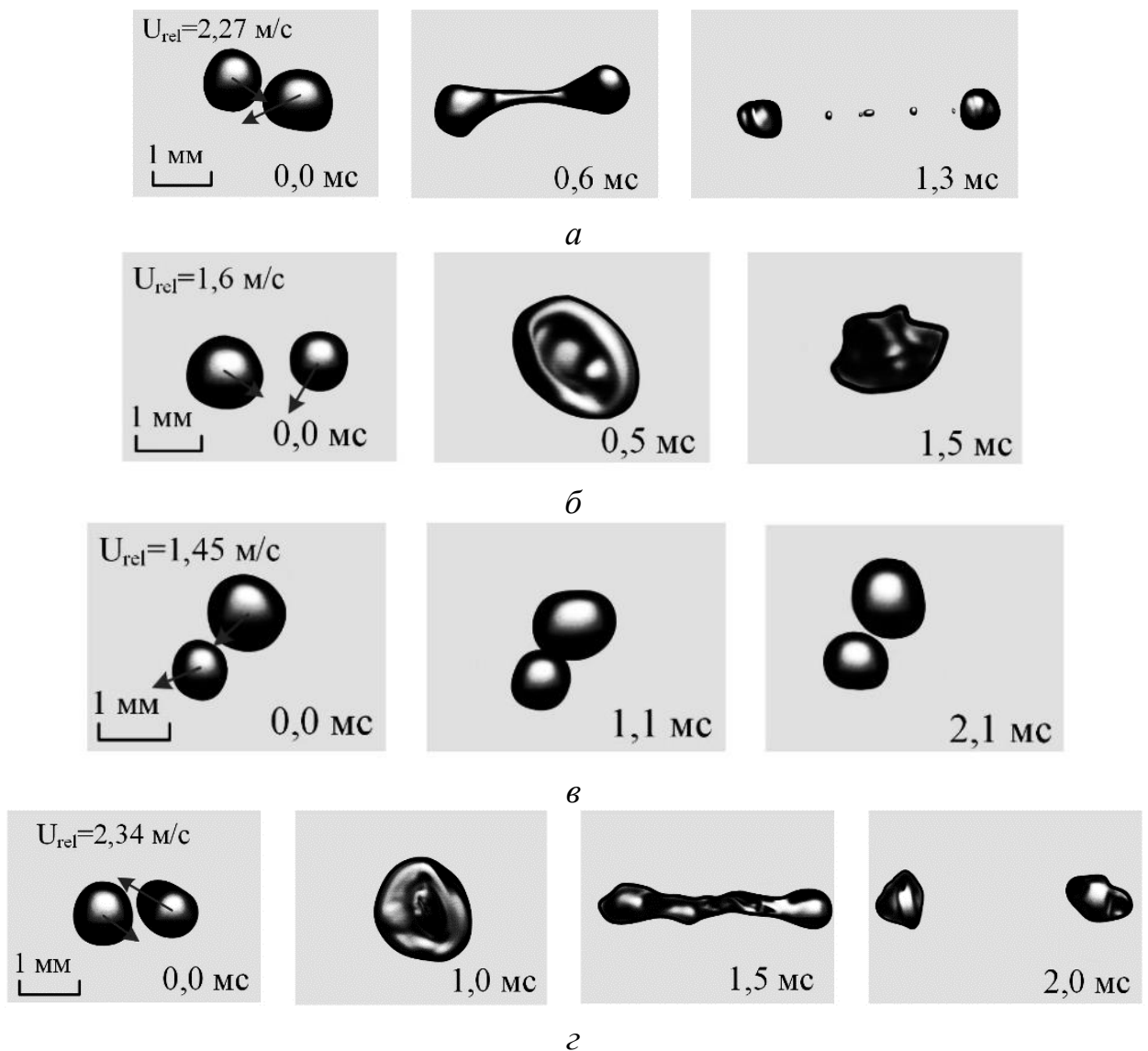


Рисунок 3.1.1 – Типичные видеокadres столкновения капель при $T_{\text{liq}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минерализации жидкости 12–18,5 г/л [183]: *а* – дробление; *б* – коалесценция;

в – отскок; *з* – разлет

Приведенные на рисунке 3.1.1 кадры экспериментов для капель с минерализацией жидкости, равной 12,0–18,5 г/л, показали, что для режима дробления (рисунок 3.1.1а) характерно образование тонкого перешейка между каплями с последующим его дроблением и формированием 5–9 мелких и двух крупных капель. Видеограммы дробления капель показывают, что при центричном сильном ударе ($B < 0,3$; $We > 50$) дробление капель происходило с образованием нескольких ($N_{fi} > 4$) вторичных фрагментов практически идентичного размера. Форма вторичных капель сферичная и в процессе движения в газовой среде существенно не меняется. Коалесценция капель (рисунок 3.1.1б) происходит при меньших скоростях движения капель вследствие образования прочного пленочного кольца. Формирующееся кольцо вращается и деформируется, т.е. интенсивно сжимается и разжимается при движении. Поведение капель при отскоке (рисунок 3.1.1в) в зависимости от концентрации растворенных солей изменялось несущественно. К основному различию составов отнесется несколько усиливающаяся деформация капель после взаимодействия при увеличении солености воды. Исходом коалесценции капель являлась крупная капля неправильной формы, существенно отличающейся от сферической. Данная результирующая капля интенсивно деформировалась при дальнейшем движении в газовой среде. Разлет капель (рисунок 3.1.1г) происходит с образованием кольца (как и на начальном этапе коалесценции капель), которое при дальнейшем движении в газовом потоке вытягивалось, происходило образование перешейка между исходными каплями. После этого регистрировалось разделение такого вытянутого агломерата на две капли неправильной формы.

При снижении степени минерализации капель (4–7 г/л) продолжительность дробления капель (рисунок 3.1.2а) увеличивалась. Образовывался перешеек, толщина и длина которого больше по сравнению с каплями большей минерализации (рисунок 3.1.2а). Далее происходил распад такого жидкого мостика на 2 крупных и 5–8 мелких фрагментов.

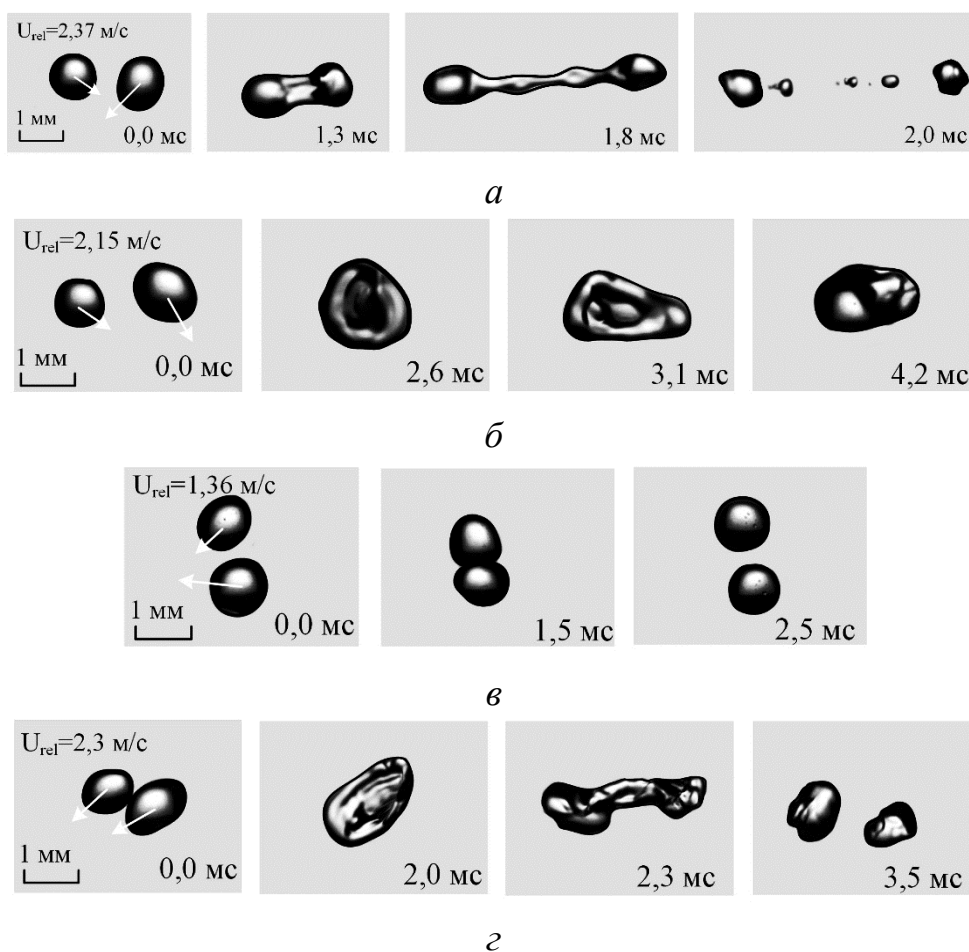


Рисунок 3.1.2 – Типичные видеокadres столкновения капель при $T_{liq}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минерализации жидкости 4–7 г/л [183]: *а* – дробление; *б* – коалесценция; *в* – отскок; *г* – разлет

Продолжительность процесса коалесценции капель также увеличивалась. Однако капля быстрее принимала правильную (т.е. близкую к сферической) форму (рисунок 3.1.2б). Установлено, что при повышении минерализации жидкости разлет капель (рисунок 3.1.2в) сопровождается образованием более массивного перешейка по сравнению с режимом разлета капель жидкости меньшей степени минерализации.

На рисунке 3.1.3 приведены видеокadres экспериментов с талой снеговой водой. Основная особенность взаимодействия капель талой жидкости заключалась в образовании длинного тонкого перешейка между каплями в

режиме дробления (рисунок 3.1.3а) и широкого мостика при коалесценции капель (рисунок 3.1.3б). На рисунке 3.1.3в показано, что режим отскока сопровождается деформацией капель при их столкновении. Отскочившие капли имеют форму эллипсоидов и после этого вращаются в течение длительного периода времени. Общей закономерностью, установленной при обработке видеogramм столкновения капель талой снеговой воды, является ускоренное принятие каплями сферической формы. Эта закономерность регистрировалась во всех режимах взаимодействия. Также регистрировались деформации поверхности капель, характерные при высокой вязкости жидкости, описанные, например, в [157].

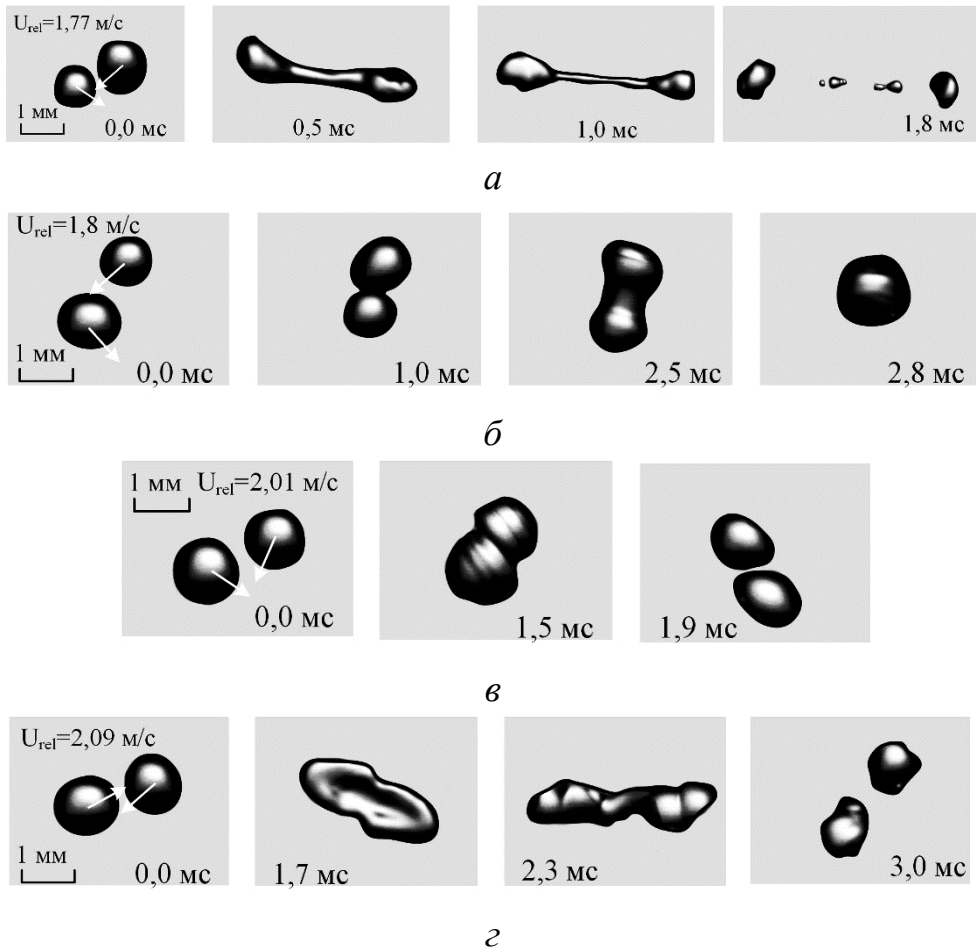


Рисунок 3.1.3 – Типичные видеок cadры столкновения капель талой воды при $T_{liq}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [183]: *a* – дробление; *б* – коалесценция; *в* – отскок; *г* – разлет

На рисунке 3.1.4 представлена построенная по результатам опытов карта режимов взаимодействия капель воды с различным содержанием растворенных примесей. Выполнено сравнение с результатами предыдущих экспериментов, где использовалась водопроводная [184] и дистиллированная [157] вода. Для всех составов обоснована возможность реализации четырех режимов взаимодействия: отскок, коалесценция, разлет и дробление. Анализ представленной карты показывает, что с увеличением концентрации примесей критические значения We (граничные) режимов разлета и дробления смещаются в сторону меньших значений числа Вебера, т.е. при меньших аэродинамических сопротивлениях возможны переходы от отскока к коалесценции, далее к разлету и дроблению. Кроме этого, для талой снеговой воды выявлена дополнительная область отскока при $We=40-80$ и $B>0,7$, т.е. отскок реализовывался не только при малых значениях числа Вебера, как для других разновидностей воды. Данная область характеризуется касательными ударами капель. Вследствие этого происходит их небольшая деформация без нарушения целостности поверхности. Снижение критических значений числа Вебера с ростом минерализации объясняется увеличением центров неоднородности в структуре жидкостей капель, обусловленных присутствием солей. Данные центры служат точками разделения в структуре капли воды и способствуют более интенсивному дроблению капель. На рисунке 3.1.4а выделены существенные отличия критических значений числа Вебера для реализации режима дробления у водопроводной и дистиллированной воды относительно данных для минеральной и талой воды. Основной причиной данного расхождения связаны с увеличением средних размеров капель в экспериментах. Однако даже при таких существенных расхождениях критических значений We прослеживается общая динамика снижения значения числа Вебера с увеличением концентрации растворенных веществ в воде. На рисунке 3.1.4а показано, что содержащие естественные примеси, капли водопроводной воды начинают дробиться при $We=55-120$ (зависимости от B), для дистиллированной же воды дробление капель начинается в диапазоне $We=70-140$.

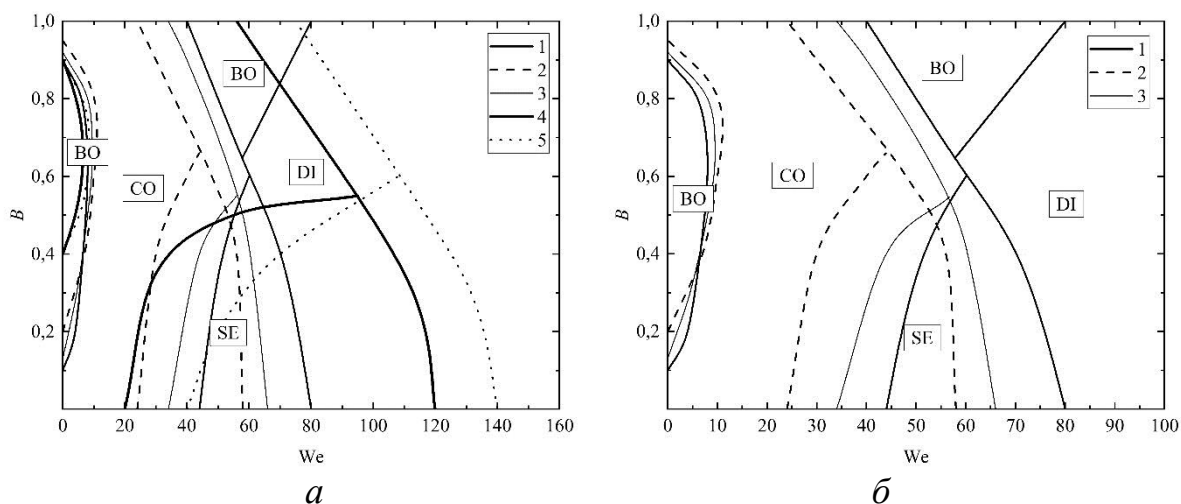


Рисунок 3.1.4 – Карта режимов столкновения одиночных капель в системе $B(We)$, $R_d=0,7-1$ мм [183]: 1 – талая вода; 2 – минеральная вода № 1; 3 – минеральная вода № 2; 4 – водопроводная вода [184]; 5 – дистиллированная вода [157]

Конвективные потоки в каплях вызваны главным образом капиллярными потоками, направляющими жидкость к линии раздела сред. Результатов экспериментальных исследований таких потоков очень мало. Это обусловлено тем, что при использовании оптических методов кривизна поверхности капли вносит значительную погрешность. В каплях воды с содержанием солей имеется градиент концентраций, который интенсифицирует движение жидкости. В талой снеговой воде также присутствует небольшой градиент концентраций, который обусловлен физической невозможностью поддержания стерильными устройства и каналы подачи жидкости. Конвективные потоки в жидкости способствуют созданию неоднородных полей скорости и линий тока в каплях. При соударении капель неоднородные структуры жидкости разделяются проще, чем, например, однородные структуры в каплях дистиллированной воды. Для уточнения причин изменения положения границ режимов проведена серия экспериментов с регистрацией структуры капель разных типов воды с помощью микроскопической фотосъемки. На рисунке 3.1.5 видны примеси, присутствующие в минеральной и талой снеговой воде. Так, например, в минеральной воде обнаружены нерастворенные кристаллы соли, выпадающие в осадок, и пузырьки газа. В талой

снеговой воде идентифицировано множество нерастворимых частиц и примесей размером 4–11 мкм. Подобные твердые примеси способствуют интенсификации измельчения жидкости и снижению критических значений числа Вебера для реализации процесса дробления. Для минеральной воды №1, обладающей наибольшей концентрацией солей, также установлена и наибольшая концентрация нерастворенных кристаллов соли. На части изображения, соответствующей минеральной воды №2, видно, что на нерастворенных кристаллах соли образуются пузырьки газа, которые впоследствии способствуют дроблению капли.

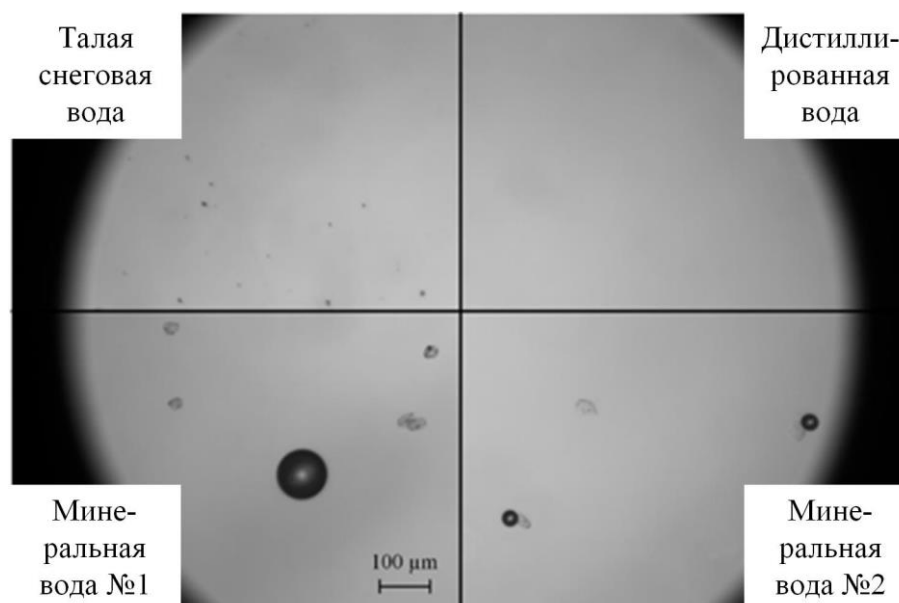


Рисунок 3.1.5 – Кадры, полученные при микроскопической фотосъемке [183]

Одной из важных задач изучения характеристик процессов дробления капель при их столкновении является достижение максимального отношения площади поверхности капель после и до соударения. На рисунке 3.1.6 представлены установленные зависимости отношения поверхности жидкости после и до столкновения капель от значения числа Вебера.

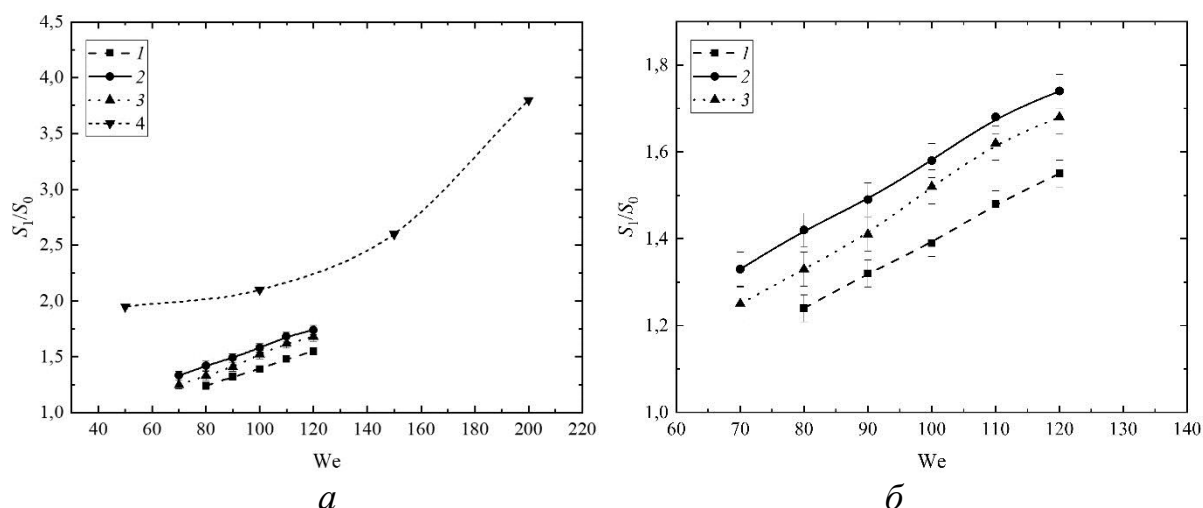


Рисунок 3.1.6 – Соотношение площадей поверхности вторичных и исходных капель при их столкновении, $B=0-0,3$, $R_d=0,7-1$ мм [183]: 1 – талая вода; 2 – минеральная вода № 1; 3 – минеральная вода № 2; 4 – водопроводная вода [184]

Для сравнения эффективности измельчения минеральной и водопроводной воды на рисунке 3.1.6а приведены данные [184]. Как отмечено при анализе видеок кадров (рисунки 3.1.1–3.1.3), с ростом концентрации примесей в воде увеличивается количество вторичных фрагментов. Для детального анализа влияния минерализации воды на ее измельчение на рисунке 3.1.6б приведены зависимости S_1/S_0 при $We=70-120$. Максимальные значения S_1/S_0 установлены для минеральной воды № 1, содержащей наибольшую концентрацию растворенных солей. Однако измерения вязкости и поверхностного натяжения жидкостей показало, что данная вода обладает максимальными значениями из числа исследованных составов. Из полученных зависимостей видно, что даже при минимальных значениях We для реализации режима дробления свободная площадь поверхности воды после столкновения капель увеличивается на 20 %. Максимальные значения S_1/S_0 для выбранных экспериментальных условий получены при $We=120$ и составили от 51 % для талой снеговой воды до 82 % для минеральной воды № 1, содержащей 12,0–18 г/л растворенных солей. Существенные отличия значений критического числа Вебера для водопроводной [184] и минерализованной (настоящее исследование) воды объясняется разными размерами капель в экспериментах. В [184] капли имели размер до 2 мм, что

способствовало значительному увеличению отношения свободной площади поверхности после и до взаимодействия даже при низких значениях We . Если учесть вклад фактора размера капель, то обсуждаемые отличия будут не такими существенными.

Распределение вторичных фрагментов по размерам показывает количественный состав капель и демонстрирует степень однородности множества образованных фрагментов жидкости. Нормированные распределения размеров результирующих фрагментов по размерам после дробления для различных типов воды приведены на рисунке 3.1.7.

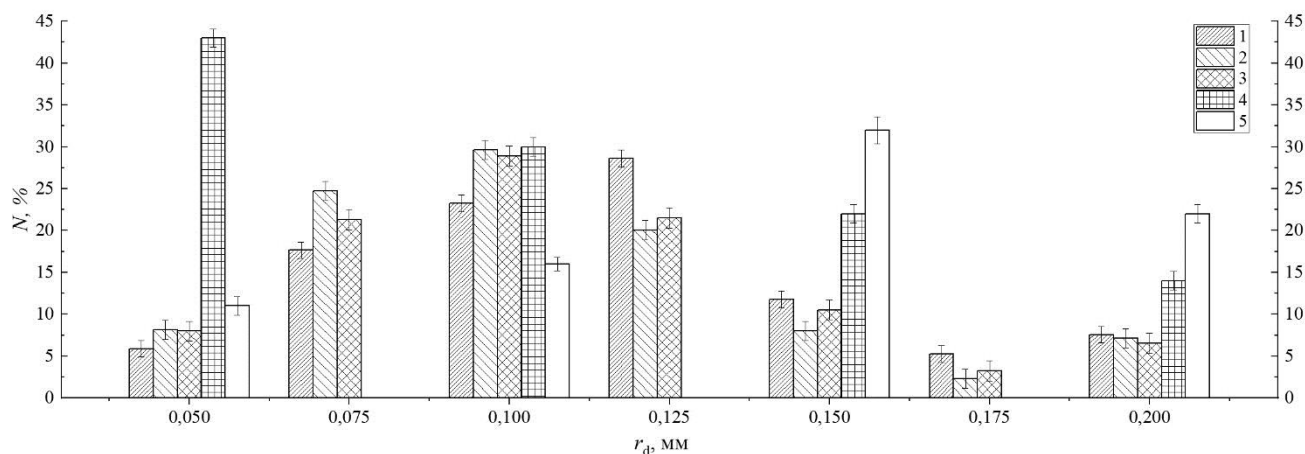


Рисунок 3.1.7 – Распределения размеров результирующих фрагментов по размерам после дробления капель воды разного качества при $We=40-50$, $\Delta > 0,7$ [183]: 1 – талая; 2 – минеральная № 1; 3 – минеральная № 2; 4 – водопроводная [184]; 5 – дистиллированная [157]

Выполнено сравнение данных для водопроводной [184] и дистиллированной [157] воды. Показано, что с увеличением концентрации растворенных примесей распределение вторичных фрагментов смещается в сторону меньших размеров r_d . Внешний вид кривых для вторичных фрагментов соответствует логнормальному распределению. Пик распределения для талой снеговой воды приходится на $r_d=0,125$ мм. Распределение вторичных фрагментов минеральной воды № 1 имеет пик около $r_d=0,1$ мм, как и для минеральной воды

№ 2. Основным отличием распределений при разной минерализации воды стало большее количество вторичных фрагментов более соленой воды № 1 около $r_d=0,075$ мм. Это является следствием большего количества растворенных элементов, приводящих к облегчению дробления жидкости. Подтверждением данного предположения является увеличение поверхностного натяжения и динамической вязкости минеральной воды № 1 и № 2 относительно талой снеговой (таблица 3.1.1). Распределение вторичных фрагментов для водопроводной воды [184] значительно отличается от талой снеговой и минеральной воды. Одной из причин такого отличия изучаемых зависимостей является более крупный шаг при построении рисунков в [184], отличающийся в 2 раза от использованного в настоящем исследовании. Если сравнивать распределения для водопроводной воды при идентичных масштабах построения распределений, то отличия будут существенно меньше. Таким образом, правомерен вывод об удовлетворительной корреляции результатов настоящего исследования с данными [184] и существенном вкладе примесей солей в процессы распада капель и формирования аэрозолей. Соответственно, данный фактор целесообразно учитывать при развитии технологий первичного и вторичного измельчения капель составов на основе воды с различными примесями.

Проведенные эксперименты позволили установить особенности взаимодействия капель воды с различной концентрацией растворенных солей. Подобные типы жидкостей являются рабочими средами в различных теплообменных аппаратах, таких как выпарные установки, градирни, обессоливающие установки и др. Результаты изучения вопросов повышения эффективности работы сухих градирен с распылением соленой воды открывают новые перспективы развития данной тематики. Также установлено, что на карте режимов талой снеговой воды появляется дополнительная область отскока при значении безразмерных параметров $We=40-80$ и $B>0,7$. Средняя (до 18,5 г/л) концентрация растворенных солей способствует увеличению площади свободной поверхности после дробления на 16–20 % относительно талой снеговой воды,

практически не содержащей примесей. Эксперименты с водой, имеющей соленость более 4 г/л, дают дополнительные знания о процессах, протекающих в опреснительных и водоочистных установках, использующих соленую морскую воду или сточную воду промышленных предприятий. Развитием данного исследования может стать изучение столкновения капель воды с нерастворимыми примесями.

Так как в промышленных теплообменных установках температура технологических жидкостей может меняться в широком диапазоне, целесообразно изучить влияние нагрева жидкости на последствия соударений капель. Результаты экспериментальных исследований процессов взаимодействия капель воды при различных начальных температурах продемонстрировали новые особенности. Температура первой и второй капель воды составляла 20 °С и 90 °С, соответственно. Устойчивая реализация режима дробления с учетом влияния температуры нагрева является важным аспектом в работе теплообменного оборудования и газопарокапельных технологий. Установлено влияние температуры на значения критического числа Вебера для всех режимов взаимодействия. Показано, что для дробления капель с температурой около 90 °С критические (переходные между режимами) значения We снизились на 10-30 %, разлета на 5-15 %, коалесценции уменьшилось на 15-35 %, отскока увеличилось на 50-80 %. Количество образованных вторичных фрагментов для капель с температурой 90 °С увеличилось на 5-20 % относительно температуры 20 °С.

На рисунке 3.1.8 приведены карты режимов соударения капель. Так как с увеличением температуры воды снижается поверхностное натяжение, то критические значения числа Вебера для перехода между режимами меняются. Карта режимов построена относительно капель с температурами 20 °С и 90 °С. Анализ полученных зависимостей (рисунок 3.1.8) показал, что критические значения We для режима отскока возрастают, т.е. более широкий диапазон We соответствует условиям отскока. Такой эффект обусловлен двумя причинами. Во-первых, капля при температуре 90 °С интенсивно испаряется и когда

относительная скорость движения мала (значение числа Вебера менее 15), то пары вблизи поверхности капли создают буферную паровую зону, тем самым снижая скорость движения подлетевшей капли, т.е. замедляется сближение капель. При таких условиях капли не соприкасаются, т.е. капля, обладающая меньшей температурой, соприкасается с паровой буферной зоной в окрестности второй капли. Такое соприкосновение приводит к снижению относительной скорости. Ее значение мало и не позволяет повысить кинетическую энергию в зоне контакта для слияния капель. Происходит отскок. Во-вторых, это объясняется разницей размеров капель. За счет снижения поверхностного натяжения происходит трансформация такой капли. Так как у капли с температурой 20 °С поверхностное натяжение, вязкость и плотность выше, то она отталкивает каплю при температуре 90 °С, вследствие чего и происходит отскок.

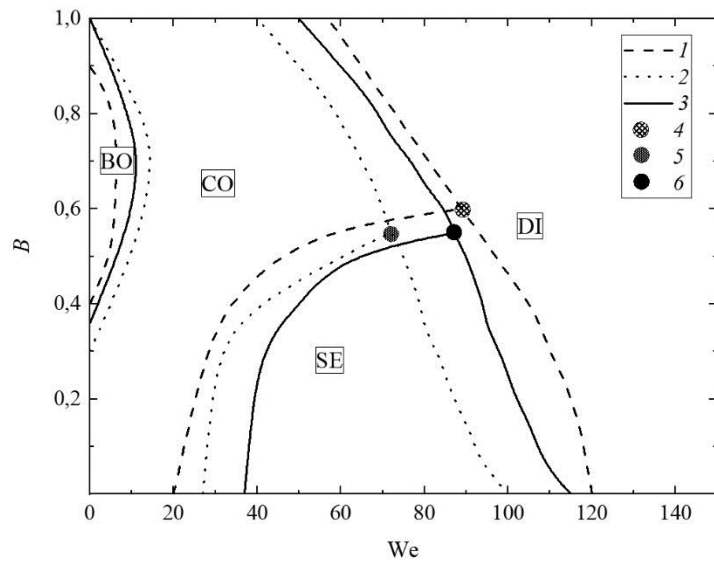


Рисунок 3.1.8 – Карты режимов взаимодействия капель воды [184]: 1 – 20 °С; 2 – 90 °С; 3 – результаты из опытов с 90 °С, при расчёте значения числа Вебера использованы свойства воды при 20 °С; 4 – тропическая точка при 20 °С; 5 – тропическая точка при 90 °С; 6 – тропическая точка при 90 °С, при расчёте числа Вебера использованы свойства воды при 20 °С

Значения критического числа Вебера для режима дробления снижаются на 20–30 % для капель с температурой 90 °С относительно капель при температуре 20 °С. Такой эффект связан с уменьшением поверхностного натяжения при росте температуры жидкости и высокой относительной скоростью движения капель. За счет уменьшения значения критического числа Вебера для режима дробления и его увеличения для отскока диапазоны по We для границ режима коалесценции уменьшаются на 30–50 %. Но при уменьшении значения линейного параметра взаимодействия относительно значения 0,5 реализуется режим разлета. Диапазон по We для капли с меньшей температурой больше на 5–20 % относительно границы при 90 °С. Тем самым граница перехода к коалесценции расширяется на 5–15 % по значению We .

Установлено, что времена взаимодействия капель с температурой 90 °С значительно больше, чем при 20 °С. Это связано с интенсивным испарением жидкости с поверхности нагретых капель, которое приводит к уменьшению относительной скорости перемещения при сближении. При рассмотрении одновременно капель с температурами 20 °С и 90 °С времена взаимодействия снижались, так как интенсивно испарялась лишь одна капля. Для всех капель прослеживалась тенденция минимального времени для процесса дробления (за счет высокой скорости движения капель). Максимальное время взаимодействия приходилось на режим коалесценции за счет долгой трансформации капли после соударения. Полученные результаты хорошо соответствуют заключениям [20], в соответствии с которыми установлено, что столкновения капель с разными свойствами жидкости приводят к эффекту замедленной коалесценции. Причина такого эффекта заключается в том, что воздух попадает между сближающимися каплями и ему необходимо определенное время, чтобы покинуть эту зону. Такой же эффект наблюдается и для отскока капель, когда капли не коагулируют в течение долгого времени и далее совсем расходятся. Задержка слияния капель приводит к изгибу на границе контакта.

В процессе движения капля с температурой $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивно испаряется, но время движения в области регистрации мало. Это приводит к незначительному уменьшению размера (3–6 %). В реальной практике данные значения могут быть гораздо больше. На рисунке 3.1.8 приведена режимная карта. Число Вебера зависит от поверхностного натяжения. С увеличением температуры жидкости оно снижается, и это приводит к уменьшению значения числа Вебера при остальных неизменных параметрах. Для учета процесса испарения капель проведено вычисление значения числа Вебера относительно капель с температурой около $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, но свойствами жидкости при $T_{\text{liq}} \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой подход к определению значений числа Вебера позволяет учесть вклад фактора испарения капли. Если же учитывать свойства жидкости при температуре около $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и обрабатывать результаты опытов для нагретых капель, то сложно отделить фактор испарения и пониженного поверхностного натяжения за счет роста температуры. Из рисунка 3.1.8 видно, что вклад парообразования в смещение границ между режимами соударения составляет не более 10 % для всех типов режимов взаимодействий (т.е. поправка на процесс испарения составляет не более 10 %). Скорее всего, в случае рассмотрения соударений большой совокупности испаряющихся капель фактор вдува паров будет более значимым, так как будет существенно возрастать давление парогазовой смеси между каплями и интенсифицировать торможение сближающихся капель и их отталкивание относительно друг друга.

Образование так называемой тройной точки прослеживалось для капель при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тройная точка представляет пересечение режимов коалесценции, разлета и дробления. На рисунке 3.1.8 показано, что с увеличением температуры жидкости происходит смещение тройной точки в сторону меньших значений числа Вебера примерно на 30 %. Это связано со смещением границы для процесса дробления в сторону меньших значений числа Вебера, а также коалесценции капель. Также тройная точка установлена для капель с температурой $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, но расчетные параметры использовались для жидкости с температурой около $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характер смещения по безразмерному линейному

параметру идентичен каплям при температуре около 90 °С, но смещение по значениям числа Вебера составляет не более 8 %. Это смещение характеризует вклад фактора испарения капель.

Оценка эффективности процесса измельчения проводилась путем расчета отношения суммарной площади свободной поверхности вторичных фрагментов к аналогичному параметру для двух начальных капель (рисунок 3.1.9). Установлено, что отношение площадей поверхности жидкости для капель с температурой около 90 °С выше на 3–10 % относительно капель с $T_{\text{liq}} \approx 20$ °С во всем диапазоне изменения значений числа Вебера. Минимальное расхождение отношения площадей свободной поверхности жидкости зарегистрировано при значении числа Вебера около 200. Оно составляет не больше 3–5 %. Для оценки размеров области разлета вторичных фрагментов рассчитывалась площадь свободной поверхности образующегося аэрозольного облака. Для этого измерялся радиус этого облака. Измерение такого радиуса (R_a) несет оценочный характер, так как измерить его с высокой точностью не представляется возможным (вследствие не равноускоренного движения фрагментов и вылета их из области регистрации). На рисунке 3.1.9 приведены зависимости отношения площади свободной поверхности зоны разлета вторичных фрагментов к площади поверхности начальных (до взаимодействия) капель. Видно, что с ростом значения числа Вебера до 200 отклонение отношения площадей увеличивается, так как капли жидкости с температурой 90 °С имеют малое поверхностное натяжение и при дальнейшем полете интенсивно трансформируются, что приводит к дальнейшему измельчению. Также за счет трансформации капель снижается аэродинамическое сопротивление, что приводит к росту времени снижения скорости движения фрагментов.

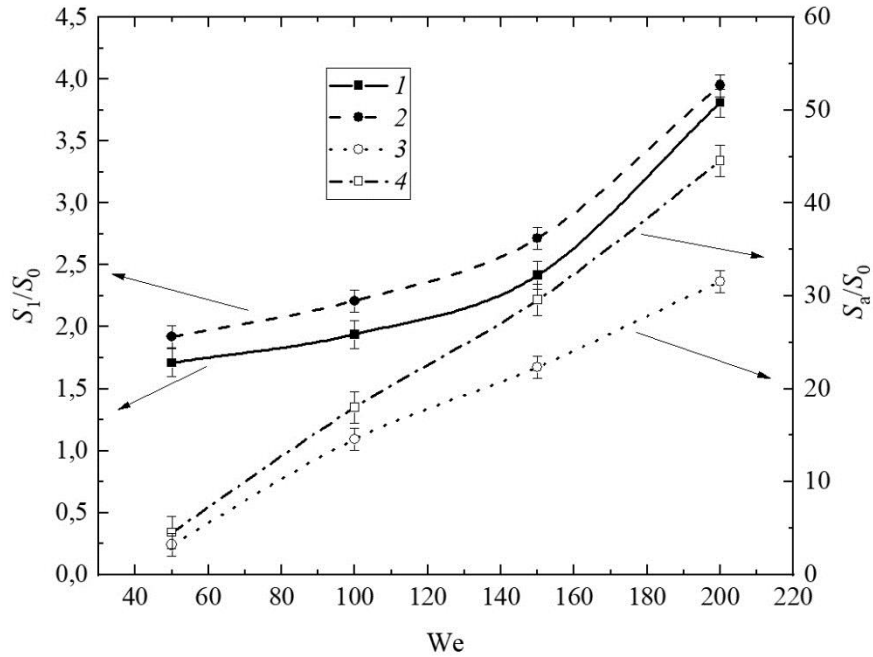


Рисунок 3.1.9 – Зависимости отношения площади свободной поверхности вторичных фрагментов и внешней поверхности аэрозольного облака к начальной площади поверхности двух взаимодействующих капель с разной начальной температурой [184]: 1,3 – 20 °С; 2,4 – 90 °С

Полученные экспериментальные данные имеют высокую практическую значимость для повышения эффективности реализации промышленных процессов, в которых применяются газопарокапельные потоки. Для прогнозирования площадей свободной поверхности образовавшихся вторичных фрагментов в настоящей работе представлены соответствующие зависимости. Установлено, что для капель с температурой 90 °С отношения площадей свободной поверхности образованных фрагментов к площади поверхности начальных капель выше на 10 %, чем у капель, имеющих температуру 20 °С. Если использовать эти эффекты в опытах с аэрозолями, то возможны синергетические эффекты, так как растет давление парогазовой смеси в зоне смешения нагретых капель, так как за счет большого количества мелких капель они будут прогреваться и испаряться интенсивнее, чем две рассмотренные капли. Поэтому

выделенные преимущества от применения капель с разной температурой могут быть даже более значимыми.

3.2. Взаимодействие капель жидкостей с твердыми частицами в энергетическом оборудовании

Проведенные эксперименты позволили установить три режима соударения капель с частицами: агломерирование, разделение растяжением и разделение растяжением с образованием различного количества вторичных капель. Кадры с демонстрацией взаимодействия капель и частиц в рамках данных режимов приведены на рисунке 3.2.1. Для каждого режима установлена определенная последовательность трансформации поверхности капли. В частности, режим агломерирования реализовывался за счет обтекания каплей жидкости твердой частицы без дальнейшего отрыва вторичных жидкостных фрагментов (рисунок 3.2.1*а*). Данный режим регистрировался в экспериментах при малых радиусах капли жидкости (1,05–1,2 мм) и небольших скоростях ее движения (0,98–1,2 м/с) для всех исследуемых степеней шероховатости поверхностей частиц. При реализации режима разделения растяжением (рисунок 3.2.1*б*) капля жидкости обволакивала частицу с дальнейшим отрывом одной вторичной капли. Остальной объем жидкости агломерировался на поверхности частицы. Установлено, что данный режим реализуется, когда радиус частиц соответствует диапазону 1,2–1,5 мм, т.е. больше, чем в режиме агломерирования, но при тех же значениях скоростей падения капель (около 1,03 м/с). Режим разделения растяжением с образованием различного количества вторичных капель зарегистрирован для всех степеней шероховатости твердых частиц при радиусах исходных капель более 1.5 мм и скоростях движения выше 1.1 м/с. Видеокадры с реализацией данного режима приведены на рисунке 3.2.1*в*.

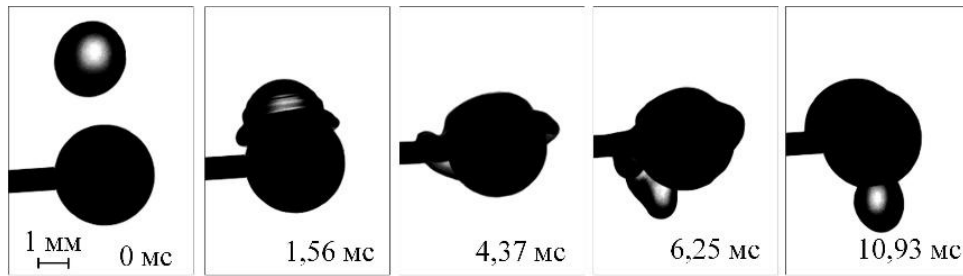
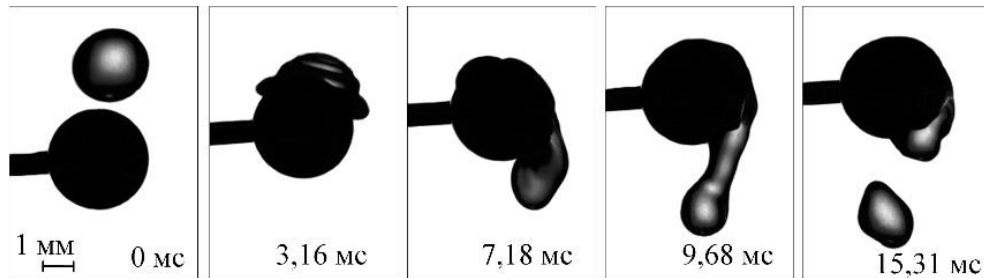
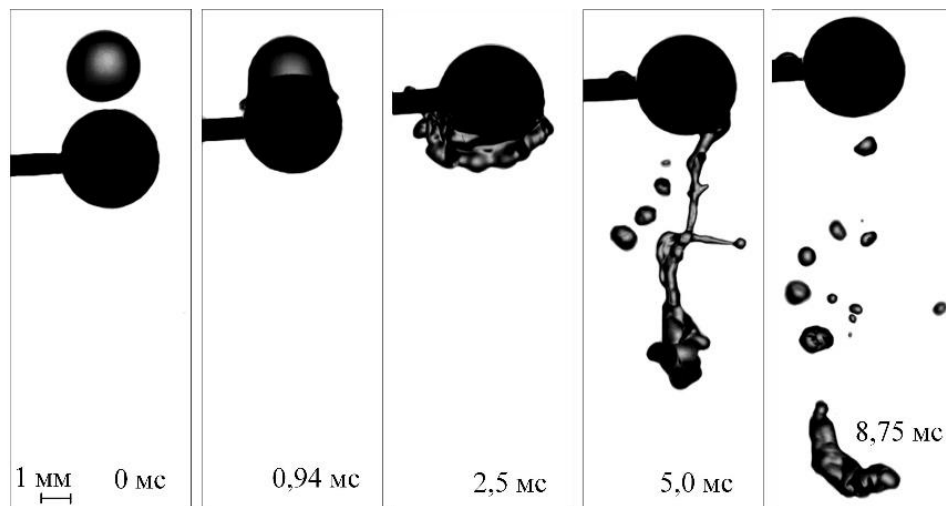
*a**б**в*

Рисунок 3.2.1 – Кадры, иллюстрирующие режимы соударений капель воды и частиц: вгломерация (*a*), разделение растяжением (*б*), разделение растяжением с образованием различного количества вторичных капель (*в*)

При анализе полученных после обработки экспериментальных данных по количеству и размерам вторичных капель сформулирован вывод о том, что степень шероховатости частицы оказывает существенное влияние на режимы соударений. В частности, чем выше степень шероховатости твердых частиц (при

аналогичных остальных условиях), тем большее количество вторичных капель образуется в результате их взаимодействия с каплей. Данный эффект продемонстрирован на рисунке 3.2.2. Установлено, что при увеличении среднего арифметического отклонения профиля поверхности частицы при постоянных размерах и скоростях движения капель реализуется переход от агломерирования к разделению разужением. Такой эффект обусловлен тем, что капля при контакте с поверхностью с большей шероховатостью практически не удерживается на ней, в результате чего основной объем жидкости отрывается (рисунок 3.2.2*a*). Множество выступающих металлических фрагментов на поверхности с небольшим расстоянием между ними создают «поддерживающий слой». Воздух в пустотах между возвышенностями на поверхности подложки сначала сжимается под действием падающей капли, после чего при ее релаксации высвобождается, стимулируя отделение жидкости от поверхности. Увеличение среднего арифметического отклонения профиля поверхности приводит к росту количества вторичных фрагментов при реализации режима разделения растяжением с образованием различного количества вторичных капель при фиксированных размерах и скоростях движения капель (рисунок 3.2.2*a*). Такой эффект обусловлен тем, что при столкновении капли с частицей элементы шероховатости поверхности последней приводят к деформации поверхностных слоев капли. Данный эффект зарегистрирован при соударении капель с подложкой и частицей с покрытием, нанесённым как методом лазерного текстурирования, так и механическим.

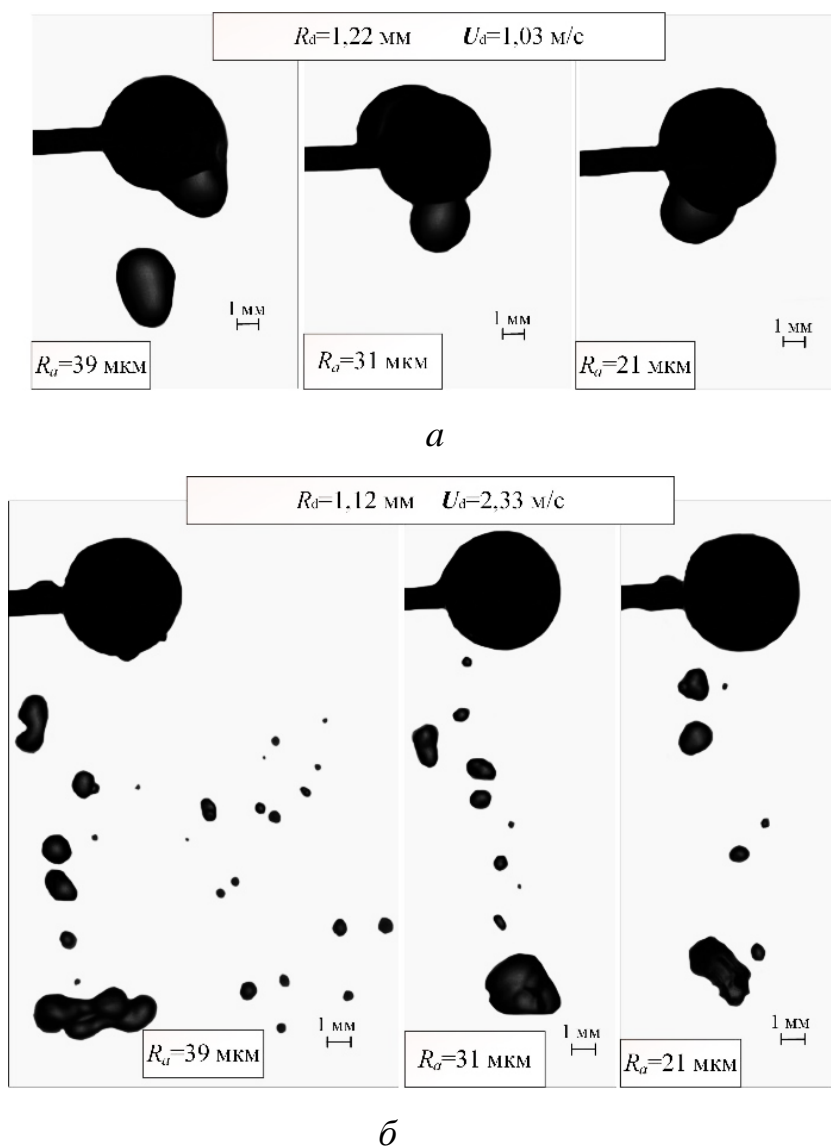


Рисунок 3.2.2 – Кадры, иллюстрирующие режимы соударений капель воды с частицами: агломерирование (*a*), разделение растяжением с образованием различного количества вторичных капель (*б*)

Анализ полученных видеogramм показал, что при соударении капель с поверхностями, обработанными за счет нанесения покрытия на подложку и частицу методом лазерного текстурирования, образуется большее количество вторичных фрагментов относительно полированных поверхностей (рисунок 3.2.3).

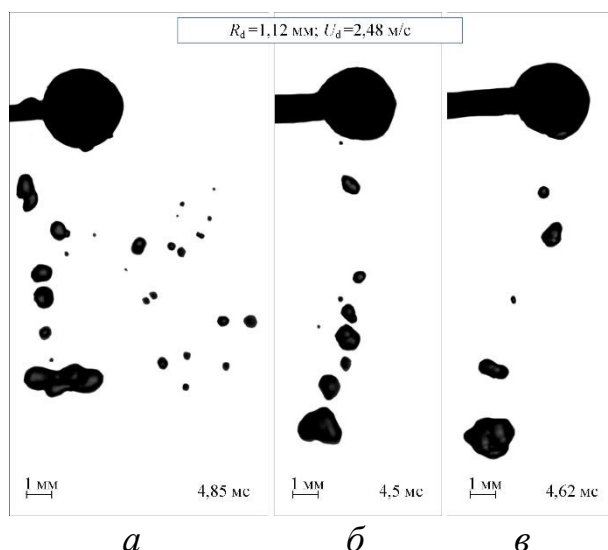


Рисунок 3.2.4 – Кадры, иллюстрирующие процессы соударений капель воды и частиц при разном методе нанесения покрытия: *а* – частица с покрытием, нанесенным методом лазерного текстурирования ($R_a \approx 24$ мкм); *б* – частица с шероховатым покрытием, нанесенным механическим методом ($R_a \approx 0,32$ мкм); *в* – полированная частица ($R_a \approx 0,05$ мкм)

При этом количество вторичных фрагментов, образующихся при соударении капель с подложками и частицами с покрытием, нанесенным механическим методом, сопоставимо с количеством фрагментов, образующихся при соударении с полированными поверхностями. Этот результат демонстрирует принципиальные отличия структуры твердых поверхностей при применении разных методик выделения элементов шероховатостей. При лазерном структурировании поверхности имеют упорядоченный характер расположения шероховатостей. Это позволяет потоку жидкости многократно и единообразно деформироваться, что приводит к более существенной фрагментации. При механическом воздействии на структуру поверхности наблюдается менее выраженный характер упорядочивания шероховатостей. Это слабо влияет на характеристики фрагментации. Механические методики формирования элементов шероховатостей, соответствующие большинству типичных металлорежущих технологий, не могут существенно изменить предельные условия по переходам между режимами и последствия взаимодействия с каплями жидкостей.

Полученный результат является крайне важным, так как он обосновывает возможность использования металлических поверхностей с разными элементами естественной шероховатости, которые формируются в процессе технологических процессов.

Результаты проведенных экспериментов обобщены в виде карт режимов соударений капель и частиц с разной шероховатостью. На рисунке 3.2.4 представлены результаты экспериментальных исследований соударения капель дистиллированной воды с частицей при нанесении покрытия методом лазерного текстурирования. Установлены границы режимов на данных картах. На рисунке 3.2.4 дополнительно указаны аппроксимационные выражения для определения границ переходов между режимами агломерирования и разделения растяжением с образованием различного количества вторичных капель. Установлено, что для реализации режима разделение растяжением для полированной частицы требуются большие значения числа Вебера (практически на 10 %), чем для реализации данного режима для частицы с покрытием, нанесенным при помощи лазера ($R_a \approx 24$ мкм). Т.е. чем выше шероховатость поверхности частицы, тем меньшие ускорения нужны для сталкивающейся с ней капли дистиллированной воды в режиме дробления. При увеличении среднеарифметического отклонения профиля поверхности с 24 мкм до 39 мкм граница режима разделения растяжением смещается в сторону меньших значений числа Вебера практически на 20 %. Аналогичная закономерность выделена для режима разделения растяжением с образованием различного количества вторичных капель. Такой эффект объясняется увеличением неровности поверхности с ростом степени шероховатости подложки. При контакте капли с единичной вершиной (или совокупностью вершин) таких профилей интенсифицируется разрушение капли. В экспериментах установлено, что при увеличении высоты таких неровностей растет количество вторичных фрагментов и происходит смещение границ режима разделения растяжением в сторону меньших значений числа Вебера. При идентичных начальных скоростях движения и размерах капель в момент контакта с полированной поверхностью реализуется режим агломерирования, а при

взаимодействии капле с поверхностью, имеющей отличное от полированной среднеарифметическое отклонение профиля поверхности – режим разделения растяжением.

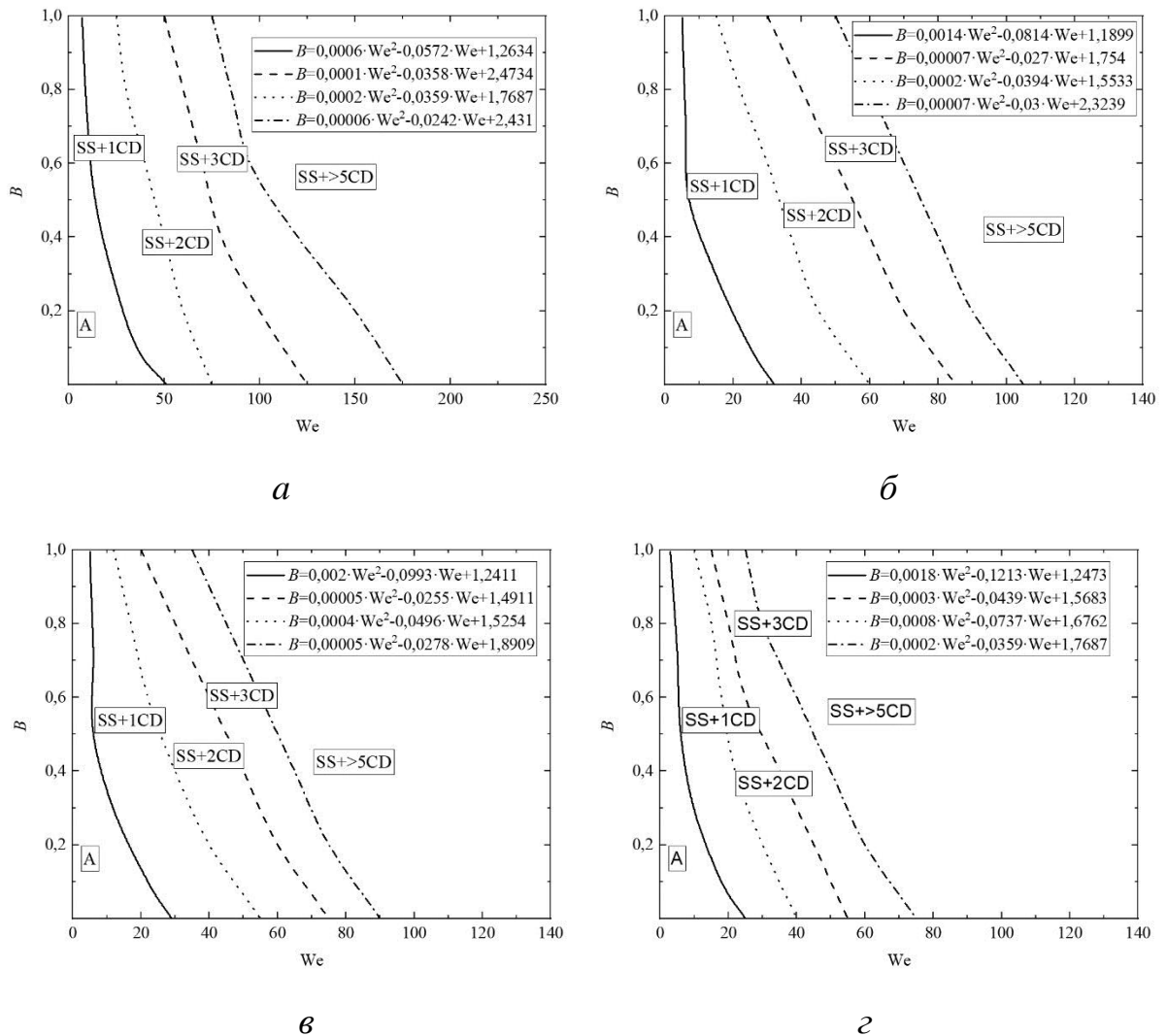


Рисунок 3.2.4 – Карты режимов соударений капле воды с твердыми частицами при нанесении покрытия методом лазерного текстурирования [187]: *а* – $R_a \approx 0,05$ мкм; *б* – $R_a \approx 24$ мкм; *в* – $R_a \approx 31$ мкм; *г* – $R_a \approx 39$ мкм

На рисунке 3.2.5 представлены карты режимов взаимодействия капли воды с твердой частицей при наличии определенной шероховатости за счет механической обработки. Установлено, что на твердой поверхности образуются небольшие кратеры, а поверхность остается гладкой.

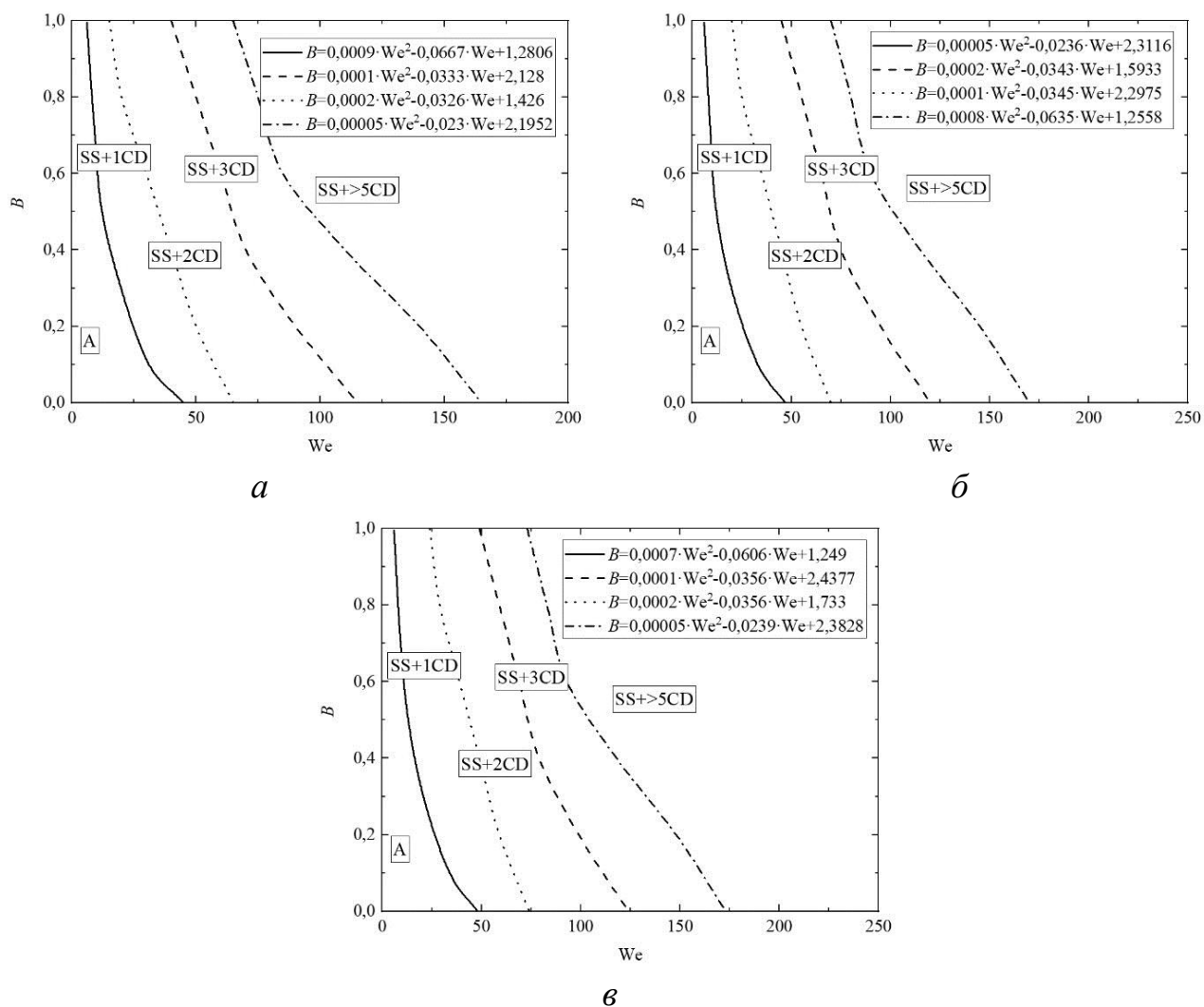


Рисунок 3.2.5 – Карты режимов соударений капле воды с твердыми частицами при механическом нанесении покрытия [187]: *a* – $R_a \approx 0,32$ мкм; *б* – $R_a \approx 0,12$ мкм; *в* – $R_a \approx 0,08$ мкм

Этот эффект продемонстрирован на построенных режимных картах (рисунок 3.2.5). Показано, что при соударении капли воды с частицей, имеющей отличную от полированной поверхности шероховатость, реализуются три режима взаимодействия. В частности, установлено, что при соударении капли с частицей, на которую нанесено покрытие механическим способом ($R_a \approx 0,32$ мкм, $R_a \approx 0,12$ мкм и $R_a \approx 0,08$ мкм), граница перехода к режиму разделения растяжением незначительно (т.е. практически на 3 %, 5 % и 7 %, соответственно) смещается в сторону меньших значений числа Вебера.

Основной интерес в области технологий вторичного измельчения капель жидкостей состоит в получении требуемого количества вторичных жидкостных фрагментов с заданными средними (или некоторыми минимальными) размерами. При анализе видеogramм проведенных опытов установлены минимальные, максимальные и средние размеры, количество вторичных фрагментов жидкости, а также площадь поверхности в сравнении с аналогичными характеристиками для исходных капель. По результатам опытов, направленных на исследование процессов соударений капель с частицами и подложками, выполнен анализ значений этих параметров. Рисунок 3.2.6 иллюстрирует установленные значения отношения площади свободной поверхности после и до измельчения капли вследствие ее соударения с частицей при варьировании значений числа Вебера (за счёт варьирования размера и скорости движения капли). Выявлено, что при соударении капли с частицей с покрытием, нанесенным методом лазерного текстурирования, увеличение R_a от 0,05 мкм до 39 мкм приводит к росту количества вторичных фрагментов практически в 8 раз. Это способствует увеличению площади поверхности при значениях числа Вебера около 100 практически на 200 %. При росте значения числа Вебера до 400 такой эффект уменьшается и составляет лишь 20 %. Сформулировано заключение о том, что для условий столкновения капли с частицей, имеющей отличную от полированной поверхности степень шероховатости, наибольшее увеличение количества вторичных фрагментов наблюдается при значениях числа Вебера менее 300. Из анализа характеристик процессов соударений капель воды с частицей, у которой элементы шероховатости сформированы механическим методом (рисунок 3.2.6б), установлен аналогичный эффект измельчения капли, что и при столкновении воды с частицей с покрытием, нанесенным методом лазерного текстурирования, но при значениях числа Вебера более 250. При $We < 250$ отличие значений соотношения S_1/S_0 составило 40–50 % в зависимости от R_a . Правомерен вывод о том, что методика формирования элементов

шероховатости поверхности частиц способствует интенсификации вторичного измельчения капель в ограниченных диапазонах варьирования We .

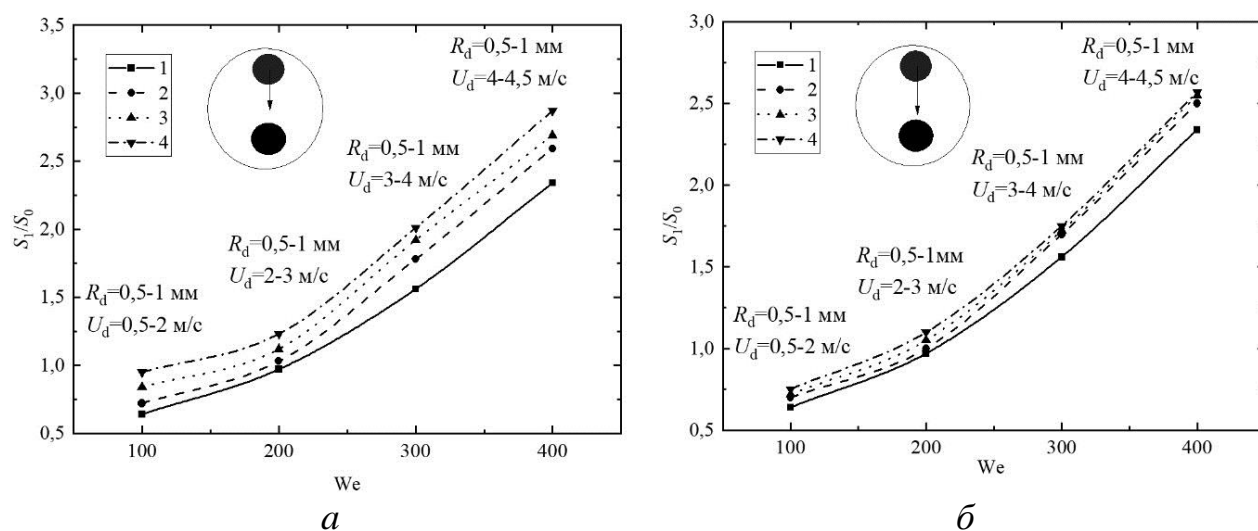


Рисунок 3.2.6 – Отношение площадей поверхностей капель воды после и до измельчения от значений числа Вебера при варьировании шероховатости частицы поверхности методом лазерного текстурирования (а) и механическим нанесением (б) [187]: (а) 1 – $R_a \approx 0,05$ мкм; 2 – $R_a \approx 24$ мкм; 3 – $R_a \approx 31$ мкм; 4 – $R_a \approx 39$ мкм. (б) 1 – $R_a \approx 0,05$ мкм; 2 – $R_a \approx 0,08$ мкм; 3 – $R_a \approx 0,12$ мкм; 4 – $R_a \approx 0,32$ мкм

Проведенные эксперименты позволили построить карты режимов соударений капель и частиц в системе координат, учитывающей значения параметра взаимодействия и числа Вебера. Выделены режимы: агломерирование, разделение растяжением и разделение растяжением с образованием различного количества вторичных капель. Установлено влияние шероховатости на смещение границ режимов взаимодействия на картах $B(We)$. В частности, увеличение среднего арифметического отклонения профиля поверхности с 0,05 мкм до 39 мкм приводит к смещению границы между режимами агломерирования и разделения растяжением практически на 50 % в сторону меньших критических значений числа Вебера.

Выполненное сравнение режимов соударений капель с частицами и капель с подложками позволило установить условия, при которых карты характеризуются

как идентичными режимами, так и существенно отличающимися. Установлено, что увеличение среднего арифметического отклонения профиля поверхности с 0,05 мкм до 39 мкм приводит к росту количества вторичных фрагментов практически в 20 раз. Сформулированы выражения для описания границ переходов между режимами взаимодействия капель и частиц вида: $B=a \cdot We^2+b \cdot We+c$. Выделены зоны на картах режимов, в которых формируется максимальное количество вторичных фрагментов.

Результаты исследований представляют интерес для развития технологий вторичного измельчения капель жидкостей. Повышая степень шероховатости поверхности частицы или подложки можно добиться роста площади свободной поверхности капель жидкости практически в 3 раза. Так как рост степени шероховатости также интенсифицирует теплообмен, испарение и кипение жидкости, то варьирование этой характеристики поверхности частиц и капель может в комплексе менять группу технологических параметров.

Для изучения влияния свойств жидкости на характеристики соударения капли с частицей использована группа составов (таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1 – Свойства использованных жидкостей

Наименование состава	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , мН/м	Динамическая вязкость μ , мПа·с	Межфазное натяжение σ_0 , мН/м
Вода	998	72,7	1	–
Составы для варьирования динамической вязкости				
90 об.% вода, 10 об.% глицерина	1022	71,3	1,4	–
75 об.% вода, 25 об.% глицерина	1060	69,3	2,3	–
50 об.% вода, 50 об.% глицерина	1126	66,1	6,3	–
Составы для варьирования поверхностного натяжения				
95,5 об.% вода, 0,5 об.% Твин-80	998	47,4	1	–
95,5 об.% вода, 0,5 об.% Твин-20	998	40,1	1	–
95,5 об.% вода, 0,5 об.% Неонол	998	36,1	1	–

Продолжение таблицы 3.2.1 – Свойства использованных жидкостей

Составы для варьирования межфазного натяжения				
10 об.% вода, 90 об.% дизель	828	27,5	2,6	42,57
10 об.% вода, 90 об.% дизель, 0,08 г/л эмульгатор D _c D	828	27,5	2,5	22,49
10 об.% вода, 90 об.% дизель, 1,6 г/л эмульгатор D _c D	828	27,5	2,4	3,41

На рисунке 3.2.7а приведена построенная по результатам опытов карта режимов соударений капель воды и растворов глицерина с металлической частицей диаметром 3 мм. Установлено, что при увеличении вязкости жидкости происходит достаточно существенное смещение границы между режимами агломерирования и разделения растяжением в сторону больших значений числа Вебера (рисунок 3.2.7а). Так, например, граница разделения растяжением для капель воды соответствует значению числа Вебера, равному 20, в то время как для раствора глицерина с концентрацией 50 об.% значение критического числа Вебера равно 75. Изменения вязкостных сил за счет варьирования концентрации глицерина в составе водяного раствора не приводят к существенному изменению баланса сил. Преобладание сил поверхностного натяжения остается. В целом увеличение вязкости жидкости приводит к росту значения критического числа Вебера на 20–30 %. Для построенных границ переходов между режимами агломерирования и разделения растяжением получены аппроксимационные выражения вида $B=a \cdot We^2+b \cdot We+c$, которые приведены на рисунке 3.2.7. Для построения границ переходов определялись крайние или граничные точки, характеризующие переход между режимами взаимодействия капель. Если 95 % точек попадали в область выбранного режима, проводилась аппроксимирующая линия.

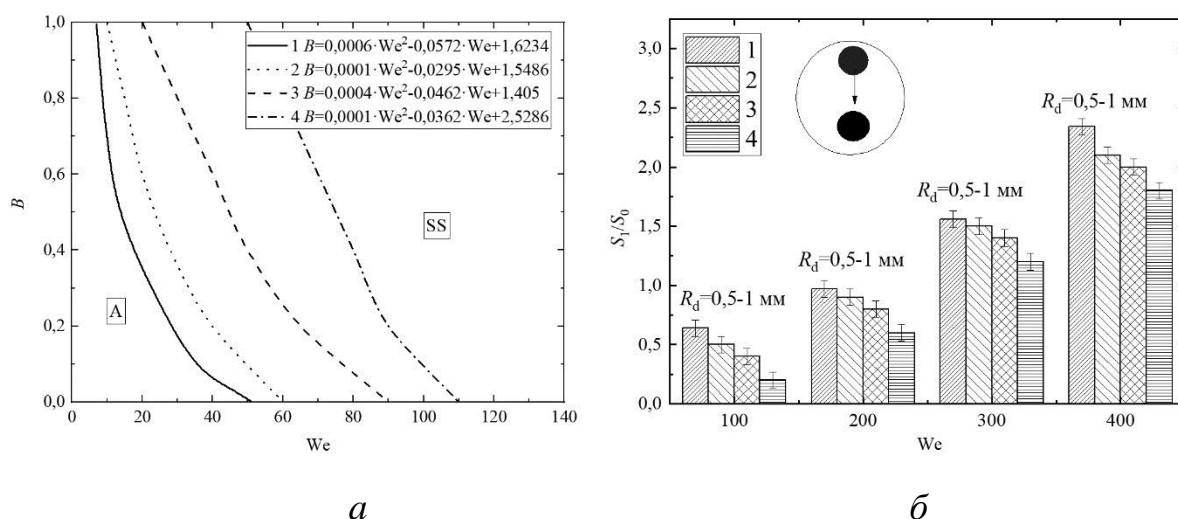


Рисунок 3.2.7 – Карты режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами (а) и отношения площадей свободных поверхностей после и до соударения (б) при варьировании вязкости жидкости и постоянном размере капель [188]: 1 – дистиллированная вода; 2 – раствор глицерина (10 об.%); 3 – раствор глицерина (25 об.%); 4 – раствор глицерина (50 об.%)

Важной особенностью изучения влияния вязкости жидкости на режим агломерирования является оценка длительности и, соответственно, скоростей растекания капель по поверхности частицы. Такие параметры позволяют оценить длительность режима агломерирования, т.е. полного обволакивания каплей жидкости твердой частицы. Установлено, что при увеличении вязкости жидкости в исследованном диапазоне времена взаимодействия увеличиваются на 25-45 %. Например, при соударении капель дистиллированной воды со стальной частицей времена взаимодействия составляли около 19 мс, а для 50 об.% раствора глицерина около 27 мс. Сформулировано заключение о том, что при столкновении частицы с каплей жидкости снижение вязкости последней приводит к уменьшению длительности взаимодействия и повышению скоростей растекания жидкости по поверхности частицы, а значит и увеличению краевого угла смачивания без изменения свойств поверхности.

В опытах с повышением вязкости жидкости регистрировалось образование более крупных по размеру вторичных капель, что приводило к снижению их количества относительно экспериментов с каплями дистиллированной воды.

Установлено, что вторичные фрагменты, образующиеся при фрагментации капель жидкости с повышенной вязкостью, по сравнению со вторичными фрагментами, образующимися при фрагментации капель воды, быстрее принимали сферичную форму. Выделенный эффект обусловлен преобладанием вязкостных сил над вращательными, в результате чего снижаются длительности и амплитуды изменения форм вторичных фрагментов в циклах деформации [189].

Из рисунка 3.2.8а следует, что двукратное снижение поверхностного натяжения жидкости привело к уменьшению критических значений числа Вебера режима дробления на 15–25 %. Однако результаты, приведенные на рисунке 3.2.8а, показывают, что незначительное снижение поверхностного натяжения жидкости (с 47,4 до 36,1 мН/м) практически не вносит существенных корректив на карту режимов взаимодействия (отклонение составляет не более 3 %). При снижении поверхностного натяжения жидкости существенно (на 35–55 %) уменьшаются времена взаимодействия капель жидкости с частицей в режиме агломерирования, т.е. увеличивается скорость растекания. Например, времена растекания капли дистиллированной воды по частице составляют около 19 мс, а в случае раствора Твин-20 этот параметр снижается до 11 мс. Установлена ключевая особенность, заключающаяся в том, что дальнейшее снижение поверхностного натяжения жидкости не оказывает существенного влияния на времена растекания капель по частице (изменения не превышают 5 %). Сформулировано заключение о том, что снижение поверхностного натяжения жидкости существенно влияет на длительность взаимодействия капли и частицы в режиме агломерирования, а именно снижает времена взаимодействия и увеличивает скорость растекания.

На рисунке 3.2.8б приведены значения отношения площадей свободных поверхностей после и до измельчения капель жидкости вследствие контакта с частицей при варьировании поверхностного натяжения последней. Установлено, что с уменьшением поверхностного натяжения жидкости увеличивается количество образованных фрагментов, что, в свою очередь, приводит к росту отношения площадей свободных поверхностей после и до измельчения во всем

диапазоне значений числа Вебера (например, снижение поверхностного натяжения жидкости с 72,7 до 36,1 мН/м приводит к росту S_1/S_0 на 30–45 %).

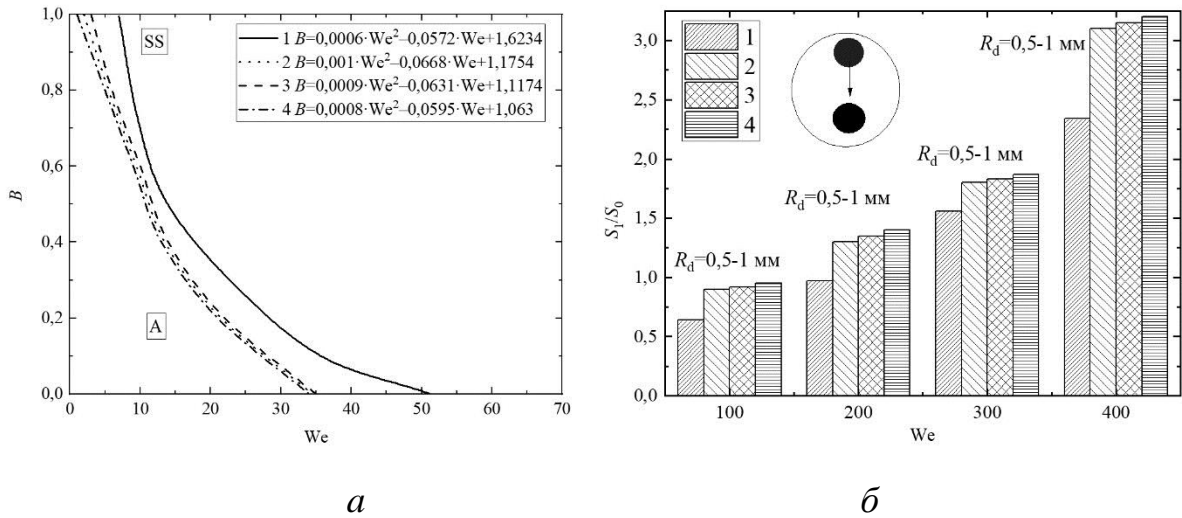


Рисунок 3.2.8 – Карты режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами (а) и отношения площадей свободных поверхностей после и до соударения (б) при варьировании поверхностного натяжения жидкости [188]:
 1 – дистиллированная вода; 2 – 99,5 об.% вода, 0,5 об.% Твин-20; 3 – 99,5 об.% вода, 0,5 об.% Твин-80; 4 – 99,5 об.% вода, 0,5 об.% Неонол

Это обусловлено переходом части энергии, расходуемой на преодоление сил поверхностного натяжения, в кинетическую. Чем выше значения относительной скорости движения капель, тем слабее становятся данные эффекты, так как кинетическая энергия в зоне контакта капель и так имеет очень высокие значения. При проведении экспериментов зарегистрирована существенная трансформация поверхности до взаимодействия (как по амплитуде, и так и времени вращения и сдвиговой деформации) капель растворов относительно капель воды. Как правило, капли принимали эллипсоидную форму, что обусловлено тем, что силы поверхностного натяжения ослабевают и не могут сдерживать приповерхностные слои. При столкновении капли такой формы с частицей происходило ее разрушение. При этом образовавшиеся фрагменты при дальнейшем движении в газовой среде также фрагментировали. Сформулировано заключение о том, что уменьшение поверхностного натяжения

жидкости способствует понижению критических значений скоростей движения (соответственно, и значений числа Вебера), достаточных для реализации режима разделения растяжением, относительно капель дистиллированной воды.

Исследования влияния межфазного натяжения жидкости на характеристики процессов столкновений капель и частиц можно проводить для многокомпонентных составов. Это обусловлено тем, что при измельчении капель таких жидкостей ключевой вклад в реализацию режима разделения растяжением вносят не только внутренние силы инерции, но и межмолекулярные связи. При этом чем выше межфазное натяжение, тем крепче межмолекулярные связи [157]. В промышленных установках, в которых, как правило, используются многокомпонентные жидкости, целесообразно за счет варьирования межфазного натяжения в заданных диапазонах обеспечить условия преобладания режима разделения растяжением, и, как следствие, увеличить площадь распыла жидкости и снизить средний размер жидкостных фрагментов.

Рисунок 3.2.9а показывает, что наибольшее смещение границ переходов между режимами разделения растяжением и агломерирования зарегистрировано для капель эмульсии дизеля с добавлением эмульгатора. Это обусловлено тем, что эмульгатор повышает стабильность эмульсии (т.е. уменьшает расслаиваемость) [157], укрепляет межмолекулярные связи. Для распада такой эмульсии требуются меньшие силы инерции и, соответственно, наименьшие значения переходных значений числа Вебера. При сравнении карт режимов для эмульсий дизельного топлива и дистиллированной воды установлено снижение значения критического числа Вебера для реализации режима разделения растяжением во всем диапазоне безразмерного линейного параметра взаимодействия практически на 20–40 %.

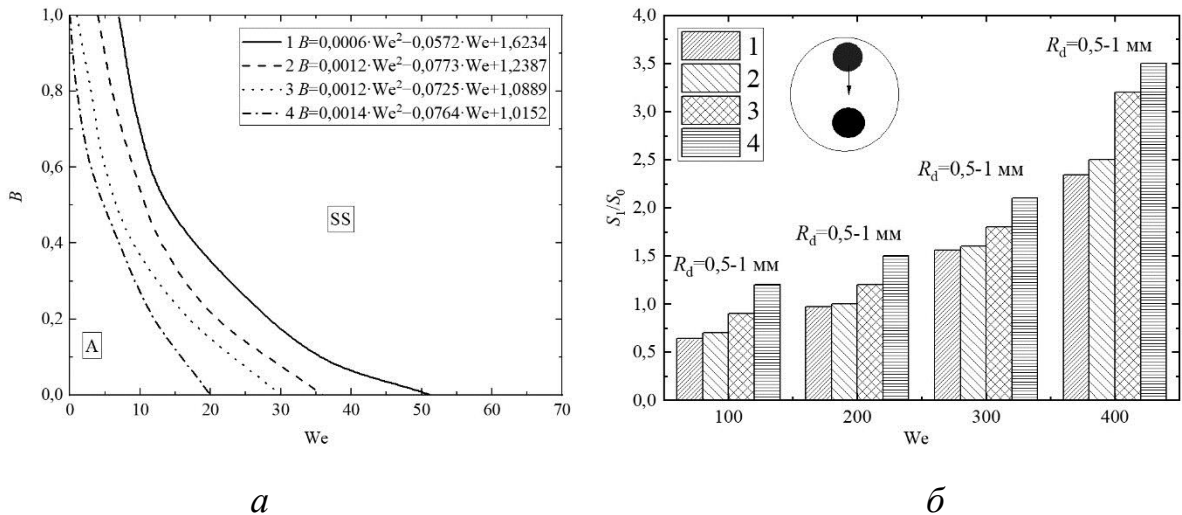


Рисунок 3.2.9 – Карты режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами (а) и отношения площадей свободных поверхностей после и до соударения (б) при варьировании межфазного натяжения жидкости [188]:
 1 – дистиллированная вода; 2 – 10 об.% вода, 90 об.% дизель; 3 – 10 об.% вода, 90 об.% дизель, 0,08 г/л эмульгатор D_cD ; 4 – 10 об.% вода, 90 об.% дизель, 1,6 г/л эмульгатор D_cD

На рисунке 3.2.9б продемонстрировано существенное влияние межфазного натяжения жидкости на отношение площадей свободных поверхностей после и до измельчения капель жидкости в результате ее взаимодействия с твердой частицей. Установлено, что при минимальном значении межфазного натяжения количество новообразованных фрагментов максимально – значения S_1/S_0 увеличиваются. Такой характер сохраняется во всем исследуемом диапазоне изменения значений числа Вебера. В частности, при снижении межфазного натяжения с 42,57 до 3,41 мН/м отношение S_1/S_0 увеличивается практически на 30–45 %.

Для обобщения результатов исследований и сравнения методик вторичного измельчения (дробление капель жидкостей за счет их взаимодействий друг с другом, измельчение капель жидкости за счет их столкновений с частицами и подложками) построены карты режимов взаимодействия капель и частиц, а также капель друг с другом в координатах $We(Oh)$ (рисунок 3.2.10). Обобщение результатов с использованием чисел We и Oh позволяет одновременно учитывать

силы поверхностного натяжения, силы инерции и вязкостные силы, а также начальный размер и скорости движения капель. Установлено положение границы между режимами агломерирования и разделения растяжением на карте режимов взаимодействий капель жидкостей с твердой частицей (рисунок 3.2.10а), друг с другом (рисунок 3.2.10б), и с массивной подложкой (рисунок 3.2.10в). Например, максимальное значение критического числа We зарегистрировано для раствора с максимальным значением Oh , т.е. раствора глицерина (50 об.% глицерин, 50 об.% вода). Правомерен вывод, что независимо от методики измельчения капли высоковязкостной жидкости, такой критерий подобия как число Онезорге является постоянным и соответствует диапазону значений 0,02–0,04. Установлено, что значения числа Вебера, необходимые для реализации режима разделения растяжением при соударении капель высоковязкостных жидкостей, практически на 40 % ниже значения данного показателя при реализации схемы соударения капель с частицей. При сравнении же схемы соударения капель с твердой подложкой относительно схем соударения между собой и с твердой частицей, установлено, что для достижения режима разделения растяжением необходимы значительно большие значения числа Вебера (рисунок 3.2.10в). Такой эффект объясняется тем, что для устойчивой реализации режима разделения растяжением при соударении капли жидкости с твердой подложкой необходимы значительно большие скорости исходной капли (практически в 3-5 раз больше по сравнению с измельчением о твердую частицу). Относительно случая измельчения капель путем соударения между собой и в процессе контакта с массивной поверхностью при соударении капли с твердой подложкой изменение критического числа Онезорге имело подобный характер. На рисунке 3.2.10 видно, что кривая, разделяющая режимы агломерирования и разделения растяжением, иллюстрирует монотонный рост с увеличением значений числа Oh . В связи с этим можно ожидать сохранение аналогичного вида границы между этими двумя режимами (а именно необходимые и достаточные условия по переходу от одного режима к другому) на карте $We(Oh)$ для любых других жидкостных составов с

отличающимися динамической вязкостью, плотностью, поверхностным и межфазным натяжением.

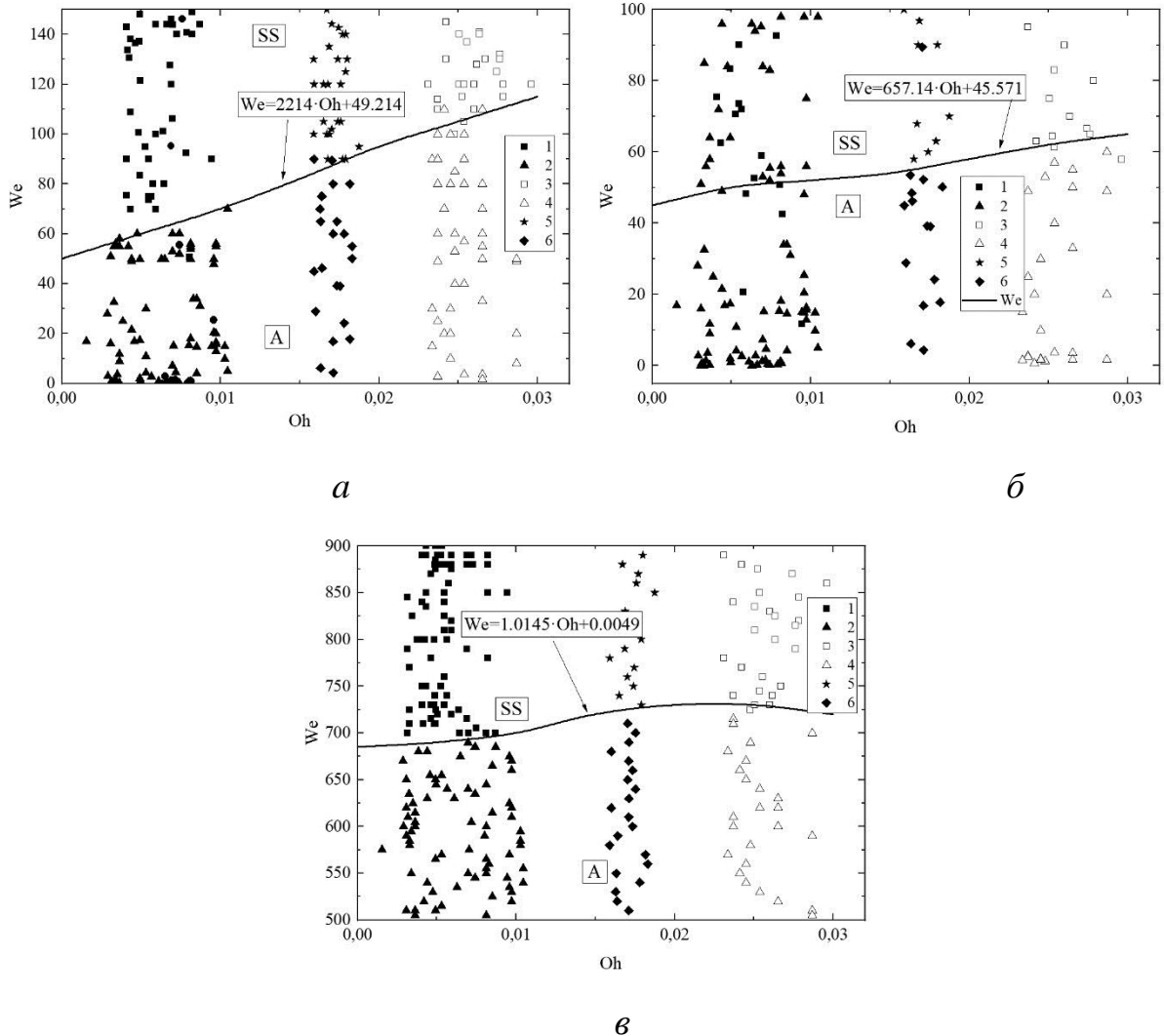


Рисунок 3.2.10 – Влияние свойств жидкости на границу перехода между агломерированием и разделения растяжением при соударении капли с твердой частицей [188] (*a*) и при соударении двух капель между собой (*б*) [157] и при соударении капли с твердой подложкой (*в*): 1, 2 – вода; 3, 4 – 50 об.% глицерина, 50 об.% вода; 5, 6 – 10 об.% вода, 90 об.% дизель; 1, 3, 5 – разделение растяжением; 2, 4, 6 – агломерирование

Приведенные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований соударения капель жидкости с твердыми подложками при варьировании свойств жидкости позволили сформулировать выводы о том, что

уменьшение поверхностного натяжения жидкости в два раза позволяет снизить значение критического числа Вебера между режимами агломерирования и разделения растяжением практически на 30-40 %, а также увеличить количество вторичных фрагментов в 5-7 раз. Снижение межфазного натяжения жидкости позволяет снизить значение критического числа Вебера на 35-40 % и увеличить количество вторичных фрагментов в 5-6 раз. Увеличение вязкости жидкости с 1,0 до 6,3 мПа·с при соударении капли с подложкой [190] аналогично схеме соударения капель между собой и с твердой частицей приводит к укрупнению вторичных фрагментов. Это приводит к снижению количества вторичных фрагментов практически на 10-15 %. Также увеличение вязкости жидкости способствует смещению границы между режимами агломерирования и разделения растяжением в сторону больших значений числа Вебера на 20-30 %.

На рисунке 3.2.11 представлены карты режимов взаимодействия капель между собой, с твердой частицей и подложкой при использовании таких критериев подобия, как числа Рейнольдса и капиллярности. Выделены диапазоны устойчивой реализации каждого из режимов взаимодействия. Для этого результаты исследований обобщены в виде карты режимов $Re(Ca)$. Установлено, что при высоких значениях Ca и Re происходила устойчивая реализация режима разделения растяжением. С применением карт режимов взаимодействия в координатах $We(Oh)$, $Re(Ca)$ можно выделить диапазоны изменения как Oh , Ca , так Re и We (рисунки 3.2.10 и 3.2.11) для режимов агломерирования и разделения растяжением. С использованием таких чисел одновременно учитываются силы инерции, вязкостного трения и поверхностного натяжения. Установлено, что динамическая вязкость оказывает существенное влияние на критическое значение числа Рейнольдса. Увеличение ее снижает критическое число Рейнольдса для перехода режима агломерирования в режим разделения растяжением для всех рассмотренных схем соударения. Например, увеличение вязкости с 1,0 до 6,3 мПа·с приводит к снижению критического числа Рейнольдса на 10-20 %. При анализе полученных чисел капиллярности установлено, что снижение

поверхностного натяжение жидкости в два раза увеличивает число Ca на 15-25 % при переходе между режимами агломерирования и разделения растяжением для всех трех изученных схем соударения капель.

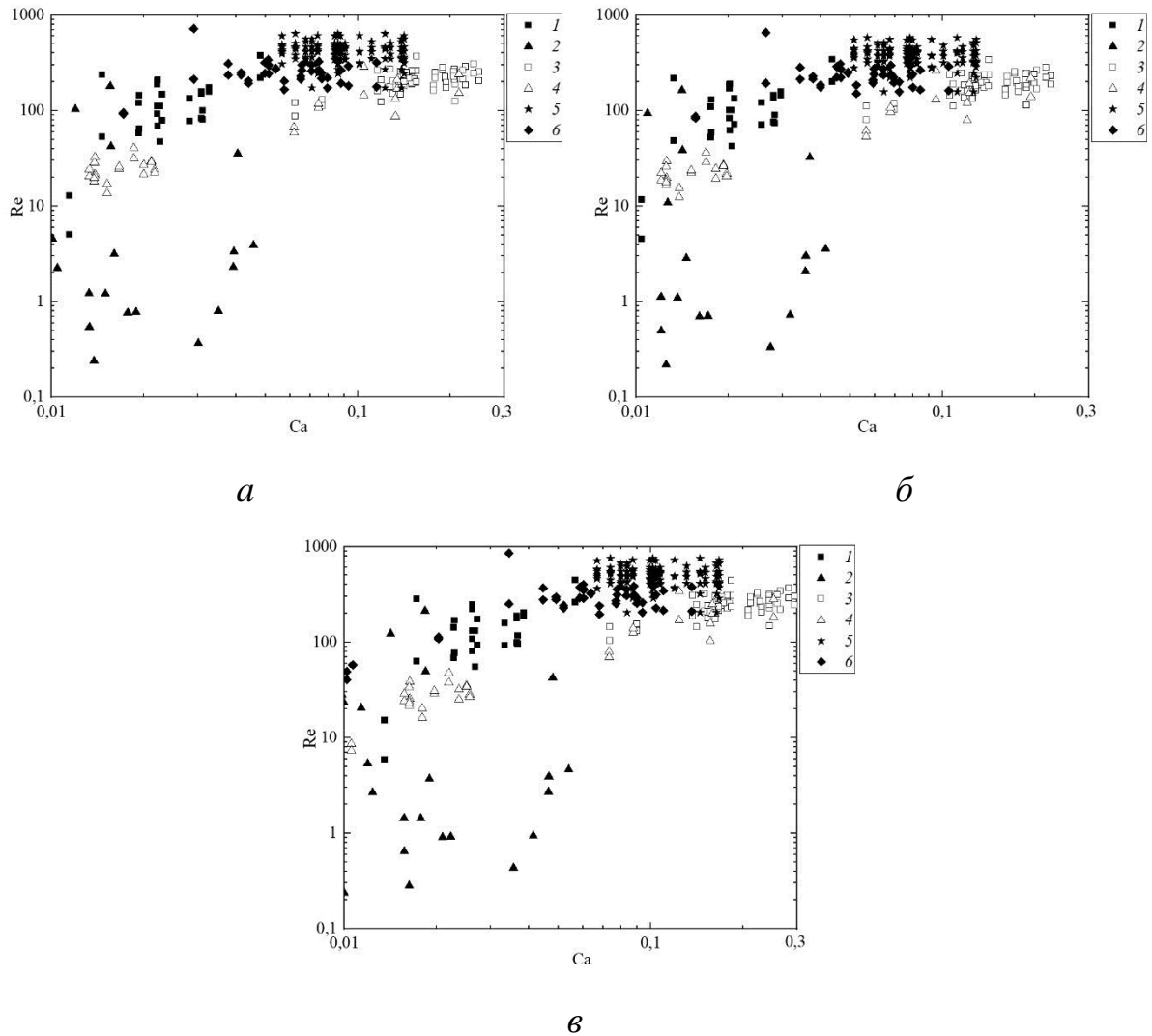


Рисунок 3.2.11 – Влияние свойств жидкости на границу перехода между агломерированием и разделением растяжением при соударении капли с твердой частицей (*a*) [188] и при соударении двух капель между собой (*б*) [157] и при соударении капли с твердой подложкой (*в*) [191]: 1, 2 – вода; 3, 4 – 50 об.% глицерина, 50 об.% вода; 5, 6 – 10 об.% вода, 90 об.% дизель; 1, 3, 5 – разделение растяжением; 2, 4, 6 – агломерирование

Результаты проведенных экспериментов обобщены в виде карт режимов соударений капель и частиц в системе координат, учитывающей параметр взаимодействия B и число Вебера We . Выделены режимы агломерирования и разделения растяжением. Установлено влияние вязкости, поверхностного и межфазного натяжения жидкости на смещение границ переходов между режимами соударений на картах $B(We)$ и $We(Oh)$.

Обосновано, что увеличение вязкости жидкости с 1,0 до 6,3 мПа·с приводит к росту значений критического числа Вебера на 20–30 % между режимами агломерирования и разделения растяжением и снижению отношения площадей свободных поверхностей после и до соударения капли с частицей практически на 40 %. Снижение поверхностного натяжения с 72,7 до 36,1 мН/м приводит к сдвигу границ между режимами агломерирования и разделения растяжением в сторону меньших значений числа Вебера на 25 %, увеличению значений отношения площадей свободных поверхностей после и до соударения капли с частицей на 45 %. Снижение межфазного натяжения с 42,6 до 3,4 мН/м приводит к увеличению площади свободной поверхности после и до соударения капли с твердой частицей практически на 40 % и снижению значений критического числа Вебера для реализации режима разделения растяжения на 20–30 %.

Результаты исследований представляют интерес для развития технологий вторичного измельчения капель жидкостей. В частности, с их использованием прогнозируются достаточные для перехода между режимами агломерирования и разделения растяжением условия для жидкостей с различными значениями динамической вязкости, плотности, поверхностного и межфазного натяжения.

3.3. Перемешивание и разделение компонентов жидкостей при соударении капель и частиц

На рисунке 3.3.1 представлены видеogramмы, показывающие режим коалесценции при различных отношениях размеров капель. При $\Delta < 0,2$ (рисунок

3.3.1а) смешение жидкостей происходило локально – в зоне контакта при столкновении. Увеличение отношения размеров до $\Delta < 0,5$ (рисунок 3.3.1б) приводило к окрашиванию примерно половины капли-мишени, в которую попадала меньшая капля. Относительно равномерно смешение жидкостей происходило при $\Delta > 0,7$.

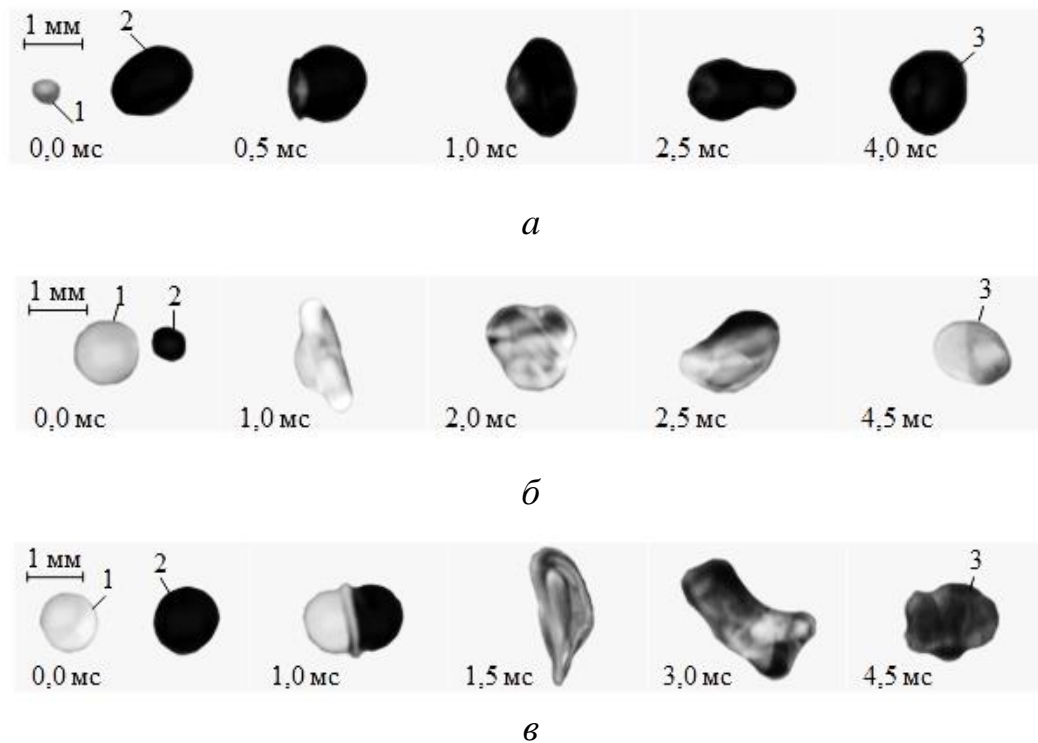


Рисунок 3.3.1 – Видеокадры коалесценции капель воды при различных значениях отношения размеров: *а* – $\Delta=0,2$; *б* – $\Delta=0,5$; *в* – $\Delta=0,95$; 1 – капля с Rhodamine В; 2 – капля с гелиевой краской; 3 – смешанная капля

Видеокадры дробления капель с образованием жидкостного моста при различном значении безразмерного линейного параметра взаимодействия представлены на рисунке 3.3.2 Дробление при значении B до 0,3 сопровождалось активным обменом жидкостью между каплями. Происходило изменение средней интенсивности светимости цвета двух больших вторичных капель с 5–20 ед. у капли с красителем и 1400–1600 у капли с Rhodamine В до 60–1000 ед. у вторичных капель. Увеличение значения безразмерного линейного параметра взаимодействия из-за снижения площади контакта приводило к замедлению

смешения жидкости между каплями. На рисунках 3.3.2б и 3.3.2в показано, что при увеличении B размер вторичных капель уменьшался. Также на рисунке 3.3.2 видно, что цвет вторичных капель также менялся в диапазоне 80–600 ед., при низком значении безразмерного линейного параметра взаимодействия они окрашивались равномерно, что также подтверждает однородность их состава красителей. При $B > 0,5$ появляется градиент цветов вторичных капель от 40–60 до 600–800 ед., свидетельствующий о слабой степени смешения жидкости.

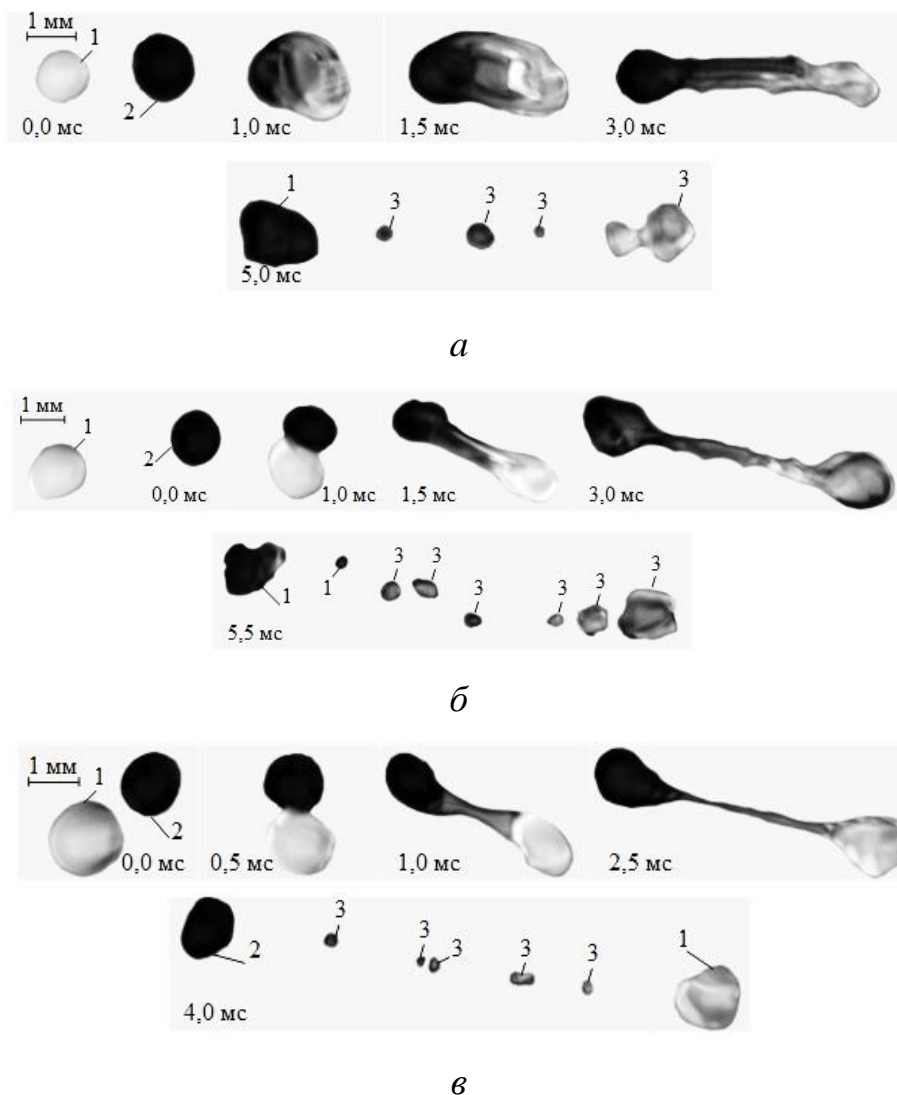


Рисунок 3.3.2 – Видеокадры дробления капель воды при различных значениях безразмерного линейного параметра взаимодействия: *a* – $B=0$; *б* – $B=0,6$; *в* – $B=0,95$; 1 – капля с Rhodamine B; 2 – капля с гелиевой краской; 3 – смешанная капля

Карта режимов соударения капель представлена на рисунке 3.3.3. При примерно одинаковом размере капель ($\Delta \approx 1$) граница дробления капель начинается при значении числа Вебера, равном 72, в то время как при $\Delta = 0-0,4$ значение критического числа Вебера начинается с 63. Границы дробления и разлета при снижении отношения размеров капель имеют общее смещение в сторону меньших значений We . Зарегистрировано существенное уменьшение размеров области отскока как по оси значения безразмерного линейного параметра взаимодействия, так и по оси числа Вебера. Установленная особенность обусловлена тем, что режим отскока происходит при довольно малых значениях числа Вебера (менее 15) и, соответственно, небольших значениях относительной скорости движения капель (как правило, не выше 1,5 м/с). При таких условиях силы инерции существенно ниже сил поверхностного натяжения.

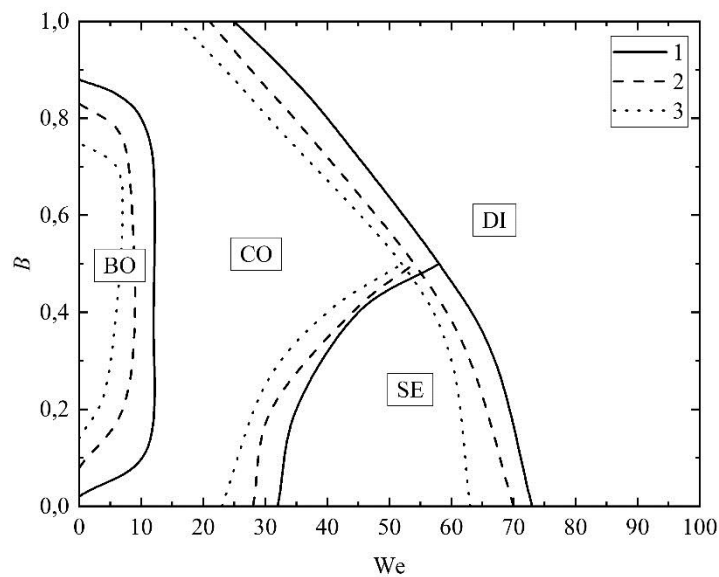
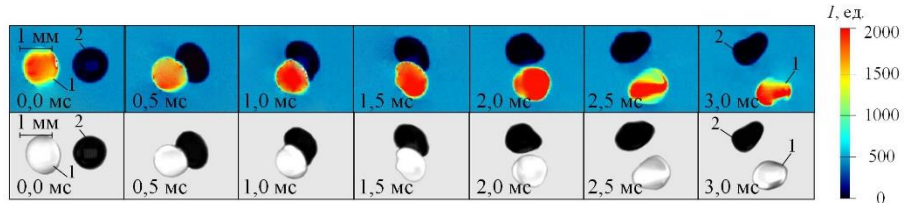


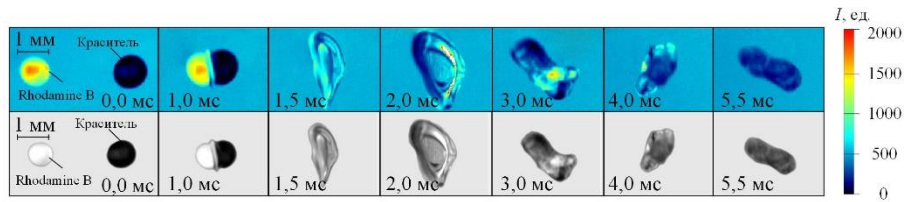
Рисунок 3.3.3 – Карты режимов соударений с использованием безразмерного линейного параметра взаимодействия капель [158]: 1 – $\Delta = 0,9-1$; 2 – $\Delta = 0,4-0,6$; 3 – $\Delta = 0-0,4$

Сравнение кадров режимов взаимодействия капель дистиллированной воды, обработанные в программе DaVis с оригинальными видеокдрами приведены на рисунке 3.3.4. Для визуализации средней интенсивности свечения капель

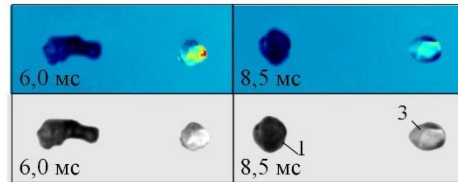
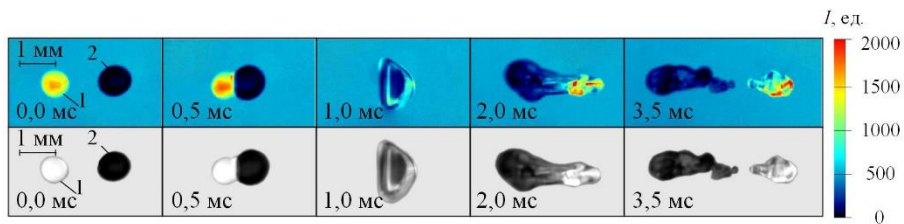
использовалась шкала от 0 до 2000 единиц (0 – черный, 2000 – красный). Такой подход позволил получить детальные изображения процесса смешения жидкостей.



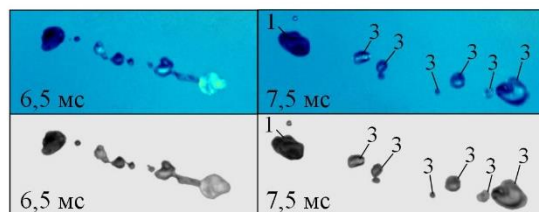
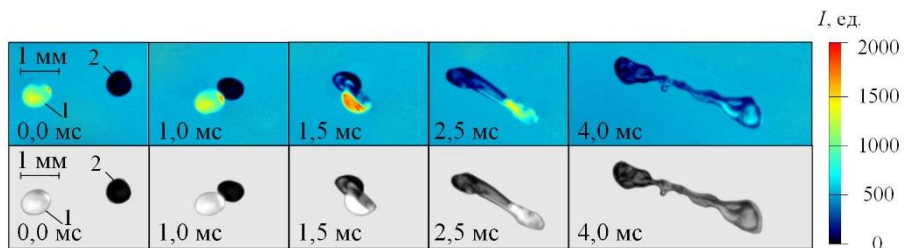
a



б



в



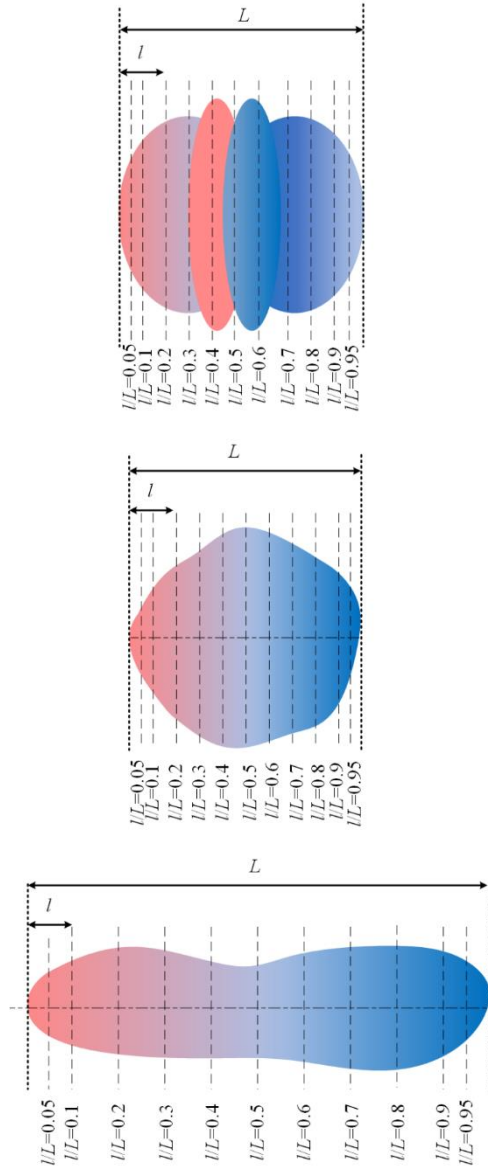
г

Рисунок 3.3.4 – Видеокадры режимов взаимодействия капель при обработке в программе DaVis: *a* – отскок; *б* – коалесценция; *в* – разлет; *г* – дробление

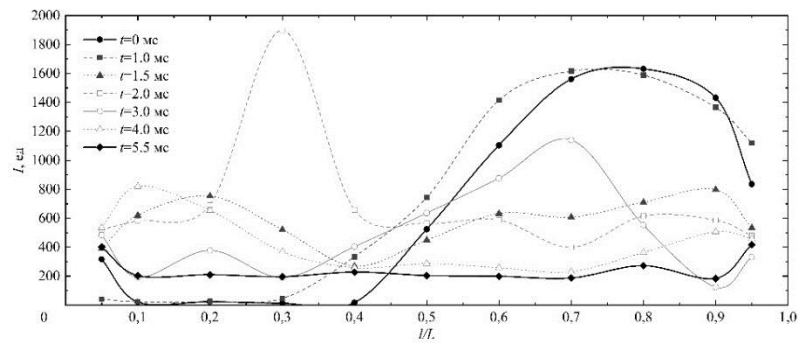
При отскоке (рисунок 3.3.4а) отчетливо наблюдается деформация капель. Отскок также сопровождался деформацией на начальном этапе, однако в данном случае силы упругости оказали растягивающее воздействие и капли в итоге разделились. При этом установлено изменение средней интенсивности светимости у капли с синим красителем на 70–150 %, у капли с Rhodamine В – 100–140 %. При дроблении вторичные капли образовались при разрушении жидкостного перешейка. За исключением двух больших вторичных капель, оставшихся от разрушения исходных, остальные вторичные капли имели отклонение в средней интенсивности светимости на уровне 20–50 %, что свидетельствует об интенсивном смешении жидкостей.

На рисунке 3.3.5а приведены основные этапы измерения интенсивности в разных сечениях результирующей капли в процессе ее трансформации. Из-за деформации капли и постоянного изменения ее размеров не менее 11 сечений для измерения средней интенсивности светимости проводились при постоянных значениях отношения расстояния секущей плоскости от границы изображения капли к общей длине капли l_d/L_d . Две крайние секущих плоскости проводились при значении l_d/L_d равном 0,05 и 0,95 для компенсации переходной области интенсивности на границе жидкость-газ. Измерения проводились для режимов коалесценции, разлета и дробления, так как при отскоке отсутствует обмен жидкостью между каплями и изменение интенсивности свечения (рисунок 3.3.5а) вызвано деформацией капли и возникающими внутренними течениями. По полученным осредненным данным построены графики изменения интенсивности свечения капель в различных сечениях с течением времени для ряда условий. Графики для коалесценции капель при $B=0$ и $B=0,3$ представлены на (рисунок 3.3.5б, в). Также из рисунков 3.3.5б и 3.3.5в видно, что при $B=0$ время выравнивания I до $\Delta I=200$ – 250 единиц по сечениям оказалось на 25–30 % процентов меньше, чем при $B=0,3$. Причиной этого является больший активно перемешивающийся объем капли в начальный момент взаимодействия при $B=0$, в

то время как при $V=0,3$ часть объемов жидкостей в каплях начинает движение только за счет сил вязкого трения, вызванных смещением части жидкости, тогда как, неподвижная часть капли препятствует этой деформации.



a



б

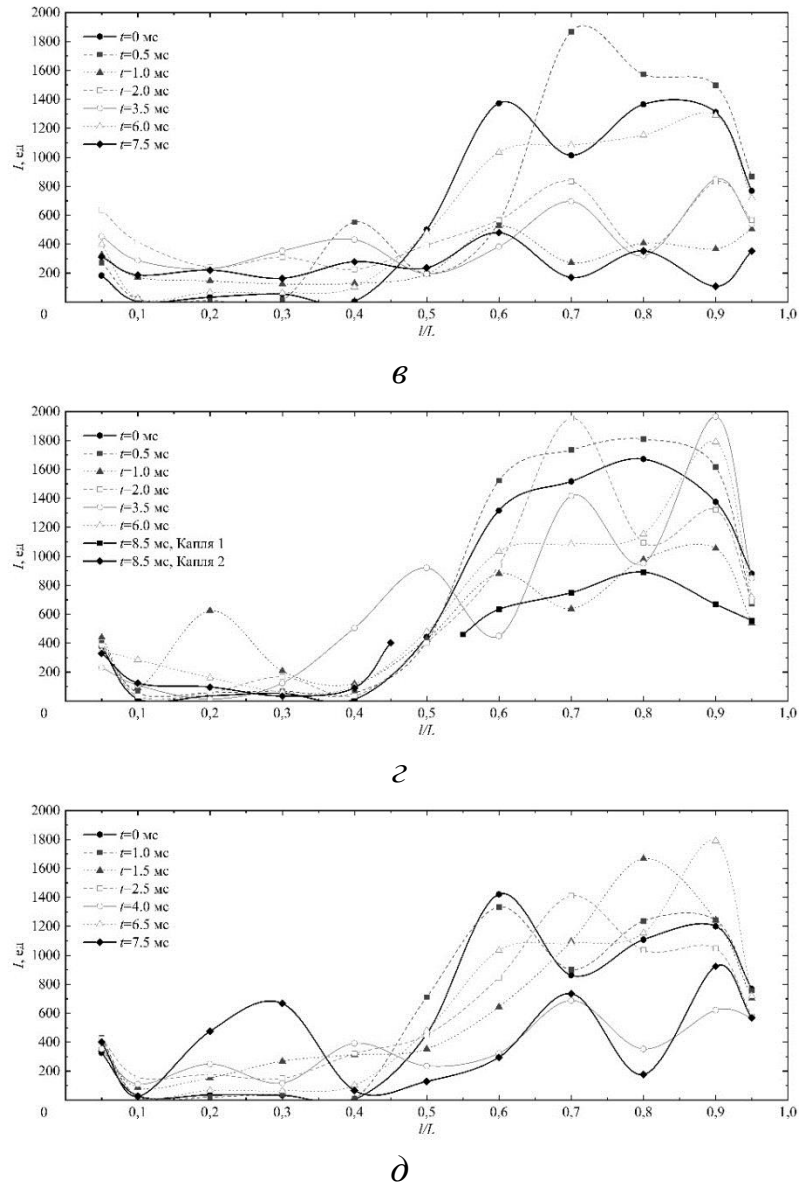


Рисунок 3.3.5 – Изменение средней интенсивности свечения по сечениям капель воды при их взаимодействии [158]: *а* – схематичное изображение сечений при измерении интенсивности; *б* – коалесценция, $B=0$, $We=21$; *в* – коалесценция, $B=0,3$, $We=23$; *г* – разлет, $B=0$, $We=53$; *д* – дробление, $B=0$, $We=86$

Изменение средней интенсивности светимости капель при разлете с $B=0$ и $We=53$ показано на (рисунок 3.3.5г). При деформации и смешении результирующей капли значение ΔI колебалось и в различных сечениях принимало близко к равному значение, со смещением в сторону капли с Rhodamine B. После разделения капель значения средней интенсивности светимости капли с Rhodamine B снижались относительно начального на 400–800 единиц. При этом не наблюдалось аналогичного роста у капли с синим

красителем. Это объясняется нелинейностью коэффициента светимости от концентрации Rhodamine В. При дроблении капля после распада жидкостного перешейка (рисунок 3.3.5д) наблюдался наибольший перепад среди всех режимов в средней интенсивности светимости результирующих фрагментов.

Из рисунка 3.3.6 установлено, что при снижении Δ уменьшается количество вторичных фрагментов. Чем выше значения относительной скорости движения капля, тем больше энергии расходуется на преодоление сил вязкости и поверхностного натяжения. При уменьшении отношения радиусов капля наблюдается снижение количества вторичных фрагментов при дроблении.

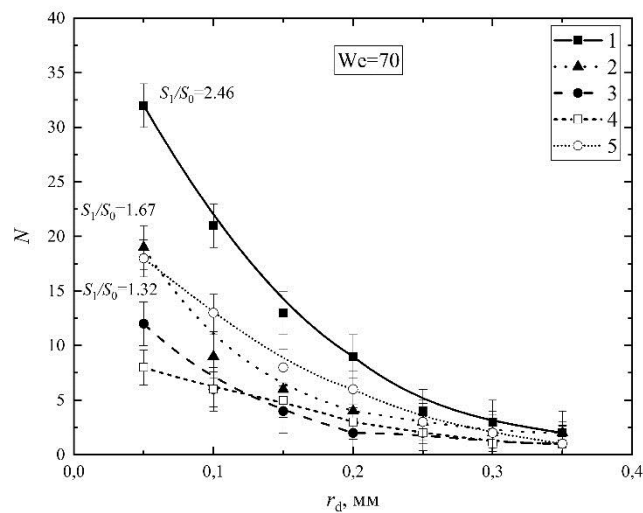


Рисунок 3.3.6 – Распределения образованных фрагментов воды по размерам после дробления, $We=70$ [158]: 1 – $\Delta=0,9-1$; 2 – $\Delta=0,4-0,6$; 3 – $\Delta=0-0,4$, 4 – вторичные капли с Rhodamine В при $\Delta=0,9-1$; 5 – вторичные капли с синим красителем при $\Delta=0,9-1$

Установленные особенности влияния свойств жидкости важны для прогнозирования режимов соударений при рассмотрении различных жидкостей. Приведенные на рисунке 3.3.6 данные позволили оценить критические значения B и We , тенденции изменения вида карт режимов соударений, образования вторичных капель и их размеров.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия капель жидкости при их соударении с учетом разной светимости мишени и снаряда. Такие исследования стали возможны за счет использования

методов PIV и LIF. Изменение средней интенсивности светимости результирующих капель зависит от режима взаимодействия, отношения размеров мишени и снаряда, значения линейного безразмерного параметра взаимодействия и состава капель. Увеличение вязкости снижает скорость смешения, снижение поверхностного натяжения незначительно увеличило значения данной скорости. При разлете капли изменили среднюю интенсивность светимости на 70–150 % и 100–140 % соответственно. При дроблении профиль средней интенсивности светимости оказался наиболее неоднородным, изменения составили 20–1400 % и 70–800 %, соответственно.

Нередко для изучения процесса смешивания слоев жидкостей в каплях при их взаимодействии используются различные красители. Для более детального изучения движения потоков жидкости в капле использована комбинация высокоскоростной видеорегистрации и метода Particle Image Velocimetry с трассирующими частицами диоксида титана (TiO_2). Такой подход позволил изучить процессы смещения и перемешивания слоев жидкости при коалесценции, дроблении и разлете капель. На рисунке 3.3.7 показаны видеogramмы с изображением капли и поля скорости конвекции, возникающие без внешнего воздействия в виде соударения (слева) и после столкновения (справа) для случая разлета капель. При движении капли в отсутствии внешних возмущающих воздействий (рисунок 3.3.7, слева) поля скорости не имеют ярко выраженных экстремумов и высоких значений ($U_c > 30$ мм/с). Основной же причиной потоков в свободнопадающей капле является продолжение формирования сферы после отрыва жидкости от капельного дозатора и интенсификация течений посредством обдува капли встречным потоком воздуха при падении [192]. После столкновения и разлета капель (рисунок 3.3.7, справа) зарегистрировано существенное (в 3–10 раз) увеличение скорости конвекции. При этом диапазоны изменения скорости конвекции зависят как от режима соударения (разлет, дробление или коалесценция), так и от группы других факторов (например, скорости движения и размеры капель, угол столкновения).

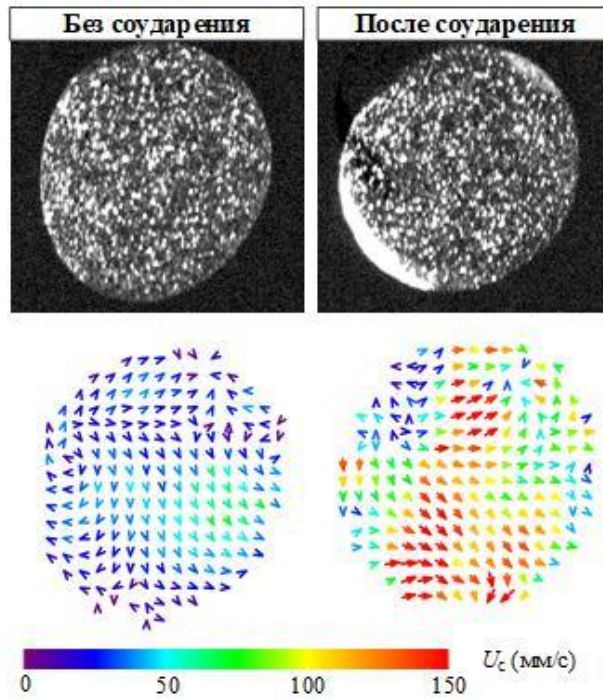


Рисунок 3.3.7 – Типичные видеogramмы капли и соответствующие поля скорости конвекции в капле в отсутствии (слева) и после столкновения (справа)

Таким образом, на начальном этапе проведения экспериментов задача состояла в определении диапазонов изменения средних (U_c) скоростей конвекции в свободно падающей капле при варьировании определяющих параметров – радиуса и скорости движения капли. Соответствующие данные необходимы для установления диапазонов влияния условий столкновения на изменение скорости конвекции в капле. Примеры таких зависимостей, полученных в экспериментах, приведены на рисунке 3.3.8а,б.

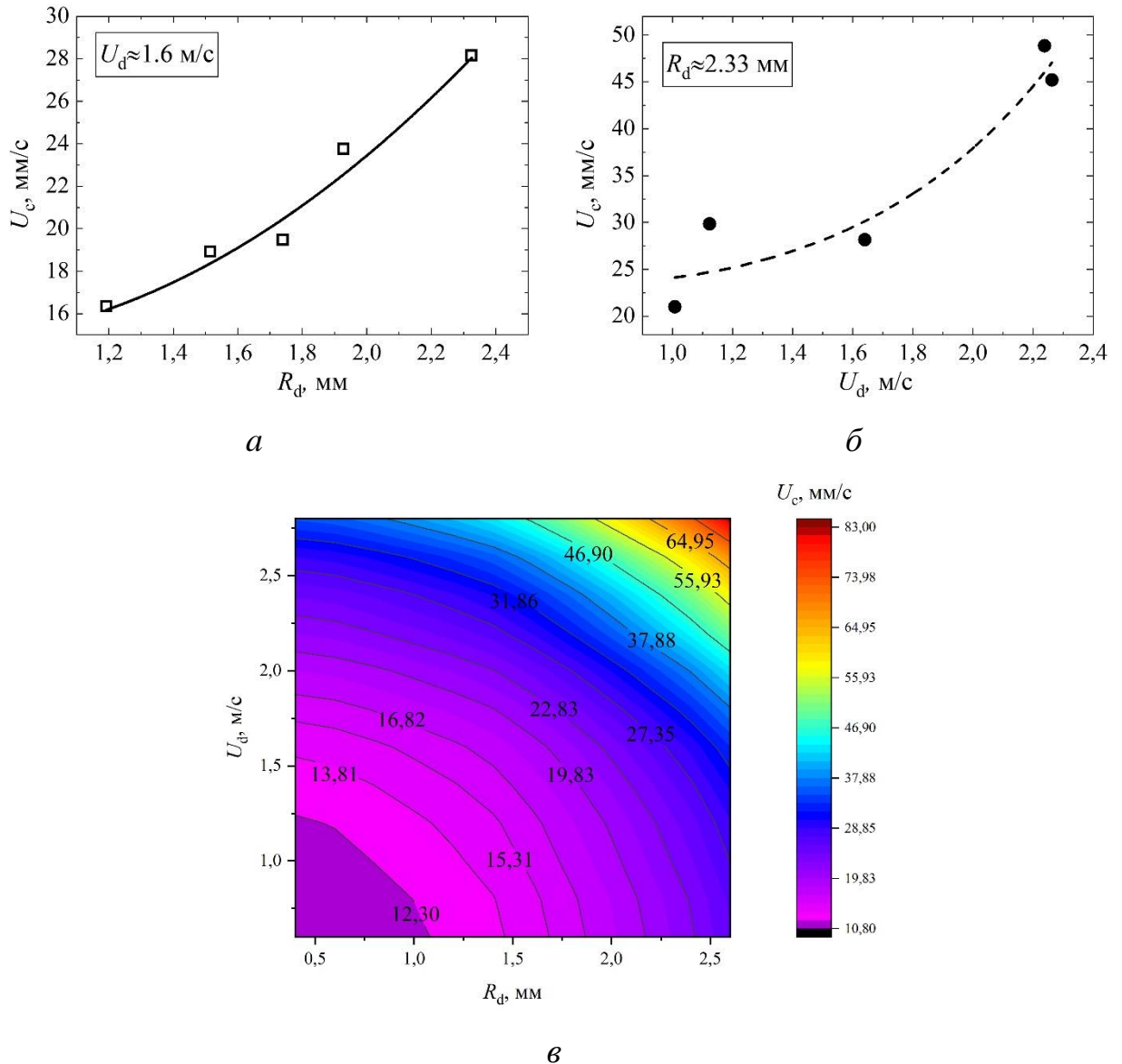


Рисунок 3.3.8 – Типичные зависимости средних значений скорости конвекции в капле при свободном падении от радиуса (*а*) и скорости движения (*б*) капли, а также 3D поверхности средних скоростей конвекции в капле, полученные в серии измерений (*в*) [193]

По результатам серии измерений получена 3D поверхность для иллюстрации значений средних скоростей конвекции в капле при изменении двух определяющих параметров (рисунок 3.3.8в). Видно (рисунок 3.3.8), что раздельное увеличение радиуса и скорости движения капли приводит к увеличению (до 2 раз) скоростей конвекции в капле. Совместный же рост

значений данных параметров может существенно (в 5-6 раз) интенсифицировать значения U_c . Полученные результаты важны для понимания процессов, происходящих в одиночной капле без соударения с соседней и необходимы для дальнейшего анализа и обобщения результатов исследований.

На рисунках 3.3.9-3.3.11 приведены типичные примеры поля скорости конвекции в образующейся в результате бинарного столкновения капле воды спустя различные интервалы времени с момента столкновения для трех режимов взаимодействия (разлет, дробление, коалесценция).

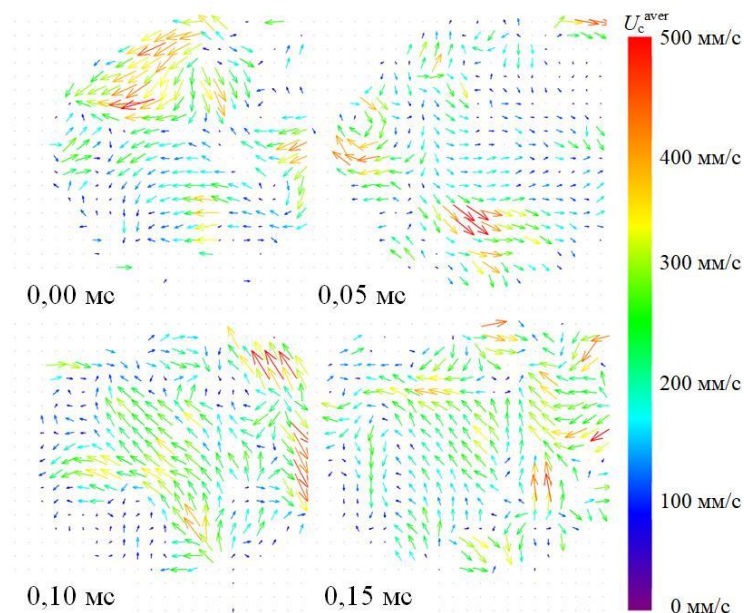


Рисунок 3.3.9 – Скорости конвекции при дроблении через 0,04 с после взаимодействия исходных капель ($R_{d1}=0,42$ мм, $R_{d2}=1,07$ мм, $U_{rel}=1,98$ м/с) [193]

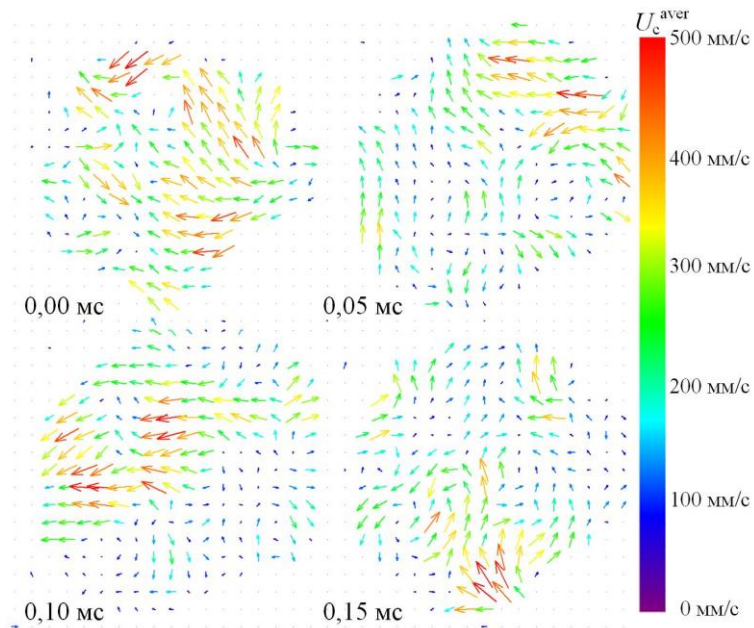


Рисунок 3.3.10 – Скорости конвекции при разлете через 0,04 с после взаимодействия исходных капель ($R_{d1}=0,37$ мм, $R_{d2}=0,78$ мм, $U_{rel}=1,63$ м/с) [193]

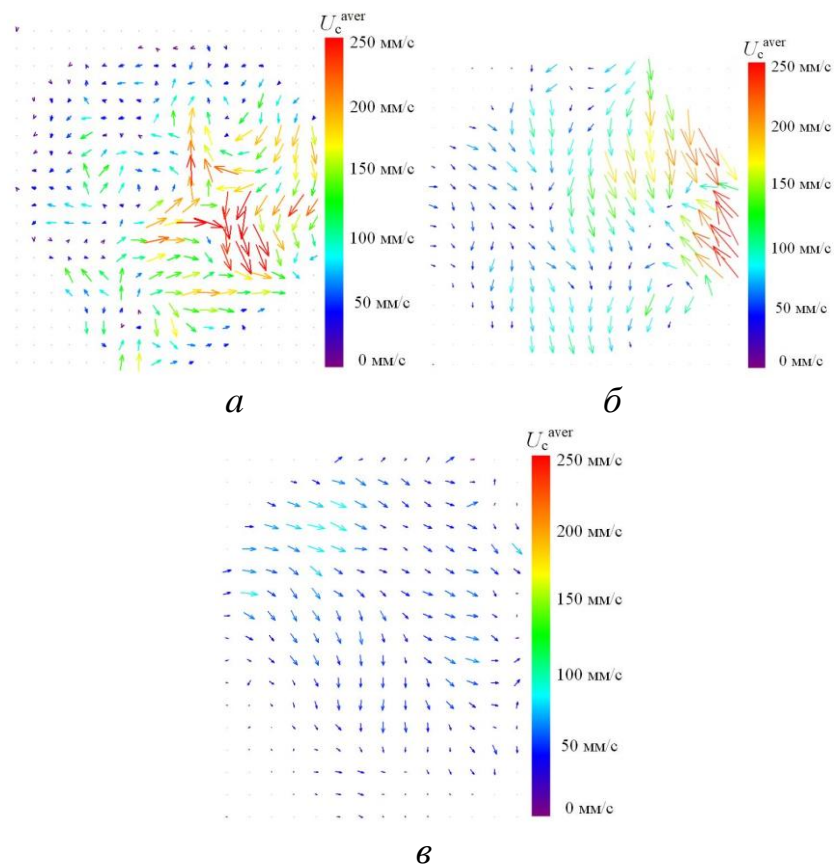


Рисунок 3.3.11 – Скорости конвекции в каплях при коалесценции (характеристики результирующей капли $R_d^{rel}=1,87$ мм, $U_d^{rel}=0,98$ м/с) через разное время после столкновения: а – 0,1 с; б – 0,2 с; в – 0,3 с [193]

На рисунках 3.3.9 и 3.3.10 видно, что через 0,04 с с момента столкновения поле скорости неоднородное. Формируются области локальных максимумов скоростей конвекции, значения U_c в которых могут достигать 400-500 м/с. При этом по результатам экспериментов сформулирован вывод о том, что основными причинами роста значений U_c являются: деформация поверхности капли (характерно в основном для режимов коалесценции и разлета) и вращения капли (присутствует в той или иной степени при каждом режиме взаимодействия). В качестве же основных отличий поля скорости конвекции в капле после столкновения (от поля скорости свободно падающей капли) выделены: наличие областей локальных максимумов скоростей конвекции; образование в капле двух или более микро-вихрей; “вращательный” характер поля скорости. Выделенные особенности характерны для малого (как правило, до 0,3 с) интервала времени после соударения капель (рисунок 3.3.11). Так, установлено (рисунок 3.3.11), что уже спустя 0,3 с после бинарного соударения результирующие капли имели уже близкие к сферическим формы, и подвергались меньшим колебаниям поверхности. Как следствие, размеры изменялись несущественно в процессе перемещения. Поле скорости в данном случае имело более равномерное направление движения. Значения скорости конвекции (рисунок 3.3.11в) снизились в 2–2,5 раза относительно момента, соответствующего 0,1 с после соударения (рисунок 3.3.11а). Также малая скорость движения трассирующих частиц в капле косвенно свидетельствует о завершении процесса смешения жидкости из разных капель и достаточно инерционном движении результирующей капли. При этом установленная особенность характерна для всех режимов взаимодействия исходных капель (разлет, дробление, коалесценции).

Использованный подход при обработке результатов позволил получить значения U_c для широкого диапазона варьируемых параметров R_{d1} , R_{d2} , Δ , U_{rel} , B , We и Oh . В таблицах 3.3.1–3.3.3 приведены средние значения скорости конвекции в результирующей капле (U_c) после столкновения (через 0,04 с) для трех режимов взаимодействия при варьировании групп параметров (Δ ; U_{rel} ; B ; We). Влияние

каждого отдельного параметра на U_c определялось путем варьирования одного из них и фиксированном значении других. Наибольшее влияние на среднюю скорость конвекции для всех режимов взаимодействия оказали: Δ , U_{rel} , и We (Таблица 3.3.1– 3.3.3).

Таблица 3.3.1 – Средние значения скорости конвекции в результирующей капле (U_c) после столкновения (через 0,04 с) в режиме коалесценции при варьировании параметров [193]: 1 – Δ ; 2 – U_{rel} ; 3 – B ; 4 – We

№ группы	Параметры						U_c , м/с
	R_{d1} , мм	R_{d2} , мм	Δ	U_{rel} , м/с	B	We	
1			0,3				
	0,43	0,85	0,5	1,45	0,4	116,9	223,7
			0,7				
2	0,41	0,87	0,47	1,5	0,36	112,7	227,3
	0,4	0,84	0,48	1,6	0,31	76,8	207,7
				2,0			
3	0,4	0,84	0,48	1,59	0,3	76,8	207,7
	0,43	0,85	0,50	1,45	0,4	116,9	223,7
					0,9		
4	0,41	0,77	0,53	1,48	0,43	70-80	149,7
	0,41	0,87	0,47	1,50	0,36	110-120	227,3
						110-120	

Таблица 3.3.2 – Средние значения скорости конвекции в капле (U_c) после столкновения (через 0,04 с) в режиме разлета при варьировании параметров [193]:
 1 – Δ ; 2 – U_{rel} ; 3 – B ; 4 – We

№ группы	Параметры						U_c , м/с
	R_{d1} , мм	R_{d2} , мм	Δ	U_{rel} , м/с	B	We	
1	0,31	1,08	0,3	1,77	0,57	79,6	126,6
	0,41	0,78	0,5	1,72	0,16	63,2	177,1
	0,49	0,76	0,7	2,81	0,55	146,5	212,0
2	0,40	0,87	0,45	1,5	0,54	72,3	181,8
	0,32	0,7	0,45	1,75	0,80	63,4	185,3
	0,39	0,76	0,51	2,0	0,86	69,4	193,9
3	0,32	0,88	0,36	1,60	0,3	96,1	169,6
	0,37	0,92	0,40	1,64	0,6	102,1	180,2
	0,31	1,06	0,29	2,15	0,9	86,6	193,4
4	0,41	0,78	0,52	1,72	0,16	60–70	177,1
	0,41	1,06	0,38	1,55	0,68	80–90	236,6
	0,39	0,82	0,47	1,57	0,93	110–120	293,3

Таблица 3.3.3 – Средние значения скорости конвекции в капле (U_c) после столкновения (через 0,04 с) в режиме дробления при варьировании параметров [193]: 1 – Δ ; 2 – U_{rel} ; 3 – B ; 4 – We

№ группы	Параметры						U_c , м/с
	R_{d1} , мм	R_{d2} , мм	Δ	U_{rel} , м/с	B	We	
1	0,47	1,04	0,5	2,92	0,49	37,5	48,5
	0,49	0,81	0,7	2,89	0,57	48,4	166,2
	0,96	1,00	0,9	2,11	0,89	116,6	209,9
2	0,93	1,43	0,65	1,9	0,95	102,8	117,7
	0,55	1,08	0,51	2,3	0,28	89,7	55,8
	0,53	0,99	0,53	2,9	0,44	197,0	306,4
3	0,55	1,08	0,51	2,26	0,3	89,7	55,8
	0,49	0,81	0,6	2,89	0,6	48,4	166,2
	0,58	1,08	0,54	1,71	0,9	88,4	236,5

4	0,4	0,77	0,52	3,03	0,84	60–70	157,4
	0,48	0,67	0,72	2,84	0,17	80–90	174,8
	0,91	1,00	0,91	2,26	0,89	110–120	209,9

Среднее отношение размеров капель в экспериментах соответствовало диапазону 0,65–0,75. Увеличение значения этого параметра от 0,5 до 1 приводит к росту значений U_c , что связано с активным смешением жидкостей в локальной области результирующей капли. Соответственно, с увеличением B растет объем жидкости, задействованной в массообменном процессе. При этом скорости конвекции в удаленной от нее области имели невысокие значения ($U_c < 50$ мм/с). Повышение отношения размеров капель также приводило к росту объема активно смешиваемой жидкости и увеличению значения U_c , что продемонстрировано в таблицах 3.3.1–3.3.3. Влияние U_{rel} и We при постоянных размерах капель согласуется с увеличением кинетической энергии при столкновении. Также из таблиц 3.3.1–3.3.3 видно, что влияние на среднюю скорость конвекции оказывает режим взаимодействия капель. Максимальные значения U_c установлены для режима дробления. Это согласуется с увеличением относительной скорости движения и значений числа Вебера и, соответственно, кинетической энергии исходных капель.

С увеличением относительной скорости возрастает средняя скорость конвекции трассирующих частиц в капле (таблицы 3.3.1–3.3.3). При значении относительной скорости $U_{rel} \approx 1,2$ м/с в режиме коалесценции зарегистрирован минимальный разброс средних скоростей конвекции, который достигал 100 %. При этом для всех U_{rel} после прохождения капель 60 см (более 0,4 с с момента взаимодействия) зарегистрировано минимальное значение средней скорости конвекции $U_c = 25–40$ мм/с. Эта величина сопоставима с зарегистрированной при свободном падении капель без взаимодействия ($U_c = 20–35$ мм/с), что свидетельствует о близкой к завершению стадии смешения жидкости двух капель. Наибольший разброс значений U_c зарегистрирован при максимальной относительной скорости. При этом, как отмечено ранее, после преодоления 60 см

конвективные потоки в капле серьезно замедлялись, и отношение значений U_c через 20 см после столкновения капель к U_c через 60 см составляло $k_c=4,9-6,3$.

При росте значения безразмерного линейного параметра взаимодействия средняя скорость трассирующих частиц в капле увеличивалась. Данный эффект связан с изменением объема взаимодействующей жидкости в каплях. В режиме коалесценции изменение B от 0,1 до 0,7 привело к росту U_c на 10–25 %. При дроблении в аналогичном случае средняя скорость конвекции трассирующих частиц возрастала в 3-5 раз. Такое относительное изменение U_c связано с разницей абсолютных значений средней скорости конвекции трассирующих частиц, так как режим дробления регистрировался при больших значениях числа Вебера (как правило, выше 75), что также привело к увеличению U_c относительно других режимов на 30–50 %. В режиме разлета в экспериментах значение U_c с ростом B увеличивалось не более, чем на 15 %.

С целью обобщения результатов исследований в качестве параметра, включающего основные характеристики капли, выбрано число We . При его вычислении использовались размеры и скорости движения результирующей капли. На рисунке 3.3.12 приведены зависимости вида $U_c=f(We)$ для трех различных режимов соударения капель. Также на рисунке 3.3.12 нанесены кривые, отражающие значения U_c для свободно падающей капли при тех же значениях We . Видно (рисунок 3.3.12), что после соударения скорость конвекции возрастает в несколько раз по сравнению со свободно падающей каплей с теми же параметрами. Для оценки вклада процесса бинарного соударения капель на скорости конвекции рассчитаны средние значения коэффициента k_c (отношение U_c капли, образовавшейся в результате столкновения, к U_c в свободно падающей капле). Средние значения параметра k_c для различных режимов составили: DI – 8,65, SE – 10,05, CO – 10,46.

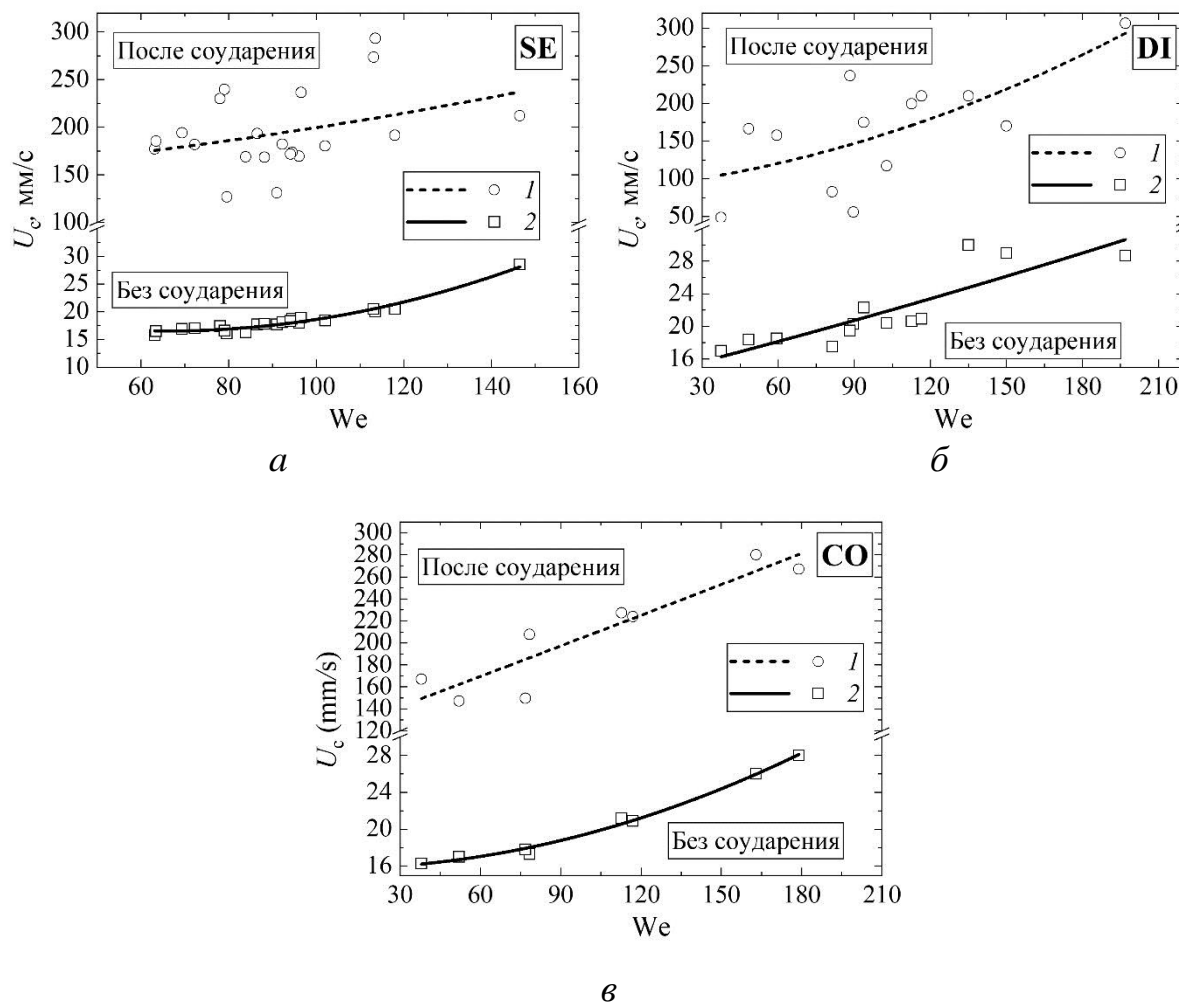


Рисунок 3.3.12 – Зависимости скорости конвекции от значения числа Вебера при разлете (*a*), дроблении (*б*), коалесценции (*в*) через 0,04 с после столкновения [193]: 1 – значения U_c для капли, образовавшейся при столкновении; 2 – значения U_c для свободно падающей капли (при аналогичных значениях параметров R_d и U_d)

На рисунке 3.3.13 приведены тренды изменения скорости конвекции в каплях при коалесценции на протяжении 0,3 с после столкновения при трех значениях U_{rel} . Установлено, что скорость конвекции в капле имеет максимальные значения на протяжении 0,05 с после бинарного соударения капель. Далее (несмотря на увеличение скорости движения капли) со временем скорость конвекции в капле экспоненциально снижается (рисунок 3.3.13). При этом, установлено, что продолжительность процесса снижения зависит от значений U_{rel} .

При увеличении U_{rel} от 1,2 м/с до 2,2 м/с время стабилизации значений скорости конвекции (ее уменьшение до значений, соответствующих свободно падающей капле) увеличивается в диапазоне 0,29-0,37 с.

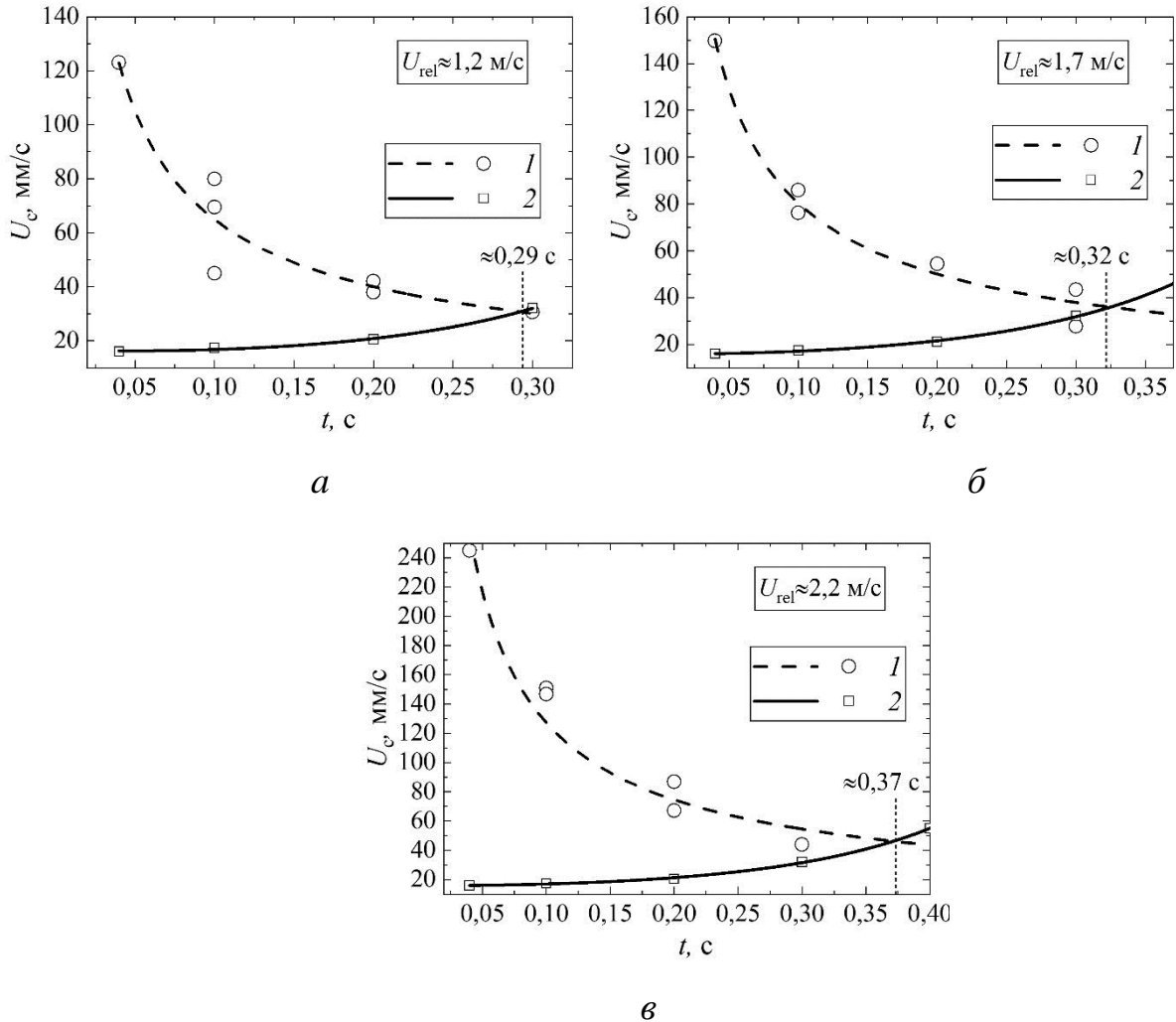


Рисунок 3.3.13 – Изменение скорости конвекции в каплях ($R_d \approx 1,75$ мм) после коалесценции на протяжении 0,3 с с момента столкновения (а – при $U_{rel} \approx 1,2$ м/с, б – при $U_{rel} \approx 1,7$ м/с, в – при $U_{rel} \approx 2,2$ м/с) [193]: 1 – значения U_c для капли, образовавшейся в результате столкновения; 2 – значения U_c для свободно падающей капли (при аналогичных значениях параметров R_d и U_d)

3.4. Коллективные эффекты при соударении капель жидкостей и твердых частиц

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований условий и характеристик соударений капель жидкостей в аэрозольном облаке при варьировании их концентрации. Установлены предельные значения последней, при превышении которых количество соударений капель практически не меняется, т.е. дисперсность аэрозольного облака сохраняется. Представлены результаты комплексной оценки совместного влияния соотношения размеров капель, их концентрации, значений числа Вебера, углового и линейного параметров взаимодействия на частоту соударений. Определена частота реализации данных режимов при разной концентрации капель и условиях соударений. Показаны условия, при которых обеспечивается стабильное распределение капель в аэрозольном облаке.

В промышленных газопарокапельных установках обычно применяется аэрозольное распыление жидкости. Так как размеры капель и непосредственно созданного потока жидкости форсуночным устройством ограничены, то интерес представляет изучение процесса соударения капель в таком потоке. Такое изучение необходимо для отслеживания укрупнения и измельчения капель, поскольку укрупнение капель может привести к снижению эффективности работы установок, а измельчение, напротив, к повышению такого показателя. На рисунке 3.4.1 приведены зависимости количества соударяющихся капель в аэрозольном потоке от концентрации их в зоне регистрации в течение 0,1 с, т.е. рассмотрен достаточно малый по длительности интервал впрыска жидкости. Так как форсуночное устройство не позволяет создавать капли идентичных размеров, для оценки количества и последствий соударения необходимо разделение по подгруппам в зависимости от отношения размеров капель ($\Delta=0-0,3$; $\Delta=0,3-0,7$; $\Delta=0,7-1$). Установлено, что при небольших значениях числа Вебера (от 0 до 15) рост числа соударений капель прослеживается во всем диапазоне варьирования их относительной концентрации. Такая закономерность обусловлена невысокой

скоростью взаимодействия капле, что приводит к росту времени нахождения их в области регистрации. Таким образом, капли разных размеров успевают догонять друг друга.

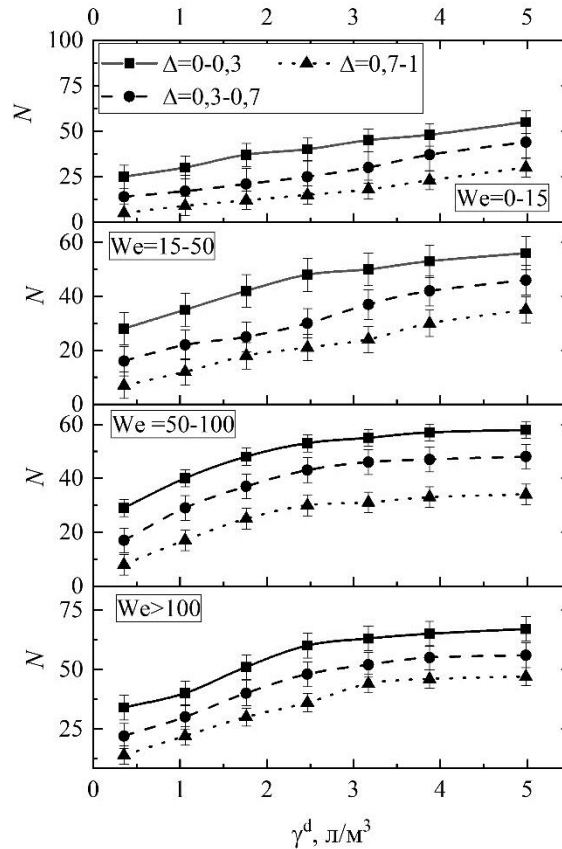


Рисунок 3.4.1 – Зависимости количества соударяющихся капле в области регистрации за 0,1 с от их концентрации, значений числа Вебера и отношения размеров двух соударяющихся капле [194]

Во всем выбранном диапазоне значений числа Вебера зарегистрирована общая закономерность изменения числа соударяющихся капле при варьировании соотношения их размеров. В частности, при $\Delta=0,7-1$ количество соударений минимально за счет того, что капли близких размеров, а, следовательно, силы тяготения, действующие на них, близки. Указанный эффект приводит к тому, что капли не могут догнать друг друга. Поэтому соударения не происходят. Если капли всё же догоняют друг друга или касаются при параллельном движении, то они расходятся вследствие недостаточности кинетической энергии для

преодоления сил поверхностного натяжения. При увеличении значения числа Вебера до 50 отмечается, что лишь при росте концентрации капель в зоне регистрации до $\gamma \approx 3$ л/м³ количество соударений увеличивается, а далее количество соударений практически не меняется. Это связано с избыточным количеством капель в зоне регистрации и их высокой скоростью движения в газовой среде. Соответственно, относительное смещение капель по сравнению друг с другом минимально. На рисунке 3.4.1 показано, при $We > 100$ количество соударяющихся капель не изменяется при концентрации более 3 л/м³.

Важная особенность, установленная при анализе полученных видеogramм экспериментов, состояла в том, что при росте концентрации капель в газовой среде выше некоторого предельного значения (в диапазоне $\gamma_d = 3-5$ л/м³ в зависимости от отношения размеров и значения числа Вебера) регистрировалось существенное замедление смещения движущихся капель относительно друг друга в аэрозольном облаке. Это связано с тем, что чем меньше расстояния между каплями при впрыске форсунками (начальные удаления капель относительно друг друга в аэрозольном облаке), тем ниже давление газовой среды между ними и выше силы инерции аэрозольного облака, вызванные гравитационной силой. В проведенных экспериментах аэрозольный поток осаждался в газовой среде с сохранением расстояния между каплями. Чем ближе размеры капель (отношение их размеров стремится к 1), тем значительнее влияние данного фактора. Если же размеры капель в аэрозольном облаке существенно отличались, то проявлялась иная тенденция. Мелкие капельки при достижении впереди идущих крупных капель отскакивали и разворачивались. Это приводило к тому, что они начинали движение навстречу следующему эшелону капель. В таких условиях повышалась частота коалесценции жидкостных фрагментов.

Следует отметить, что отношение размеров соударяющихся капель влияло не только на частоту взаимодействия, но и на количество образующихся жидкостных фрагментов. Это связано не только со сменой режимов, в частности,

отскок и разлет довольно часто сменяются коалесценцией и дроблением. Основная зарегистрированная закономерность состоит в том, что чем больше размер одной из соударяющихся капель, тем значительнее трансформация ее поверхности относительно сферической формы. Чаще всего регистрировалось закручивание капли в виде вытянутого эллипсоида относительно центра масс. При попадании второй капли в такой эллипсоид (чаще даже гантелевидный объект) происходило образование группы мелких жидкостных фрагментов. Чем больше размер второй соударяющейся капли, тем выше значение числа Вебера и интенсивнее измельчение в зоне соударения.

Линейный параметр взаимодействия позволяет оценивать влияние центричности соударения капель на последствия столкновений. На рисунке 3.4.2 представлены зависимости количества соударяющихся капель от их концентрации в области регистрации при варьировании линейного параметра взаимодействия от 0 до 1. Установлено, что при увеличении концентрации капель более 4 л/м^3 линейный параметр взаимодействия практически не оказывает влияния на количество соударений капель. При меньших же концентрациях максимальное количество соударяющихся капель зарегистрировано при линейном параметре взаимодействия около 1.

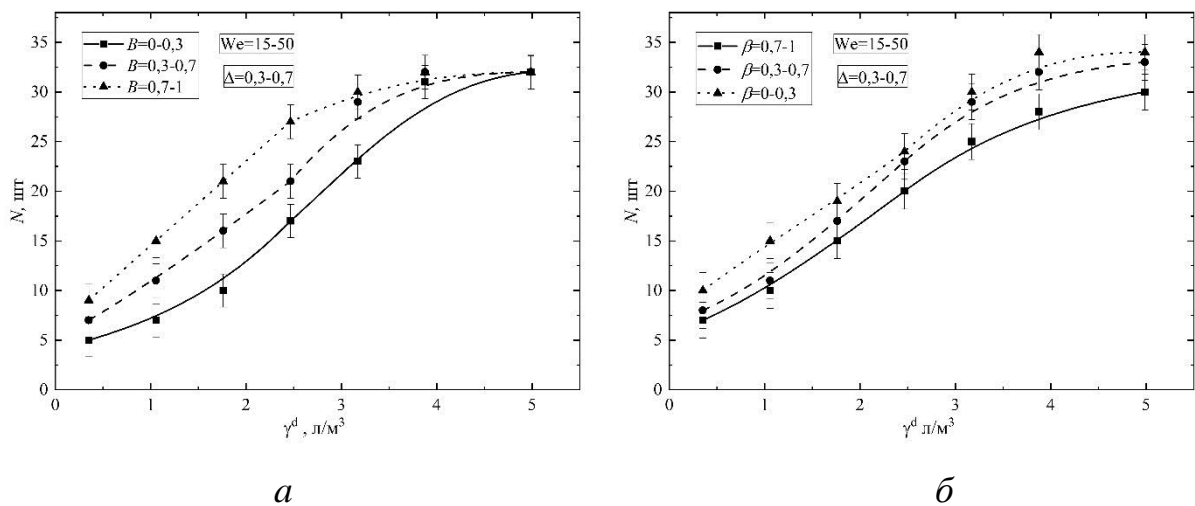


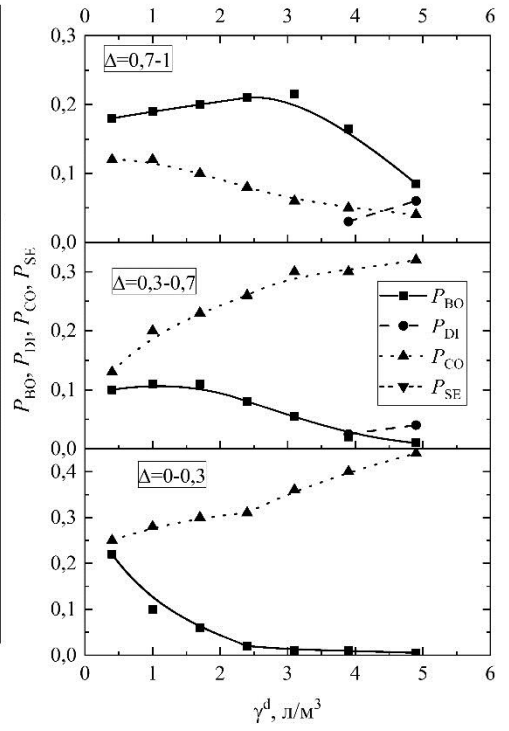
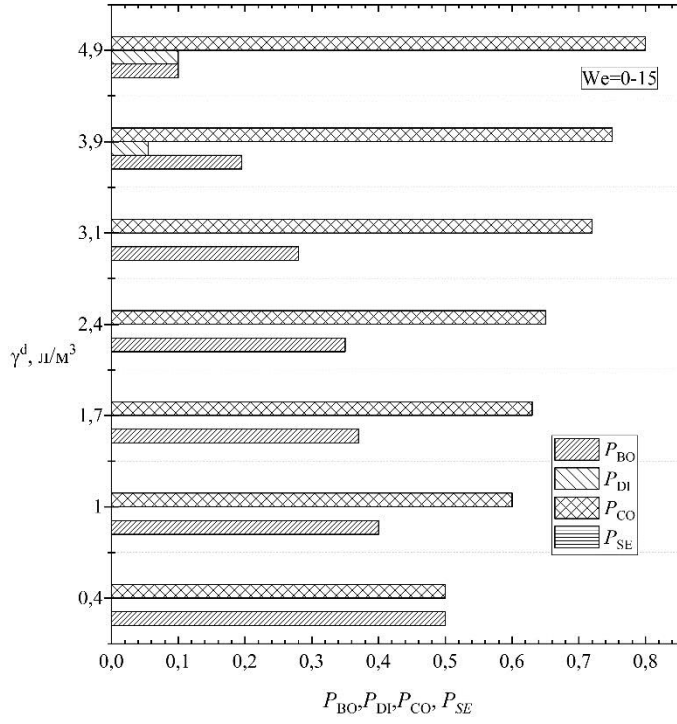
Рисунок 3.4.2 – Зависимости количества соударяющихся капель в области регистрации за 0,1 с от их концентрации, безразмерного линейного параметра (*а*) и безразмерного углового параметра взаимодействия (*б*) [194]

Угловой параметр взаимодействия позволяет оценить угол атаки аэрозольных потоков относительно друг друга. При разных скоростях движения значение угла атаки, соответствующее наибольшему количеству соударений капель, варьируются. На рисунке 3.4.2б показано влияние такого параметра на количество соударений капель при варьировании концентрации от 0,3 до 5 л/м³. Установлено, что наибольшее количество соударяющихся капель во всем диапазоне варьирования их концентрации характерно для углового параметра взаимодействия, стремящегося к 0, т.е. угол атаки капель близок к 90°.

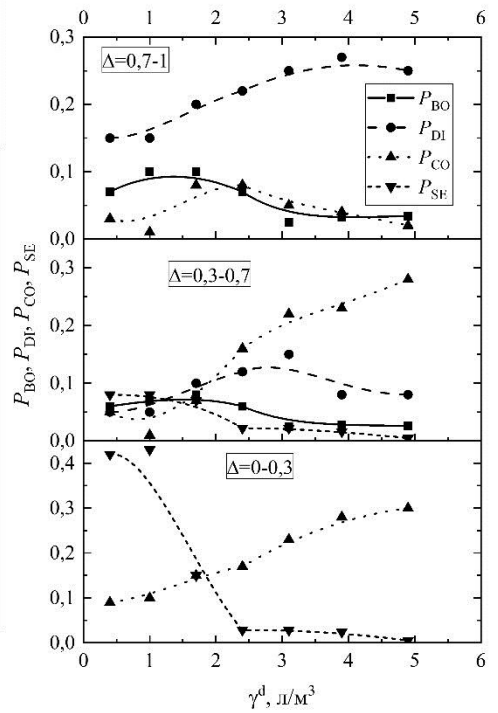
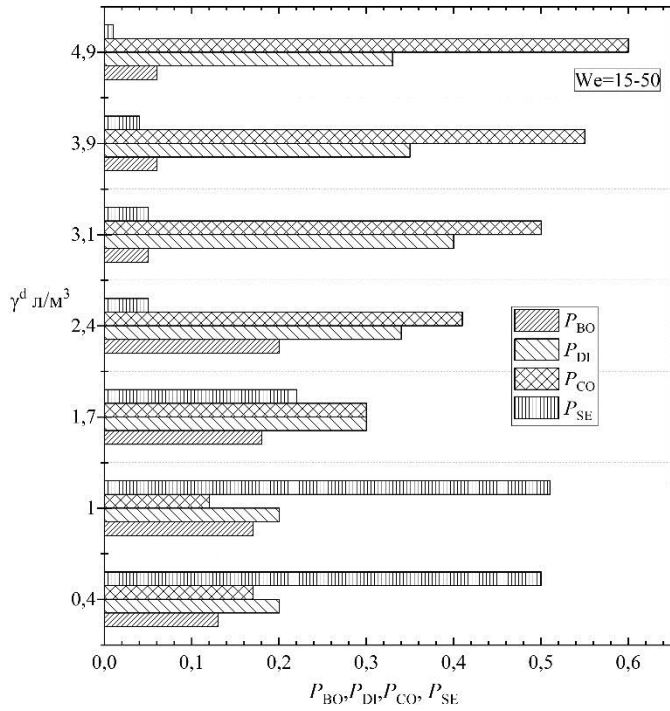
Важная закономерность, установленная в проведенных опытах, состоит в том, что характер воспроизведения того или иного режима соударений капель является вероятностным. Это связано с проявляющимися синергетическими эффектами влияния группы факторов и сил на режимы и последствия соударений. В качестве типичных выделены такие факторы, как закручивание капель за счет касания с соседними, формирование вокруг них интенсивных конвективных течений, приводящих к росту давления газов между каплями. Вследствие достаточно высокой относительной плотности капель в газовой среде соударение двух приводило к цепному характеру соударений группы соседних. Поскольку данные процессы происходили с движущимися каплями, то возникало перераспределение жидкостных фрагментов по большому объему аэрозоля даже за счет соударений в малом пространстве. Определяющую роль при переходе от разлета к отскоку капель играла относительная скорость движения, а при переходе от коалесценции к дроблению – отношение размеров. Так как оба параметра менялись в процессе движения аэрозоля, то переходы происходили непрерывно.

Для промышленных установок особый интерес представляют последствия соударения капель жидкости между собой, так как укрупнение капель ведет к снижению эффективности систем распыления, а их измельчение, наоборот, к большей эффективности. На рисунке 3.4.3 представлены вычисленные при

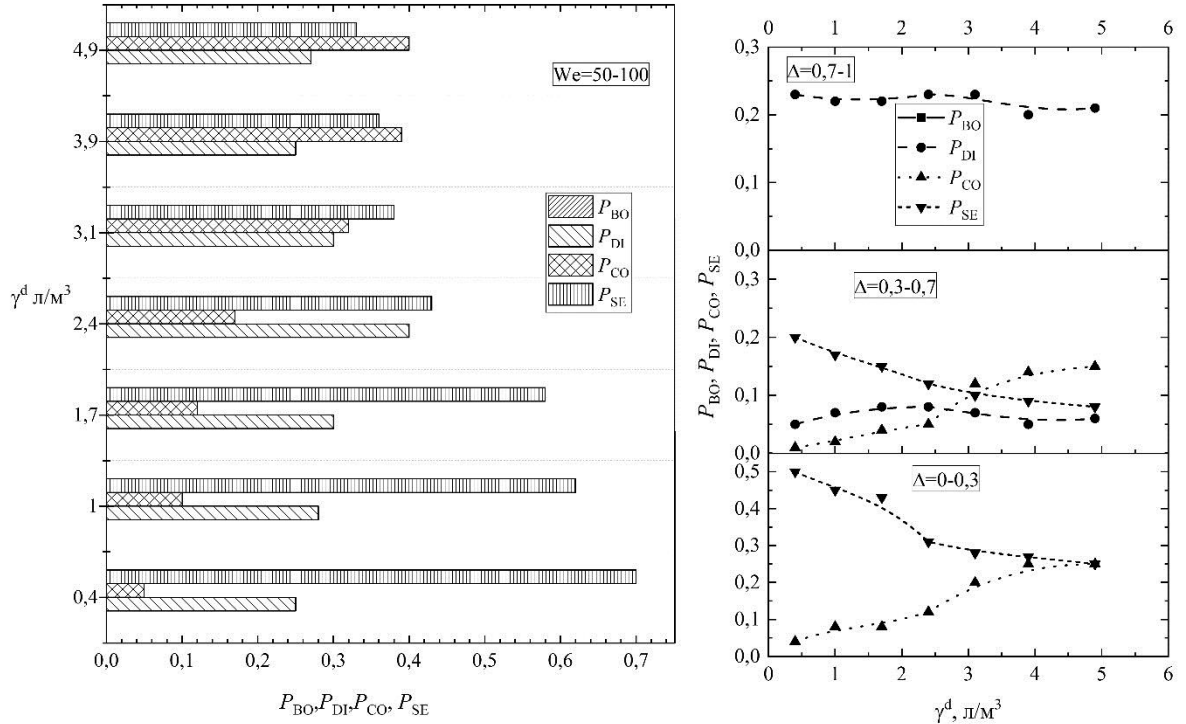
обработке результатов опытов частоты реализации четырех исследованных режимов взаимодействия капель жидкости (отскок, коалесценция, дробление, разлет) в зависимости от величины их концентрации в области регистрации при варьировании размеров капель. На рисунке 3.4.3а видно, что при значениях числа Вебера от 0 до 15 и концентрации капель меньше 3 л/м^3 доминируют режимы отскока и коалесценции. Для одинаковых размеров капель режим отскок преобладает над коалесценцией, а при разных размерах капель доминирует коалесценция. Это связано с тем, что капля большего размера обволакивает меньшую и впоследствии поглощает. Когда соударяющиеся капли имеют одинаковый размер, то происходит отскок. При увеличении концентрации капель более 4 л/м^3 зарегистрировано доминирование режима дробления вследствие большого количества соударений и трансформации капель. На рисунке 3.4.3б представлены зависимости частот реализации от концентрации капель в области регистрации при значениях числа Вебера от 15 до 50. Режим дробления не реализуется в случае капель с отношением размеров $0-0,3$, так как большая капля поглощает меньшую, либо пробивает ее насквозь. При значении Δ около 1 доминирует режим дробления капель (за счет одинакового размера), что приводит к наибольшей площади взаимодействия капель. Такая же особенность режима дробления прослеживается на рисунке 3.4.3в, г. Особенностью взаимодействия капель при значениях числа Вебера более 50 является преобладание режима разлета при малых концентрациях. При увеличении концентрации капель происходит перераспределение частот реализации режимов, в частности, интенсивность разлета снижается, а дробления растет.



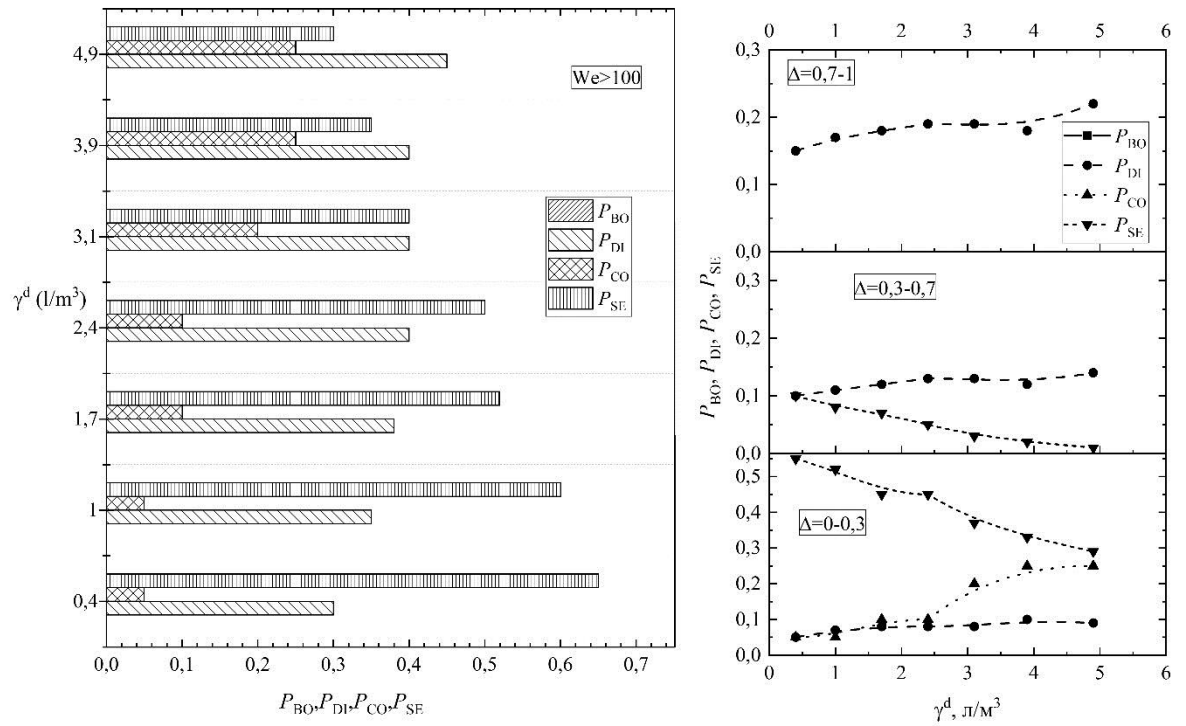
a



b



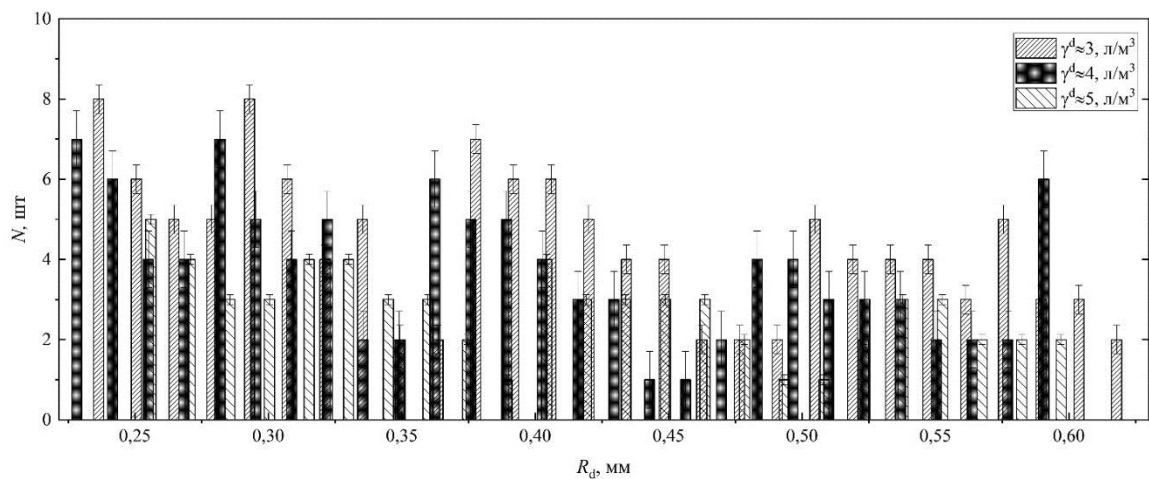
б



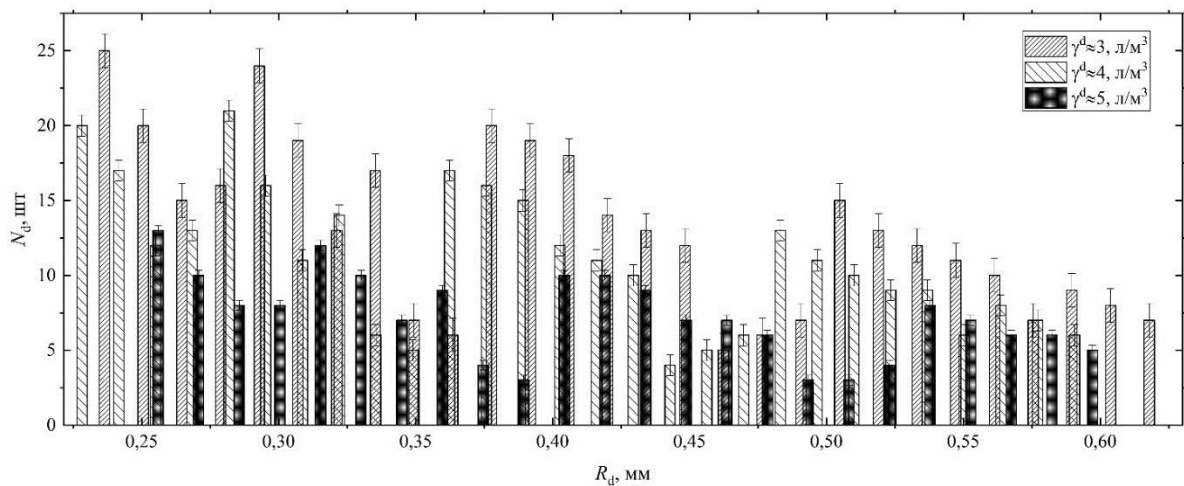
з

Рисунок 3.4.3 – Значения частот реализации режимов соударения капель при разной их концентрации в облаке регистрации за 0,1 с и варьировании значений числа Вебера [194]: а – $We=0-15$; б – $We=15-50$; в – $We=50-100$; з – $We>100$

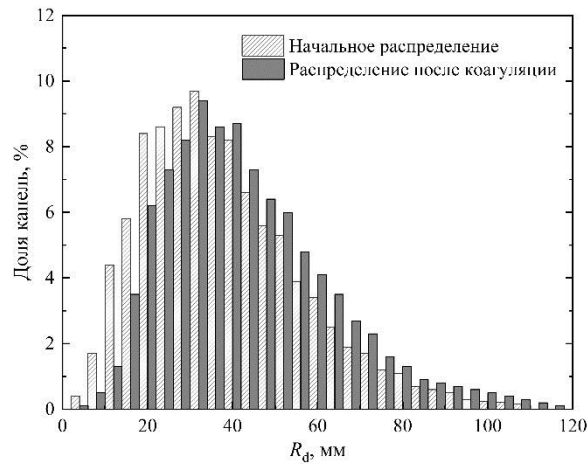
На рисунке 3.4.4 приведены распределения вторичных капель по размерам, т.е. образующихся вследствие соударений двух исходных капель, при варьировании концентрации и значений числа Вебера в широких диапазонах, соответствующих перспективным газопарокапельным технологиям. На рисунке 3.4.4а видно, что концентрация исходных капель во всем диапазоне значений числа Вебера не оказывает влияние на размеры получаемых вторичных капель, в то же время на количество соударений данный параметр оказывает существенное влияние. С увеличением значений относительной концентрации от 3 до 5 количество соударений увеличивается в 4–8 раз.



а



б



в

Рисунок 3.4.4 – Количество капель с разным размером в факеле распыла форсуночных устройств [194]: при учете соударяющихся капель (а); при учете всех капель, находящихся в зоне регистрации для значений числа Вебера до 150 (б); распределение капель по размерам [81] (в)

Целесообразно сравнить результаты полученных экспериментальных исследований с данными других авторов. Результаты, иллюстрирующие увеличение количества столкновений капель с ростом концентрации, получены в [195,196]. В [81] представлены распределения капель по размерам после столкновения двух пересекающихся аэрозольных потоков. Аэрозольные потоки от форсуночных устройств пересекались под углом 90° . По результатам опытов установлено, что наибольшее количество капель (и, соответственно, соударений) в центральной зоне (зона пересечения двух форсуночных потоков) соответствует размерам 0,3–0,4 мм. После столкновения капель установлено увеличение их размера в 1,7–2,3 раз. Аналогичные исследования столкновения двух струй под углом 90° приведены в [197]. Начальный размер капель составлял 0,02 мм. Получено распределение капель по размерам в результате которого установлено, что наибольшее количество капель в центре столкновения двух потоков соответствует размеру 0,08–0,26.

При отскоке (рисунок 3.3.4а) отчетливо наблюдается деформация капель. Отскок также сопровождался деформацией на начальном этапе, однако в данном

случае силы упругости оказали растягивающее воздействие и капли в итоге разделились. При этом установлено изменение средней интенсивности светимости у капли с синим красителем на 70–150 %, у капли с Rhodamine В – 100–140 %. При дроблении вторичные капли образовались при разрушении жидкостного перешейка. За исключением двух больших вторичных капель, оставшихся от разрушения исходных, остальные вторичные капли имели отклонение в средней интенсивности светимости на уровне 20–50 %, что свидетельствует об интенсивном смешении жидкостей.

На рисунке 3.4.4в представлены результаты [81]. Показано влияние коалесценции капель на размеры капель после столкновения. Установлено, что средний диаметр капель увеличивается в 1,14 раз. Также отмечается, что с увеличением расстояния от сопла (то есть при уменьшении концентрации капель) увеличивается количество столкновений между каплями большего размера. Результаты исследований вторичных капель, полученные в настоящей работе, в целом хорошо коррелируют с этими данными, так как в идентичных условиях мы установили рост средних размеров капель в 1,2–1,3 раза.

Широкую популярность в последние годы получили комбинированные системы первичного и вторичного измельчения капель. Первичные базируются на выборе характеристик распылительных устройств, а вторичные могут быть реализованы за счет соударений капель между собой, с твердой поверхностью или при ударе газовой среды, а также при микро-взрывном распаде. Проведенные эксперименты показывают, что развитие технологий вторичного измельчения капель жидкостей за счет их соударений между собой имеет определенные ограничения по минимальным достигаемым размерам вторичных фрагментов.

На рисунке 3.4.5 приведены зависимости среднего количества вторичных капель после дробления при различной температуре газовой среды. Так как форсуночное устройство генерировало исходные капли различных размеров, то для оценки количества и последствий соударения было необходимо разделение на подгруппы в зависимости от отношения размеров капель ($0,7 < \Delta$; $0,3 < \Delta < 0,7$;

0,3> Δ). Увеличение температуры привело к росту количества вторичных фрагментов. Основной причиной этого результата является снижение вязкости и поверхностного натяжения жидкости, что приводит к дроблению капель с большей эффективностью. В более ранних работах [164,198,199] получены зависимости изменения температуры жидкости в одиночной капле от температуры окружающей среды (100–800 °С). Размеры капель в [164,198,199] варьировались в диапазоне от 1.4 до 1.7 мм, в настоящем исследовании – от 0,1 до 1 мм, объемы капель отличались в 5–100 раз. Это позволяет сделать вывод, что капли воды в настоящей работе прогревались быстрее (примерно за 0,1–0,5 с). В [164,198,199] показано, что интенсивное испарение жидкости происходило при достижении температуры 60–80 °С. Выполненные оценки на основе предыдущих работ [164,198,199] показали, что при нагреве от 20 до 80 °С вязкость воды снижается от 1,0 до 0,4 мПа·с, а поверхностное натяжение от 72,7 до 62,6 мН/м. Скорость роста количества вторичных капель с увеличением температуры снижается.

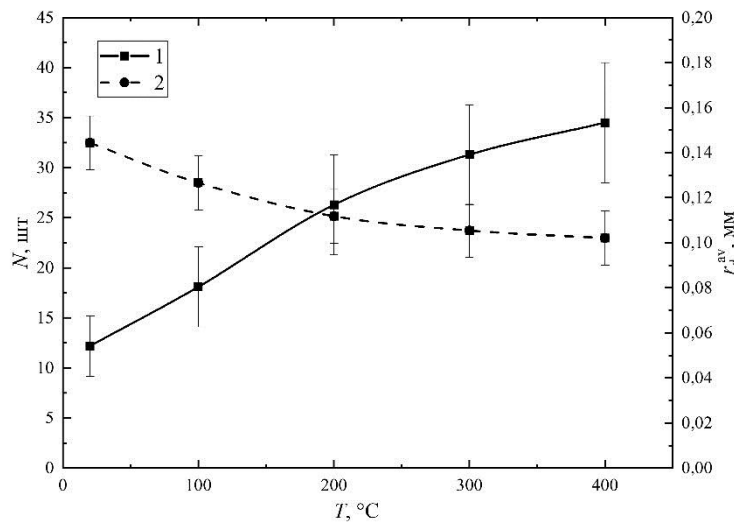
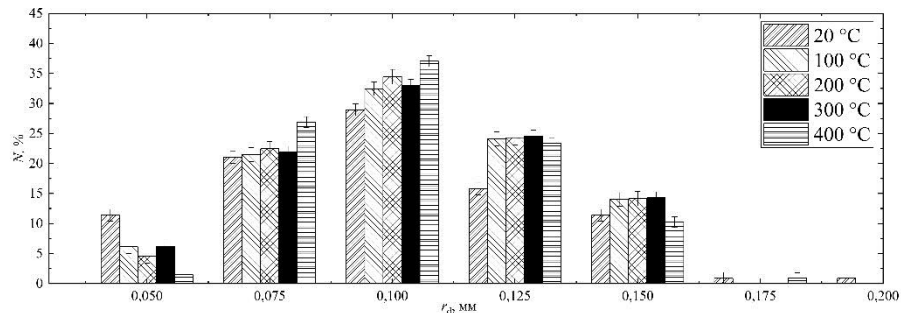


Рисунок 3.4.5 – Количество вторичных капель (1), полученных при дроблении исходных, и их средний размер (2) при варьировании температуры газовой среды, $We=100–200$, $R_{d0}=0,4–0,7$, $\Delta>0,7$, $B=0,7–1$ [200]

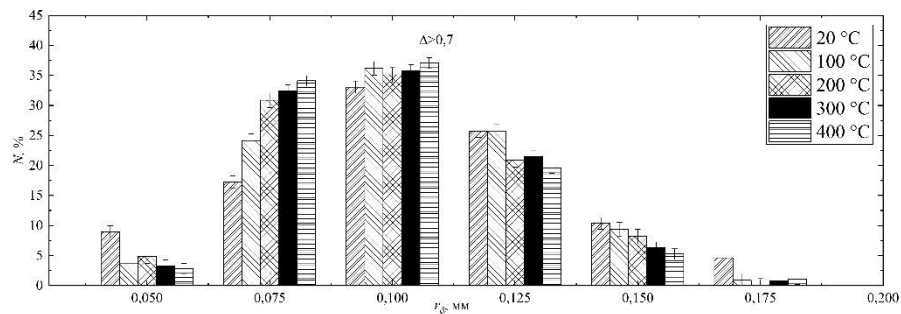
На основе рисунка 3.4.5 сформулировано предположение о том, что после достижения определенной температуры количество вторичных фрагментов будет

увеличиваться незначительно по двум причинам. Первая – чем выше температура воздуха, тем интенсивнее испаряются вторичные капли. Мелкие капли испаряются настолько динамично, что их количество и размеры сложно регистрировать вследствие смещения относительно глубины резкости используемой высокоскоростной видеокамеры. Вторая – чем выше температура, тем интенсивнее вдув паров с поверхности капли. Это приводит к росту давления вокруг капель и сдерживает их дальнейшее разрушение и движение.

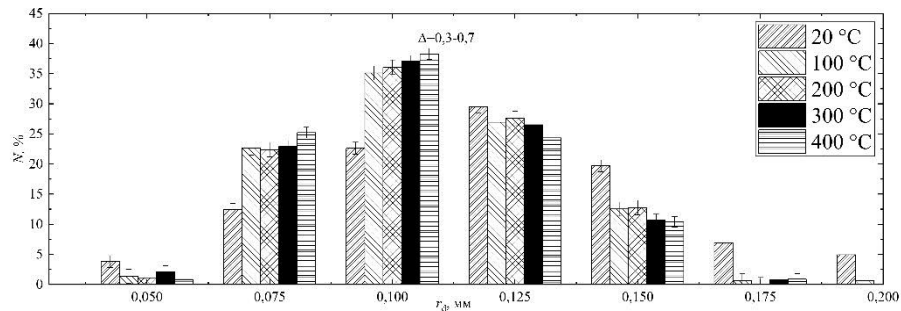
Типичные распределения размеров вторичных капель и фрагментов в результате дробления при варьировании температуры газовой среды приведены на рисунке 3.4.6.



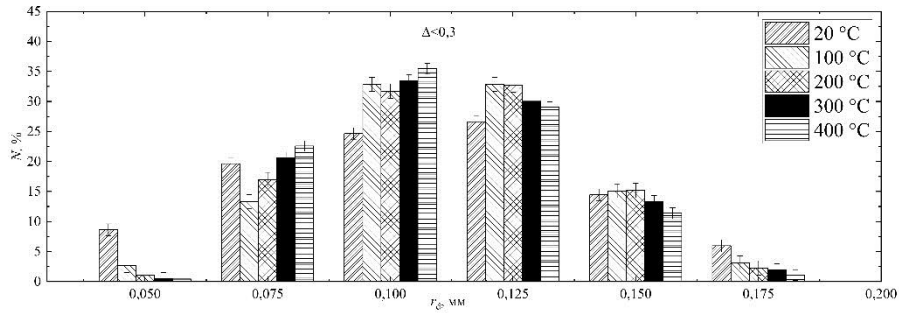
а



б



в



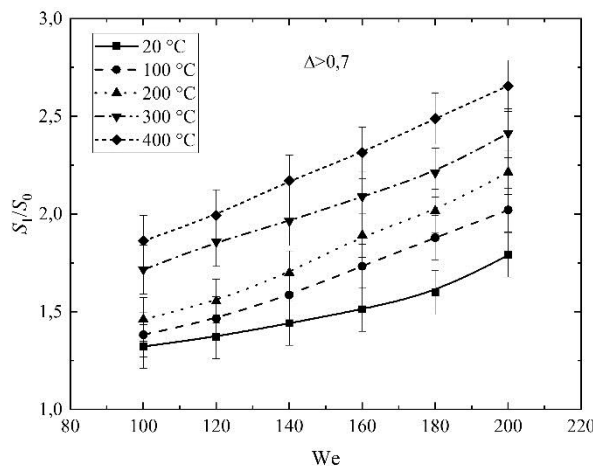
з

Рисунок 3.4.6 – Нормированные распределения размеров результирующих фрагментов по размерам после дробления при $We=100-200$ и различной температуре газовой среды: *а* – общее распределение вторичных фрагментов; *б* – $\Delta > 0,7$; *в* – $\Delta = 0,3-0,7$; *з* – $\Delta < 0,3$

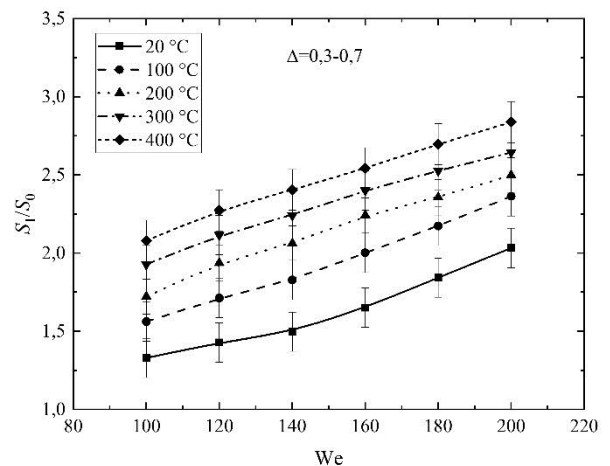
На общем распределении вторичных капель (рисунок 3.4.6*а*) видно, что при температуре воздуха около $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ распределение смещено влево (в сторону меньших значений r_d) относительно аналогичных зависимостей для температур $100-400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ зарегистрировано большее количество крупных фрагментов после дробления капель. Увеличение доли фрагментов $r_d < 0,1$ мм свидетельствует о низкой скорости испарения капель данного размера. Также рисунок 3.4.6 иллюстрирует, что при температуре газовой среды $300-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается доля фрагментов с размерами $r_d = 0,075-0,1$ мм. Данный эффект объясняется более интенсивным дроблением, то есть большее количество вторичных фрагментов дробилось на мелкие капли. Обоснованием этого вывода может служить снижение количества вторичных фрагментов размерами более $0,125$ мм. Также при обработке видеокладов, полученных в опытах с температурой воздуха менее $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, регистрировались фрагменты $r_d > 0,25$ мм в количестве не более 2–3. Они не вошли в данное распределение, так как их доля в количественном распределении капель очень мала.

Зависимости значений данного отношения площадей от значения числа Вебера при различной температуре приведены на рисунке 3.4.7. Зависимости также разделены на три группы по отношению размеров капель: $0,7 < \Delta$; $0,3 < \Delta < 0,7$;

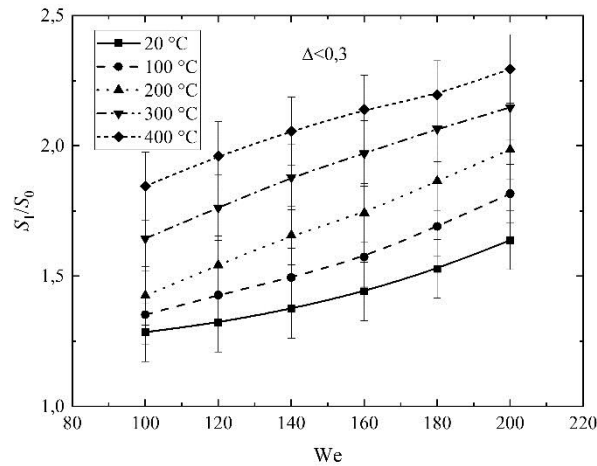
$0,3 > \Delta$. Для всех зависимостей с ростом We увеличивается значение отношения S_1/S_0 . Максимальные величины S_1/S_0 установлены для температуры газовой среды $T_g=400$ °С. При данной температуре капли успевают прогреться за время их движения в разогретом воздухе, что приводит к снижению вязкости жидкости. При изменении значения числа Вебера от 100 до 200 отношения площадей поверхности капель воды после и до дробления увеличились на 25–40 % в зависимости от диапазона Δ . При этом для всех случаев значения S_1/S_0 при $We=100$ имели максимальное значение 1,9–2,1 при $T_g=400$ °С. Скорость увеличения отношения площадей поверхности капель воды после и до взаимодействия изменялась в зависимости от значения числа Вебера. При столкновении капель часть кинетической энергии затрачивается на преодоление сил вязкого трения в жидкости. Изменение значения числа Вебера в основном связано с увеличением относительной скорости и кинетической энергии. Этим объясняется рост значений S_1/S_0 при увеличении We . Наибольший прирост отношения S_1/S_0 зарегистрирован для значений $\Delta > 0,7$ (рисунок 3.4.7а). В этих условиях суммарный объем взаимодействующих капель жидкости максимальный. С ростом значения числа Вебера увеличивается суммарная кинетическая энергия сталкивающихся капель. Возрастающая суммарная энергия способствует более быстрому преодолению сил вязкости, что приводит к росту количества вторичных фрагментов и увеличивает суммарную площадь поверхности вторичных капель после дробления.



а



б



в

Рисунок 3.4.7 – Отношение площадей поверхности капель воды после и до соударения в режиме дробления при $B=0,7-1$; $R_d=0,4-0,7$ мм и различной температуре: а – $\Delta>0,7$; б – $\Delta=0,3-0,7$; в – $\Delta<0,3$ [200]

В восходящем тепловом потоке во внутренней полости индуктора присутствовали различного рода завихрения и флуктуации газового потока. При увеличении температуры газовой среды восходящие конвективные потоки разогретого воздуха тормозили идущие во встречном направлении капли жидкости. Это приводило к снижению кинетической энергии капель. Нагрев температуры воздуха до 200 °С приводил к увеличению частоты реализации дробления и коалесценции. При этом режимы отскока и разлета практически не регистрировались. Повышение температуры газовой среды приводило к более быстрому прогреву жидкости [164,198,199], за счет чего, в свою очередь, снижались значения поверхностного натяжения и вязкости (при температуре жидкости 80 °С они составили 62,7 Н/м и 0,4 мПа·с, соответственно). При меньшем значении поверхностного натяжения жидкости капли легче разрушались в зоне бинарного контакта. При одинаковых параметрах столкновения капель при $T_g=20$ °С происходил разлет капель, в то время как при $T_g>200$ °С регистрировалось дробление.

На основании анализа результатов [164,198,199] сформулировано заключение о том, что скорости нагрева и испарения капель практически линейно

зависят от их размеров. В аэрозольных потоках, генерируемых полосовыми форсунками, размеры капель R_d составляли от 0,1 до 1,2 мм. На рисунке 3.4.8 приведены зависимости изменения отношения радиуса капли в течение времени полета в области регистрации к начальному размеру ($\Delta R/R_{d0}$) для $R_{d0}=0,2-0,4$ мм, $R_{d0}=0,4-0,7$ мм, $R_{d0}=0,7-1$ мм. Обработка видеокadres с каплями радиусом $R_d < 0,2$ мм не проводилась из-за ограничения, связанного с величиной масштабного коэффициента и погрешностью измерения размера, достигающей 8–10 %. За среднее время полета капли $t=10$ мс через область регистрации размером 40x40 мм наименьшее изменение размеров претерпевали капли и фрагменты жидкости с $R_{d0}=0,7-1$ мм. Для данного диапазона на прогрев жидкости затрачивалось наибольшее количество теплоты по сравнению с каплями других размеров. Это, в свою очередь, замедляло процесс испарения воды с поверхности. Быстрее всего уменьшался размер капель с $R_{d0}=0,2-0,4$ мм. Малый объем жидкости прогревался быстрее [164,198,199], что приводило к более интенсивному испарению (рисунок 3.4.8б). Увеличение объема на 3–5 % на начальном этапе регистрации (до 3–4 мс) для всех диапазонов размеров капель связан с температурным расширением жидкости при нагреве в газовой среде.

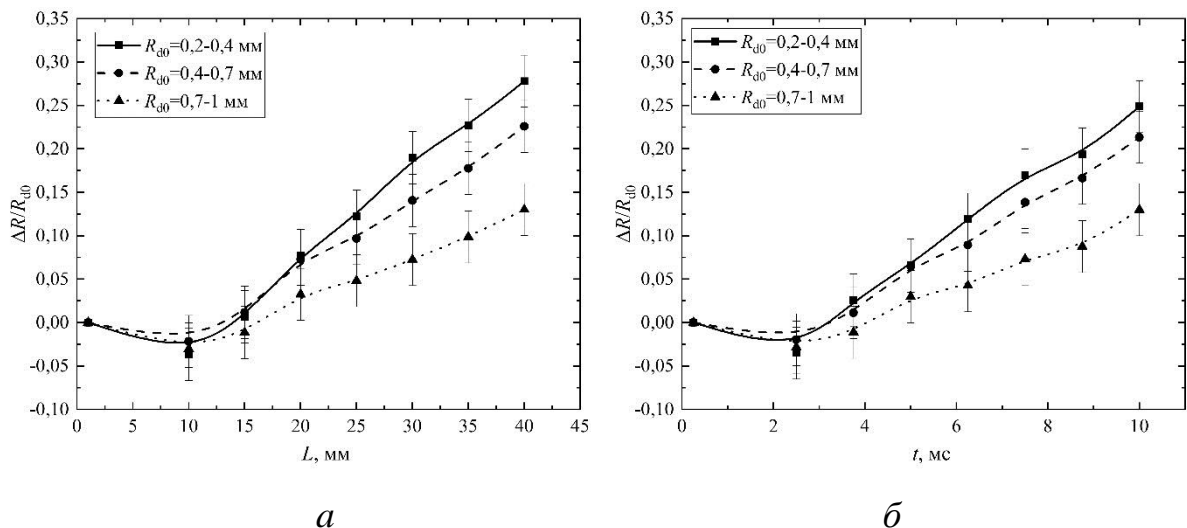
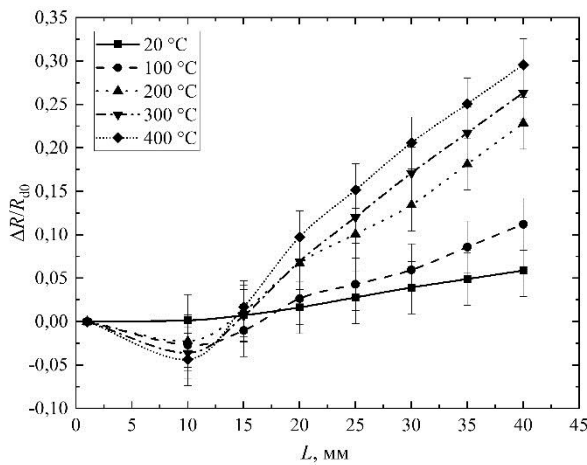


Рисунок 3.4.8 – Изменение радиуса капли к начальному при ее движении в газовой среде с температурой газовой среды $T_g=200$ °С, $\Delta > 0,7$,

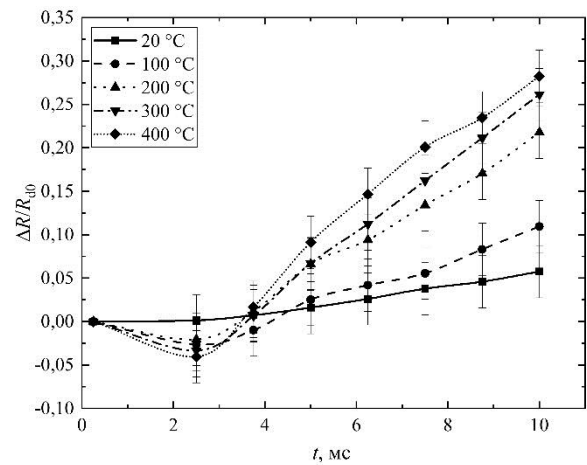
$B=0,7-1$ и различными начальными размерами капель [200]: a – от пройденного капель пути; b – от времени движения

В [2,168,201] изучено совместное влияние капель, движущихся в непосредственной близости друг от друга при различном взаимном расположении, на характеристики их столкновений. Подобные эффекты характерны системам с различными форсуночными устройствами [202]. В настоящем исследовании также зарегистрировано существенное влияние соседних капель на характеристики их взаимодействия. В частности, в рассматриваемой области регистрации размером 4x4 см исследовалось большое количество столкновений капель в пересекающихся аэрозольных потоках. На расстоянии $10-12R_d$ [2] от отдельно падающей капли за время ее движения в рассматриваемой области перемещались от 3 до 10 других капель, которые, согласно данным [2], оказывали на нее существенное воздействие. Одним из критериев оценки влияния капель друг на друга является изменение температурного поля парогазовой смеси вокруг них, а следовательно, и скоростей их прогрева и испарения [203]. На рисунке 3.4.9 приведены зависимости отношения изменения радиуса капли в течение времени полета в области регистрации к начальному размеру ($\Delta R/R_{d0}$) при различной температуре воздуха. Начальный размер капли измерялся в момент выхода жидкости из форсунки и принятия каплей сферической формы. Уменьшение отношения $\Delta R/R_{d0}$ через 10 мс после начала видеорегистрации во всех экспериментах (рисунок 3.4.9) связано с ее нагревом в воздухе и расширением жидкости. При дальнейшем движении капли в газовой среде ее размер уменьшался для всех опытов (после дробления и без него). Для случаев без дробления капель (рисунок 3.4.9а) при $T_g=20$ °С скорость изменения размеров капель минимальна и вызвана деформацией поверхности в процессе движения в воздушной среде [204,205]. Также при температуре $T_g=20$ °С не регистрировалось увеличение размеров через 10 мс после начала слежения за каплей, характерное для экспериментов с $T_g=100-$

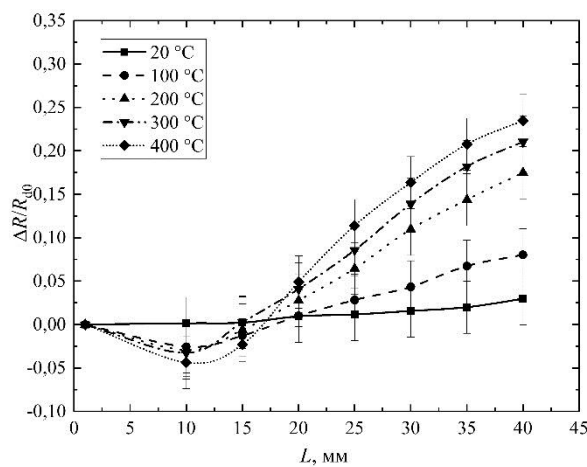
400 °C. Этот результат подтверждает гипотезу о том, что причиной увеличения размера капли через 10 мс после сброса за каплей является температурное расширение жидкости при ее движении в разогретой газовой среде. При повышении температуры T_g до 100 °C регистрировалось характерное набухание капли, а также увеличивалась скорость изменения $\Delta R/R_{d0}$. Дальнейший рост температуры до значений $T_g=200-400$ °C привел к еще более интенсивному уменьшению размеров капель. Аналогичные эффекты выделены при исследовании зависимости изменения отношения радиуса капли к начальному при ее движении в газовой среде с различной температурой от времени (рисунок 3.4.9б,з,е). Время движения капель в области регистрации в среднем составило около 10 мс. За это время наблюдалось уменьшение размеров капель 30 %.



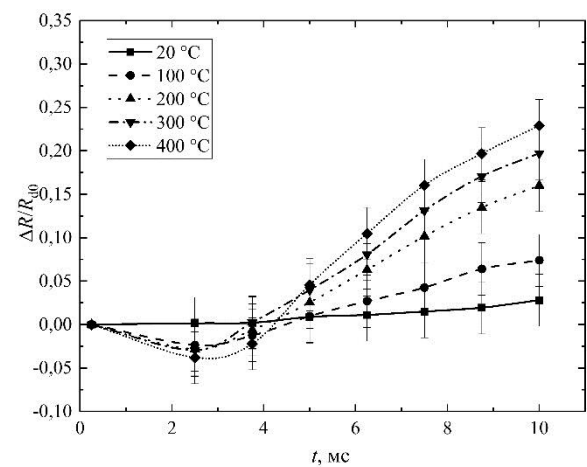
а



б



з



е

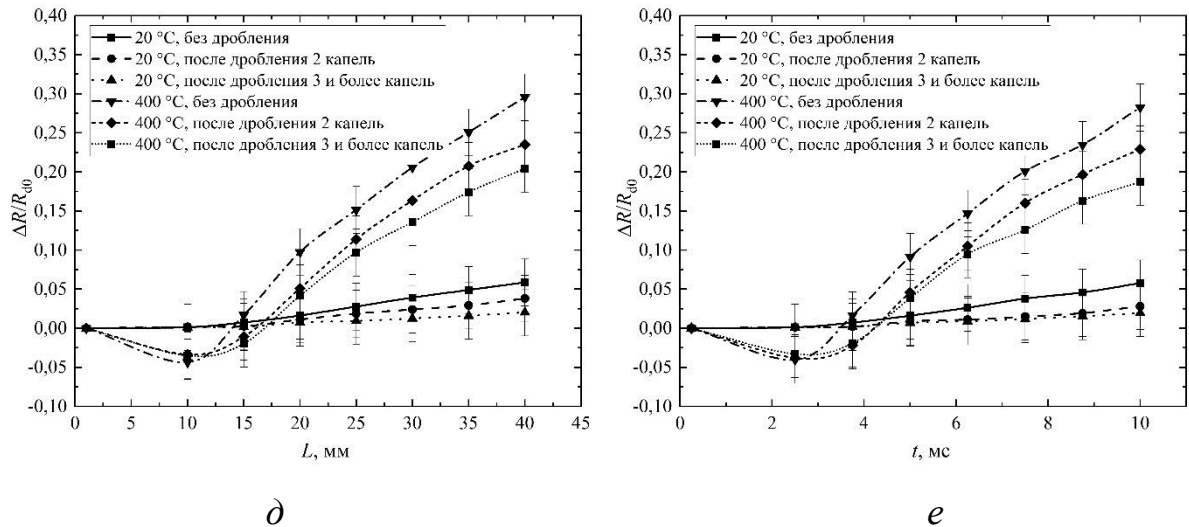


Рисунок 3.4.9 – Изменение радиуса капли к начальному при ее движении в газозвушной среде с различной температурой от времени движения и пройденного каплей пути при $R_{d0}=0,4-0,7$ мм, $V=0,7-1$ [200]: *a*, *б* – без взаимодействия с другими каплями; *в*, *г* – после взаимодействия с другими каплями; *д*, *е* – сравнение случаев изменения радиуса капли после и без взаимодействия для двух граничных температур без дробления, при дроблении двух капель и при дроблении трех и более

При высокой концентрации капель в аэрозольном потоке их дробление также может происходить при столкновении трех и более капель. На рисунке 3.4.9д показана зарегистрированная скорость изменения размеров капли для случаев движения капли без столкновения, фрагмента жидкости после одного дробления и фрагмента жидкости после дробления, вызванного столкновением с двумя и более каплями. При дроблении за начальный размер принимался размер фрагмента после принятия им формы, близкой к сферической, т.е. форма капли стабилизировалась после трансформации. Видно, что исходные капли без дробления уменьшаются с большей скоростью по сравнению со вторичными фрагментами после дробления, вызванного столкновением двух, трех и более капель. При этом скорость изменения размера, не связанного с потерей определенного объема жидкости капли вследствие дробления, слабо зависела от количества столкновений. Общее снижение скорости изменения $\Delta R/R_{d0}$ в данном

случае может быть вызвано перемешиванием жидкости в капле из-за конвективных течений, вызванных дроблением. В случае движения капли в разогретой газовой среде температура жидкости в слое, близком к границе жидкость–газ, увеличивается быстрее, чем в глубинных слоях капли. При дроблении происходит обмен жидкости между каплями, что является основной причиной замедления испарения вторичного фрагмента. Таким образом, правомерен вывод о том, что при прогнозировании скоростей прогрева и испарения капель жидкостей в нагревательных установках и камерах в условиях варьирования температуры в широких диапазонах нужно учитывать влияние фактора соударения капель. В течение полета продолжительностью даже 0,5 с в типичных камерах каждая капля может сталкиваться с соседними от нескольких до более чем десяти раз (в зависимости от конструктивных особенностей). Соответственно, размеры капель и их количество будут меняться. Вклад процессов прогрева и испарения существенен, но соударения также играют важную роль. С помощью полученных по результатам проведенных экспериментов зависимостей $\Delta R/R_{d0}$ можно прогнозировать изменение размеров капель при различных температурах газовой среды.

В результате выполненных экспериментальных исследований определены характеристики соударений капель в аэрозольном потоке, формируемом при пересечении двух струй воды в разогретой газовой среде. Установлено влияние на характеристики отскока, коалесценции, разлета и дробления капель группы параметров: числа Вебера, размеров капель, безразмерного линейного параметра столкновения. Увеличение температуры газовой среды приводило к росту количества вторичных капель и фрагментов после дробления. Основной причиной этого является снижение вязкости жидкости. При постоянстве остальных параметров столкновения и повышении температуры регистрировалось более эффективное измельчение. Вид зависимости позволяет сделать предположение о наличии определенной температуры, при превышении которой количество вторичных фрагментов будет меняться незначительно.

Анализ размеров фрагментов жидкости после дробления свидетельствует об увеличении доли капель радиусом $r_d=0,05$ мм при температуре газовой среды около $20\text{ }^\circ\text{C}$. В то же время зарегистрирован рост количества капель размерами $r_d>0,15$ мм. Это свидетельствует о полидисперсности облака вторичных фрагментов при $T_g=20\text{ }^\circ\text{C}$. Установлен рост доли вторичных фрагментов с размерами $r_d=0,075\text{--}0,1$ мм при температуре газовой среды $300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$. Снижение количества капель с размерами $r_d<0,05$ мм при такой температуре газовой среды обусловлено их интенсивным испарением. Увеличение температуры способствовало более эффективному дроблению и с точки зрения отношения площадей капель после и до соударения (S_1/S_0). Наибольшее значение $S_1/S_0=2,65$ зарегистрировано при $T_g=400\text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta>0,7$. В этих условиях при столкновении задействован наибольший объем жидкости в каплях, имеющей наименьшие значения вязкости и поверхностного натяжения. Изучено влияние дробления капель на скорость изменения их размеров при прохождении области регистрации длиной около 40 мм. Для этого выполнены измерения размеров капель, не подвергшихся столкновению с другими, и размеров вторичных фрагментов после дробления двух, трех и более капель. При $T_g=100\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$ на начальном этапе капли увеличивались в объеме за счет расширения жидкости (наполнение пузырьками пара) при нагреве. Дальнейшее их движение в разогретой газовой атмосфере приводило к изменению размеров на $10\text{--}30\%$ в зависимости от температуры. Дробление становилось причиной снижения значения $\Delta R/R_{d0}$ в нижней части области регистрации: при столкновении двух капель на $17\text{--}20\%$ относительно показателя без дробления и на $23\text{--}27\%$ при столкновении трех и более капель. Таким образом, в результате проведенных экспериментов выделены роли факторов испарения исходных капель и их измельчения за счет соударений при формировании аэрозольных облаков за счет распыления нескольких потоков жидкостей форсунками в разогретых газовых средах.

3.5. Влияние условий, характерных теплообменному оборудованию, на соударения капель жидкостей и твердых частиц

Параметры газовой среды в тепловых системах и установках, использующих тепло, значительно отличаются от нормальных условий [27,32,34]. С целью определения влияния свойств газовой среды на последствия соударений капель жидкостей и твердых частиц между собой проведены эксперименты с бинарными столкновениями капель воды в газовой среде при варьировании значений температуры и давления последней. На рисунках 3.5.1–3.5.7 представлены типичные видеок cadры экспериментов, демонстрирующие важные особенности. В частности, общей тенденцией для всего диапазона варьирования давления при повышении температуры газовой среды с 100 до 200 °С является интенсивная трансформация формы (соответственно, деформация поверхности) исходных капель и вторичных фрагментов по сравнению с полученными в экспериментах при $P_g=0,1$ МПа и $T_g=20$ °С, описанных в разделе 3.1 настоящей работы. В частности, установлено, что форма капель в разогретой газовой среде непостоянна относительно сферической. Регистрировались ее существенные изменения по мере движения в виде циклов деформации с переходами: вытянутый эллипсоид – капля – сфера – капля – сплюснутый эллипсоид – капля – сфера и др. При давлении 0,1 МПа и повышении температуры среды до 100 °С (рисунок 3.5.1) дробление нередко сопровождалось образованием и последующим схлопыванием пузыря. Дробление капель (рисунок 3.5.1а) сопровождалось образованием пленочного кольца, которое при дальнейшем движении разрушалось на группу капель (в основном формировались две крупные капли неустойчивой формы и совокупность мелких). Для данного режима также зарегистрирована следующая особенность (рисунок 3.5.1б). При встречном столкновении капель происходило их смешение и образование вытянутого жидкостного перешейка, по центру которого формировался пузырек. Дробление такого перешейка сопровождалось, как

правило, образованием крупных вторичных капель. Режим разлета (рисунок 3.5.1б) также реализовывался с формированием пленочного кольца, которое вращалось и при дальнейшем движении в газовой среде принимало вытянутую и часто несимметричную форму. После разлета монолитной капли образовывались два крупных жидкостных фрагмента, поверхность которых существенно трансформировалась в процессе дальнейшего движения, но они сохраняли свою целостность.

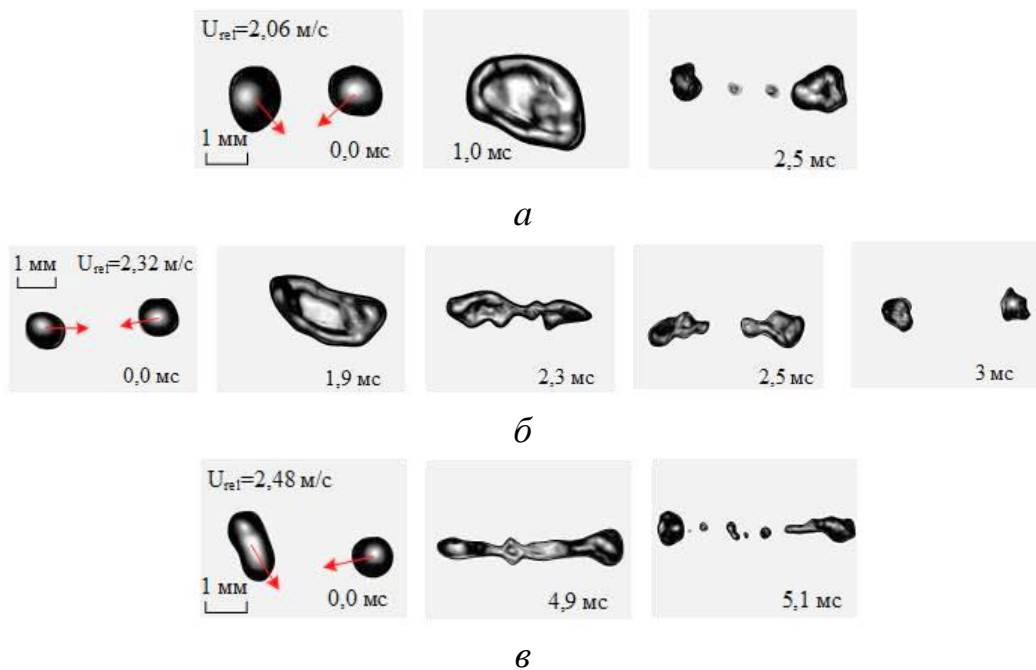


Рисунок 3.5.1 – Типичные видеокadres столкновения капель при параметрах воздушной среды $P_g=0,1$ МПа и $T_g=100$ °С: *а* – дробление; *б* – разлет; *в* – изображения капель с пузырем

При увеличении температуры газовой среды до 200 °С (рисунок 3.5.2) в режиме разлета, как и в случае дробления (рисунок 3.5.2в), образовавшиеся вторичные фрагменты деформировались и вращались. При повышении давления газовой среды до 0,3 и 0,5 МПа зарегистрирована более сферичная форма капель воды, чем при 0,1 МПа. Фрагменты жидкости растягивались незначительно, существенно не деформировались и не вращались.

При давлении 0,1 МПа и повышении температуры среды до 200 °С дробление сопровождалось образованием пленочного кольца. Однако дробление капель приводило к образованию большего количества мелких жидкостных фрагментов (рисунок 3.5.2*а*), чем при температуре газовой среды 100 °С. В случае коалесценции исходных капель (рисунок 3.5.2*б*) характерно образование крупного жидкостного фрагмента в виде вытянутого вращающегося эллипсоида с трансформирующейся поверхностью в процессе дальнейшего движения (сжатие и растяжение). Такая трансформация объясняется снижением поверхностного натяжения жидкости вследствие ее прогрева при повышении температуры среды.

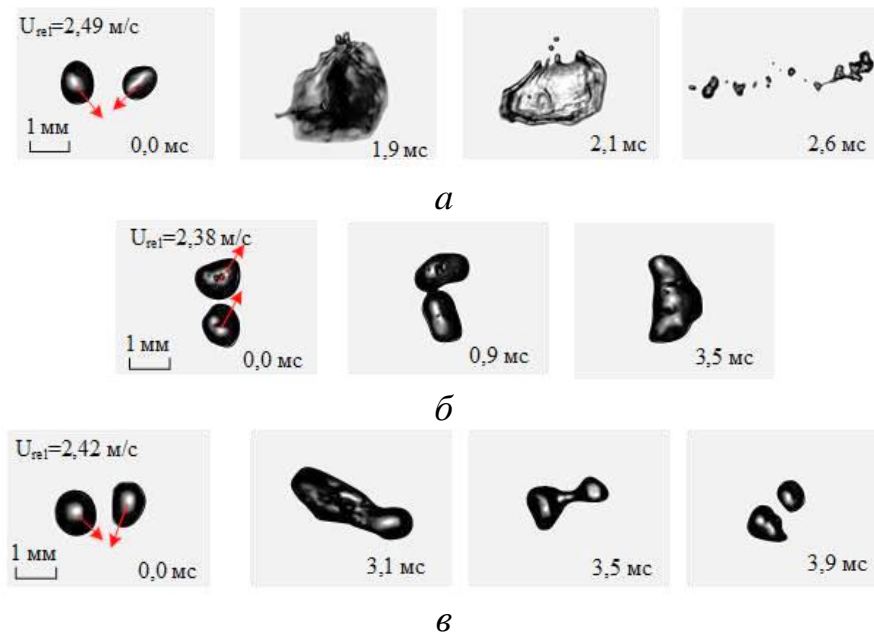


Рисунок 3.5.2 – Типичные видеокadres столкновения капель при параметрах воздушной среды $P_g=0,1$ МПа и $T_g=200$ °С: *а* – дробление; *б* – коалесценция; *в* – разлет

На рисунке 3.5.3 приведены видеокadres экспериментальных исследований при $P_g=0,3$ МПа и $T_g=20$ °С. Рисунок 3.5.3*а* показывает, что дробление происходит с образованием монолитной крупной капли, близкой к сферической форме, и узкого жидкостного перешейка, распадающегося в дальнейшем на вторичные практически сферичные фрагменты. На рисунке 3.5.3*б* приведены видеокadres, демонстрирующие столкновение капель с пузырями воздуха, захваченными жидкостью при ее прохождении через насосы и преодолении

повышенного давления газовой среды. Такой воздушный пузырь вытесняет жидкость, в результате чего отделяется от перешейка. При этом сам пузырь не схлопывался. Режим разлета (рисунок 3.5.3в) при давлении окружающей среды, равном 0,3 МПа, не сопровождался вытягиванием образовавшейся монолитной капли, как в случае $P_g=0,1$ МПа. Тонкий жидкостной перешеек, не образовывался – капля имела дискообразную форму и при вращении в газовой среде разлеталась на два крупных вторичных фрагмента сопоставимого размера. С повышением давления газовой среды для режима коалесценции (рисунок 3.5.3б) также характерна существенно меньшая трансформация крупной капли, образовавшейся в результате слияния двух исходных.

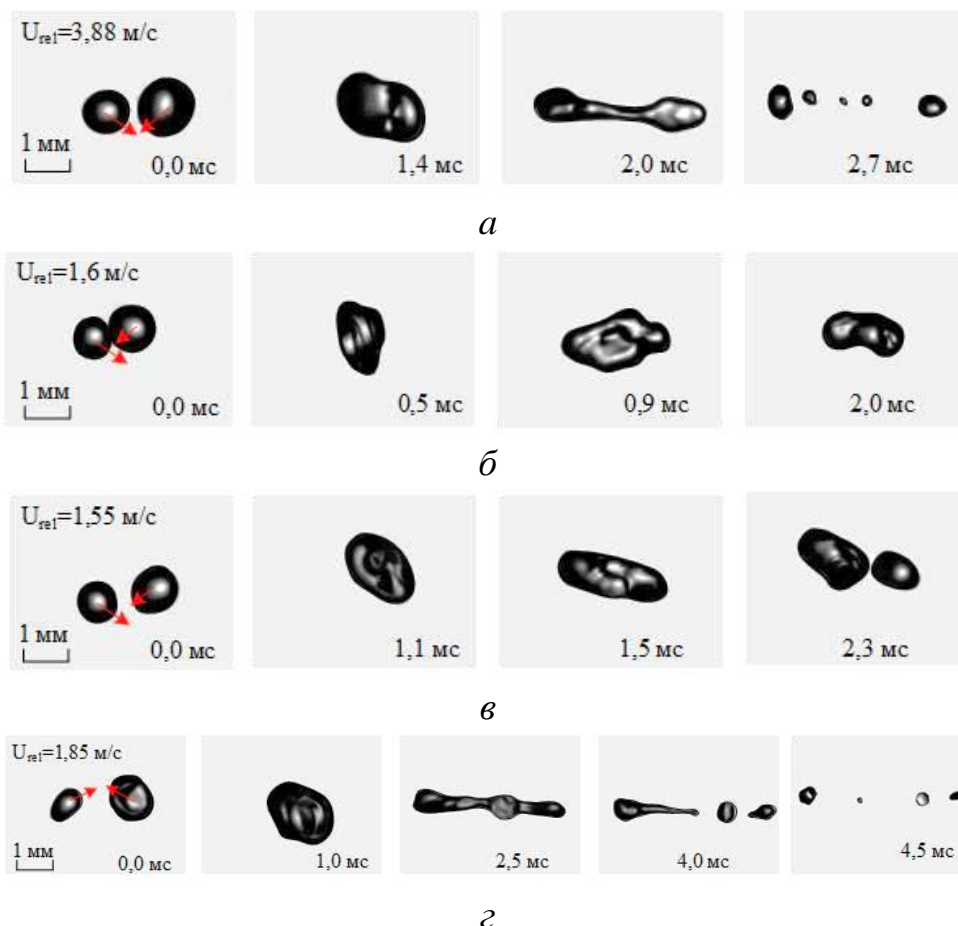


Рисунок 3.5.3 – Типичные видеокдры столкновения капель при параметрах воздушной среды $P_g=0,3$ МПа и $T_g=20$ °С: *а* – дробление; *б* – коалесценция; *в* – разлет; *г* – дробление

На рисунке 3.5.4 приведены видеокадры взаимодействия капель при давлении 0,3 МПа и температуре 200 °С. При таких условиях характерна реализация четырех режимов: коалесценция, дробление, отскок и разлет. Установлено, что при дроблении образуется тонкое жидкостное кольцо, у которого радиально равноудаленно находятся мелкие сферичные капли (рисунок 3.5.4а). После дробления такого кольца эти капли отделяются, распадается и сама пленка. В целом дробление сопровождается образованием 4–6 крупных капель.

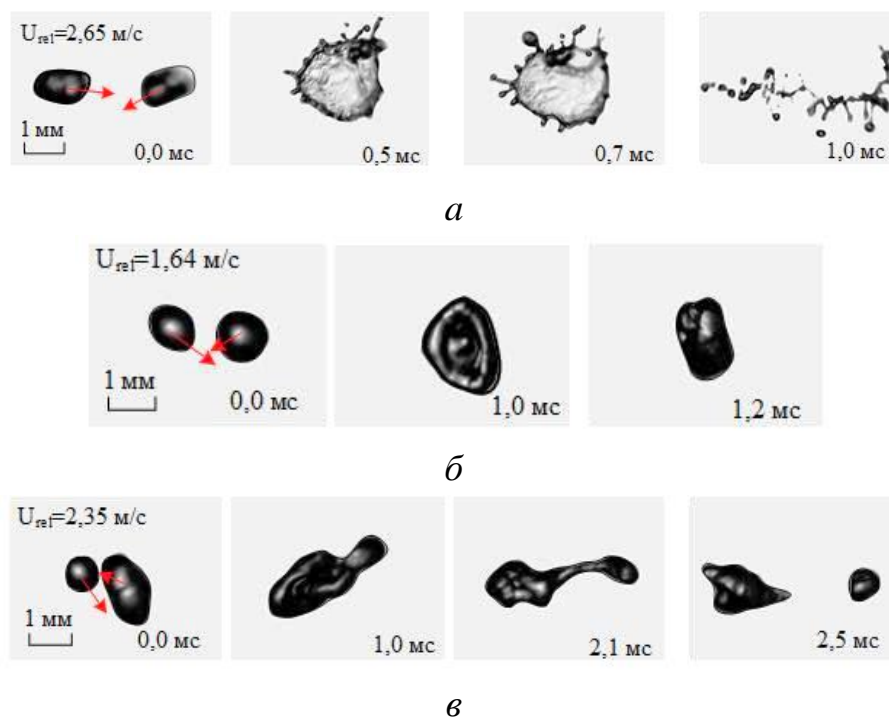


Рисунок 3.5.4 – Типичные видеокадры столкновения капель при $P_g=0,3$ МПа и $T_g=200$ °С: *а* – дробление; *б* – коалесценция; *в* – разлет

Для разлета характерно образование “гантели” неправильной формы (рисунок 3.5.4в), как в случае столкновения капель при температуре 100 °С. Однако вращение таких соединенных капель приводит не к коалесценции, как при температуре 100 °С, а к их разлету и образованию двух крупных фрагментов, что связано со снижением поверхностного натяжения. Коалесценция капель (рисунок 3.5.4б) в условиях повышения давления среды до 0,3 МПа и температуры до

200°C сопровождается уменьшением продольного размера капли при ее сжатии до формы жидкого диска или сплюснутого эллипсоида. По результатам экспериментальных исследований сформулировано заключение о том, что увеличение давления приводит к росту числа вторичных фрагментов при дроблении капель.

На рисунке 3.5.5 приведены кадры соударения капель жидкости при давлении 0,5 МПа и температуре 20 °С. Вследствие повышенного давления капли после дробления (рисунок 3.5.5а) и разлета (рисунок 3.5.5б) принимали сферическую форму значительно быстрее (на 20–50 %), чем при давлении 0,1 МПа и температуре 20 °С. В результате дробления при давлении 0,5 МПа количество вторичных фрагментов в среднем составляло от 4 до 9, в то время как при давлении 0,1 МПа в среднем формировались 4–7 вторичных фрагментов, их поверхность при этом сильно трансформировалась.

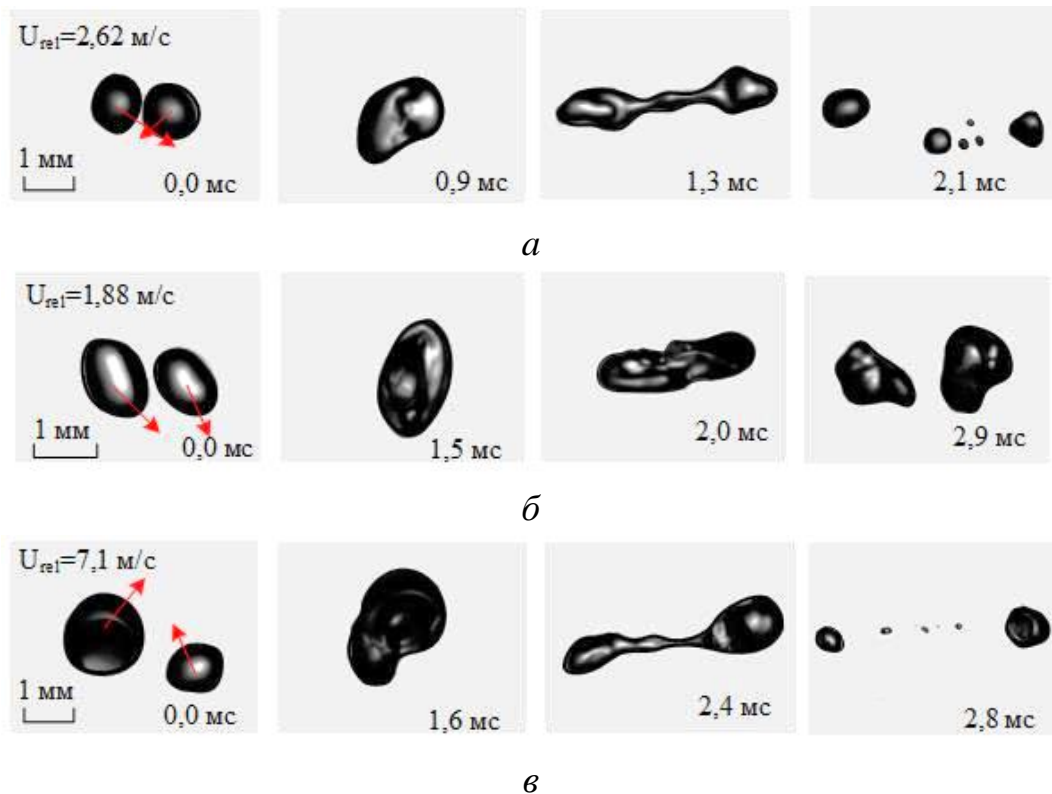


Рисунок 3.5.5 – Типичные видеокдры столкновения капель при параметрах воздушной среды $P_g=0,5$ МПа и $T_g=20$ °С: *а* – дробление; *б* – разлет; *в* – дробление

При повышении температуры до $T_g=200$ °С режим дробления (рисунок 3.5.6а) реализовывался при меньших значениях относительных скоростей движения каплей, следовательно, и меньших значениях числа Вебера. При этом также зарегистрировано формирование жидкого диска. После его разрушения формировалось несколько крупных вторичных фрагментов ($R_d=0,3-0,45$ мм).

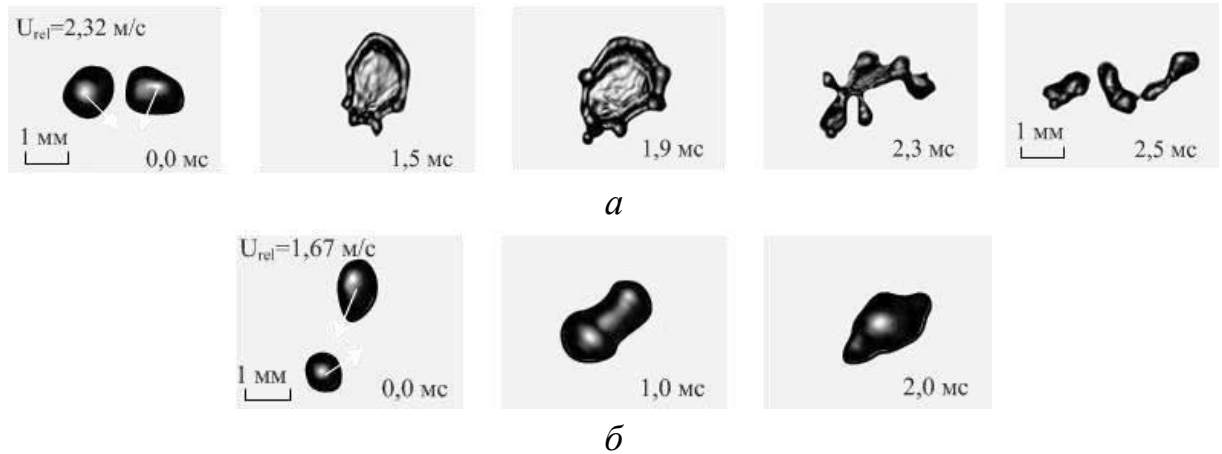
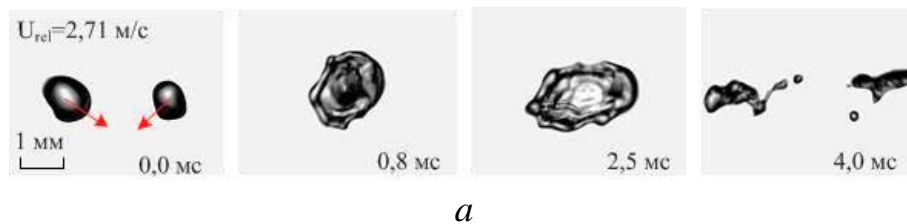


Рисунок 3.5.6 – Типичные видеокадры столкновения каплей при $P_g=0,5$ МПа и $T_g=200$ °С: *a* – дробление; *б* – коалесценция

Снижение давления газовой среды до значений $P_g=0,09$ МПа при $T_g=20$ °С вызвало усиление колебаний поверхностных слоев каплей жидкости при их движении. Особенно интенсивно эти колебания протекали при режимах столкновений, сопровождающихся нарушением поверхностных слоев (дробление, коалесценция, разлет). Максимальные длительности стабилизации поверхности вторичных жидкостных фрагментов регистрировались при режиме коалесценции исходных каплей. Данный эффект продемонстрирован на рисунках 3.5.7а и 3.5.7б.



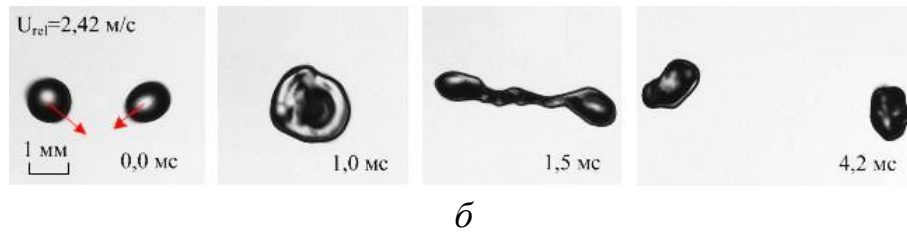


Рисунок 3.5.7 – Типичные видеокадры столкновения капле при параметрах воздушной среды $P_g=0,09$ МПа и $T_g=20$ °С: *a* – дробление; *б* – разлет

Карты режимов бинарных столкновений капле воды при варьировании давления и температуры представлены на рисунке 3.5.8. На первом этапе проводились эксперименты с варьированием давления газовой среды без ее нагрева. Карта режимов в системе координат $B(We)$ приведена на рисунке 3.5.8*a*. Увеличение давления привело к росту критических значений числа Вебера для всех режимов, т.е. границы переходов сместились относительно нормальных условий. При этом установлено, что область разлета при давлении газовой среды 0,5 МПа существенно меньше, чем при давлении 0,1 МПа и 0,3 МПа. Общее увеличение критических значений числа Вебера с ростом давления газовой среды связано с возросшими силами, действующими на поверхность капле воды при увеличении давления. Для их преодоления требовалось большее значение кинетической энергии капле, а следовательно, и большие величины относительной скорости движения фрагментов жидкости. Также это связано с необходимостью увеличения напора, создаваемого насосами, для преодоления возросшего сопротивления газа. Увеличение критических значений числа Вебера для реализации дробления при $P=0,3$ МПа составило от 31 до 39 % в зависимости от значения B сравнительно с необходимых значений We при $P=0,1$ МПа. Для $P=0,5$ МПа данный показатель составил от 53 до 59 %.

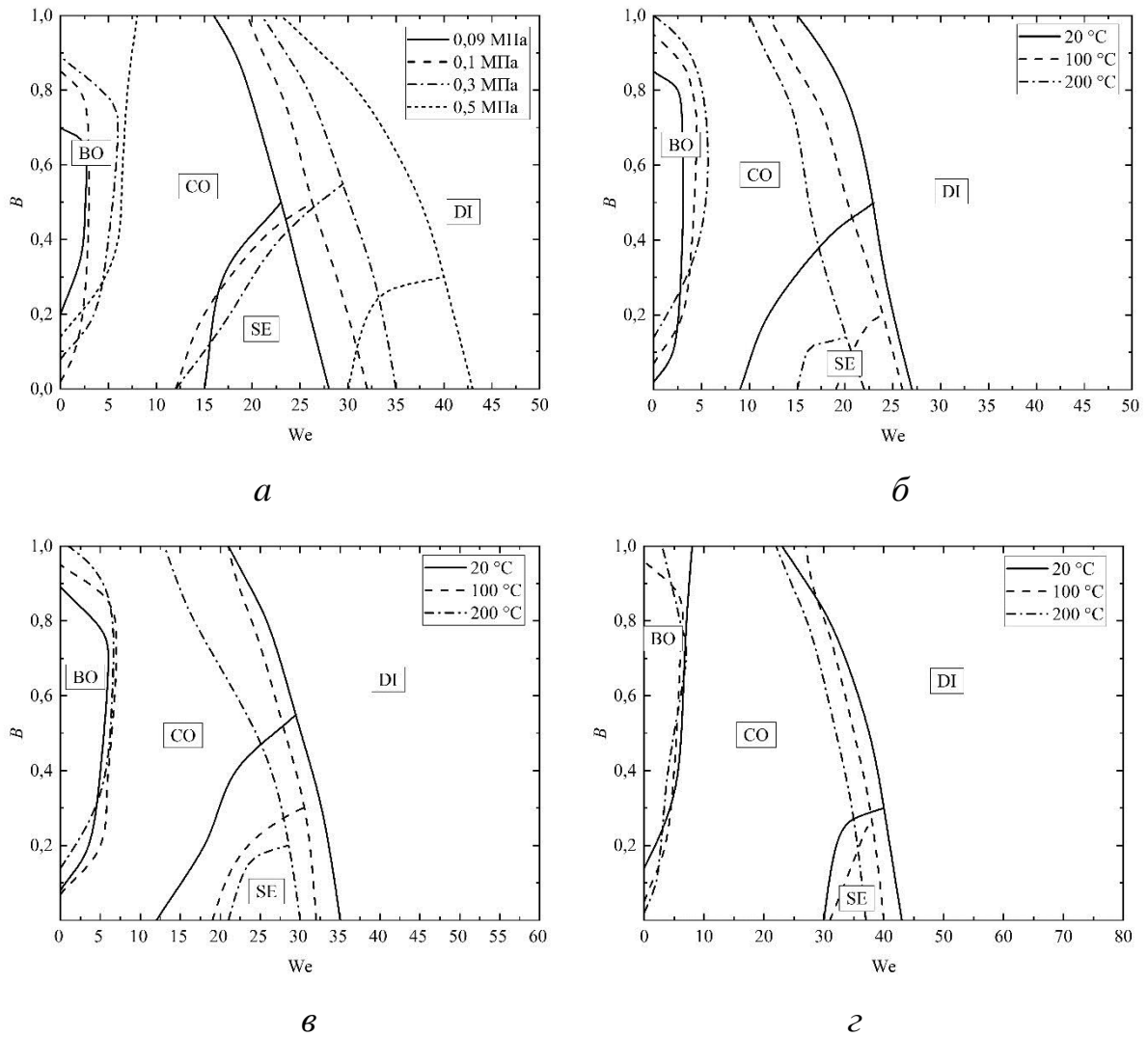
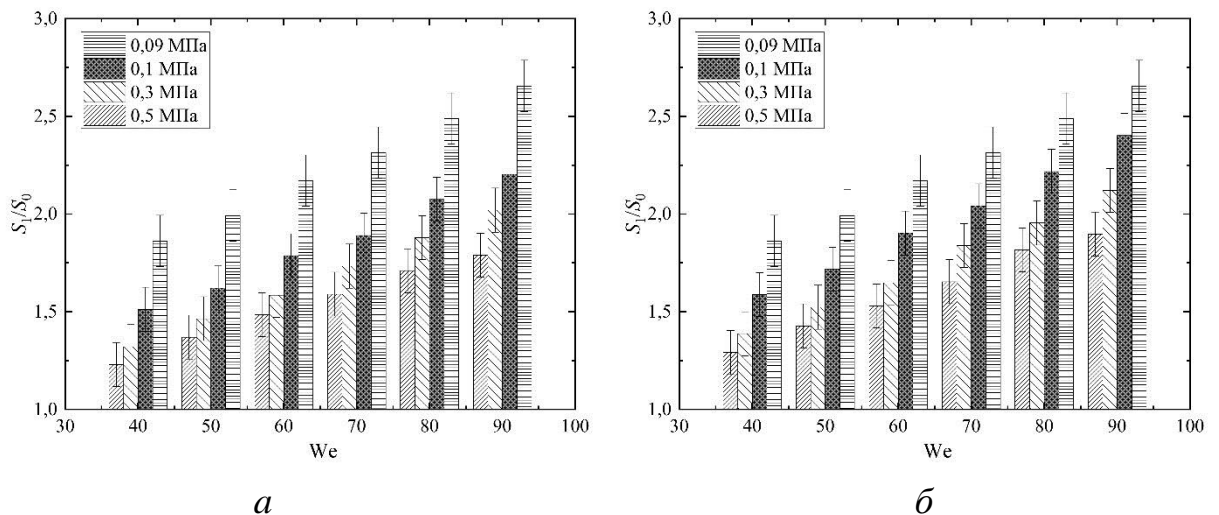


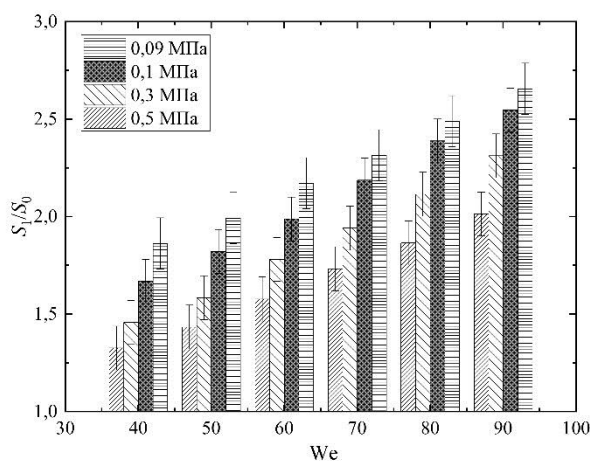
Рисунок 3.5.8 – Карты режимов взаимодействия капель в системе $B(We)$ с учетом диапазона их начальных размеров $R_d=0,45-0,55$ мм: *a* – варьирование давления газовой среды при 20 °С; *б* – при давлении 0,1 МПа и варьировании температуры; *в* – при давлении 0,3 МПа и варьировании температуры; *г* – при давлении 0,5 МПа и варьировании температуры; DI – дробление; CO – коалесценция; BO – отскок; SE – разлет [206]

Нагрев газовой среды до температуры выше 100 °С привел к снижению критических значений числа Вебера для режима дробления и увеличения размеров области отскока на картах (рисунок 3.5.8б–в). Снижение критических значений числа Вебера связано с интенсивным нагревом поверхности капель воды при их движении в высокотемпературной

газовоздушной среде. Нагрев воды на границе “газ–жидкость” сопровождался снижением поверхностного натяжения жидкости, что и стало причиной уменьшения значений критического числа Вебера. Увеличение размеров области отскока при $P_g=0,1$ МПа и повышении температуры связано с интенсификацией испарения воды с поверхности капель и созданием вокруг них паровой области, которая тормозила капли перед столкновением, препятствуя их коалесценции. Особенно наглядно соответствующие эффекты прослеживались на видеogramмах опытов при $B>0,4$. В случае таких столкновений центры капель сильно смещены относительно друг друга. Однако при увеличении давления окружающей среды до 0,3 и 0,5 МПа данный эффект проявлялся слабо, и явно прослеживался только при $T_g=200$ °С. Данный процесс связан с ростом температуры кипения жидкости при увеличении давления. Так, при 0,3 МПа температура кипения воды составляет 132,9 °С, а при 0,5 МПа – 151,1 °С [207].

Вычисленные значения отношения площадей поверхности фрагментов жидкости после и до дробления капель при варьировании давления газовоздушной среды от 0,09 до 0,5 МПа при температуре 20, 100 и 200 °С приведены на рисунке 3.5.9.





в

Рисунок 3.5.9 – Отношения свободных площадей поверхности после и до взаимодействия от значения числа Вебера при варьировании давления и температуры, $R_d=0,45-0,55$ мм [206]: а – 20 °С; б – 100 °С; в – 200 °С

Установлено, что с повышением давления газовой среды эффективность дробления капель снижалась. При снижении давления газовой среды ниже атмосферного наблюдался обратный эффект, увеличение значений S_1/S_0 . Из рисунка 3.5.9 видно, что после увеличения давления газовой среды до $P_g=0,3$ МПа отношения свободных площадей поверхности после и до взаимодействия снизились относительно $P_g=0,1$ МПа на 11–14 % при одинаковых значениях числа Вебера. При давлении газовой среды 0,5 МПа установлено еще большее снижение значений S_1/S_0 относительно $P_g=0,1$ МПа (15–23 % в зависимости от значения We). К увеличению значений S_1/S_0 на 7–13 % относительно $P_g=0,1$ МПа привело снижение давления до значений $P_g=0,09$ МПа. Увеличение внешних сил, действующих на поверхность фрагментов после дробления, является основной причиной снижения эффективности дробления капель при повышении давления газовой среды. Увеличенное сопротивление, с которым капли сталкиваются во время движения, и давление внешней газовой среды оказывают влияние на процесс дробления жидкости.

Повышение давления газовой среды привело к росту значений критического (т.е. переходного) числа Вебера для всех зарегистрированных режимов соударений капель. Общее увеличение критических значений числа Вебера с ростом давления газовой среды связано с возросшими силами, действующими на поверхность капель воды при повышении давления. Увеличение критических значений числа Вебера для реализации дробления при $P_g=0,3$ МПа составило от 31 до 39 % в зависимости от значения B по сравнению с пороговыми значениями We при $P=0,1$ МПа. Для $P_g=0,5$ МПа изменение данного показателя относительно $P=0,1$ МПа составило 53–59 %. Это означает, что при увеличении давления газовой среды необходимо также повышать давление впрыска жидкости технологическими устройствами для интенсивного вторичного измельчения. При давлении газовой среды около 0,09 МПа зарегистрировано снижение критических значений числа Вебера для реализации режима дробления.

При столкновении капель в газовой среде с температурой 100 и 200 °С регистрировалось увеличение площади свободной поверхности вторичных фрагментов для всех исследованных значений давления газовой среды. При давлении $P_g=0,1$ МПа значения S_1/S_0 в случаях повышения температуры газовой среды до 100 и 200 °С увеличились, соответственно, на 7–10 % и 10–16 % относительно установленных значений при $T_g=20$ °С. При $P_g=0,3$ МПа и нагреве газовой среды рост S_1/S_0 составил 5–8 % и 9–13 %, а при $P=0,5$ МПа на 4–8 % и 6–10 %, соответственно. Причиной снижения относительной эффективности дробления капель при одинаковых температурах (20, 100 и 200 °С) и повышении давления газовой среды стали возросшие внешние силы, сжимающие поверхности фрагментов, появляющиеся после дробления исходных капель.

Установлено, что нагрев капель воды до высоких температур (они близки к температурам кипения воды при $T_g>300$ °С вследствие малых размеров капель и высоких скоростей прогрева) приводит к непрерывному изменению ее размеров вследствие испарения со свободной поверхности, зарождения и роста пузырьков в

приповерхностном слое. Выделенные процессы приводят к увеличению площади поверхности капель и, следовательно, возрастанию действующих на них сил сопротивления. При трансформации поверхности капли в условиях температур нагрева газовой среды более 300 °С происходит интенсивное испарение жидкости, что приводит к проникновению буферной паровой зоны между соударяющимися каплями в объем образующейся единой капли. Как следствие, формируется достаточно большой паровой пузырь в объеме капли. Далее образованная таким образом двухфазная капля приобретает сферическую форму и продолжает движение без существенной трансформации поверхности относительно сферы.

Проведенные эксперименты показали, что повышение температуры газовой среды оказывает существенное влияние на частоту реализации каждого из четырех режимов: отскок, разлет, коалесценция, дробление. Как было отмечено выше, рост температуры воды способствует увеличению вероятности появления в приповерхностных слоях капель пузырьков пара. Последние могут как увеличиваться, так и уменьшаться в течение времени существования капли вследствие протекания двух противоположных процессов: испарение с внешней поверхности уменьшает размер R_d , а рост размеров и количества пузырьков в капле – увеличивает. Испарение жидкости с поверхности капли способствует снижению скорости ее линейного перемещения при сближении с соседней. Это обусловлено тем, что векторы скоростей вдува паров между каплями направлены противоположно векторам перемещения последних. Поэтому при сближении с малой скоростью (до 0,5 м/с) капли как бы зависают на определенном удалении друг от друга (т.е. витают), и время их взаимодействия существенно возрастает. Повышение давления паров вокруг капель замедляет их разрушение, так как для обеспечения контакта капель необходимо преодолеть гораздо большие силы сопротивления. Снижается относительная скорость их взаимодействия. В частности, с использованием данных таблицы 3.5.1 правомерны оценки линейных скоростей оттока паров U_v с поверхности капли на основе выражения $U_v = \dot{m}_e / \rho_v$ [35]. При учете зависимостей плотности водяного пара и скорости испарения

воды (таблица 3.5.1) от температуры газовой среды получаем, что линейная скорость оттока паров в среднем для трех представленных в таблице 3.5.1 начальных объемов капель составляет 0,13–0,25 м/с при варьировании T_a от 100 до 700 °С. Если учесть, что вектор скорости оттока паров с фронтальной поверхности противоположен направлению движения каждой из двух перемещающихся капель, то значения их относительной скорости перемещения U_{d1} и U_{d2} в газовой среде уменьшатся на величину, соответствующую скорости вдува паров. Относительная же скорость их взаимного движения U_{rel} изменится еще более существенно, в частности, на 0,19–0,58 м/с в зависимости от угла атаки. Таким образом, при $T_g \approx 20$ °С в определенных диапазонах скоростей движения капель основным режимом является дробление, а при температуре газов выше 100 °С и тех же начальных параметрах реализуются другие режимы: чаще коалесценция и отскок, существенно реже разлет.

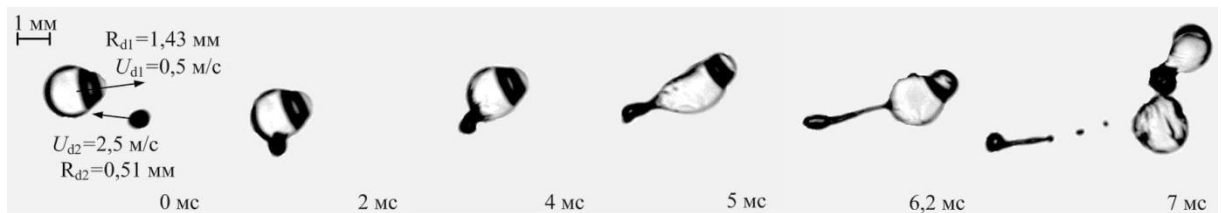
Таблица 3.5.1 – Значения скорости испарения капель воды при разных температурах газовой среды [208]

$V_0 \approx 10$ мкл		$V_0 \approx 15$ мкл		$V_0 \approx 20$ мкл	
$T_g, ^\circ\text{C}$	$\dot{m}_e, \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\dot{m}_e, \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\dot{m}_e, \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$
100	0,004	100	0,004	100	0,003
200	0,0082	200	0,0075	200	0,006
300	0,0121	300	0,012	300	0,011
400	0,0223	400	0,02	400	0,018
500	0,0315	500	0,029	500	0,025
600	0,049	600	0,043	600	0,038
650	0,06	650	0,05	650	0,044
700	0,071	700	0,06	700	0,054

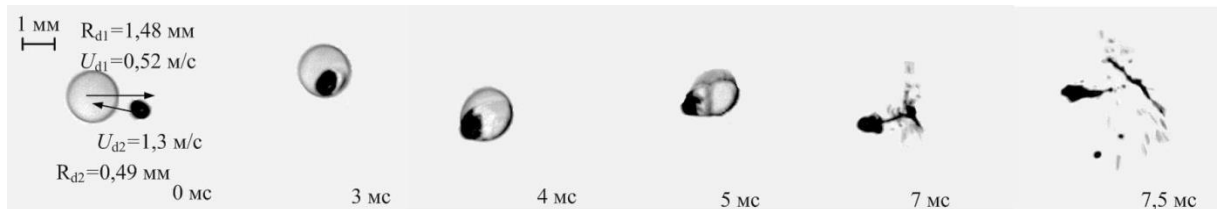
Установлено, что чем больше отношение размеров капель, тем выше частота реализации режима коалесценции, так как при росте температуры каплям необходима меньшая энергия для преодоления сил поверхностного натяжения. При этом в условиях большого отношения размеров при относительно невысокой

температуре воздуха ($T_g=100-200$ °С) меньшая капля должна обладать (необходимое условие) большой скоростью для преодоления сил поверхностного натяжения, но не более чем в 2–3 раза.

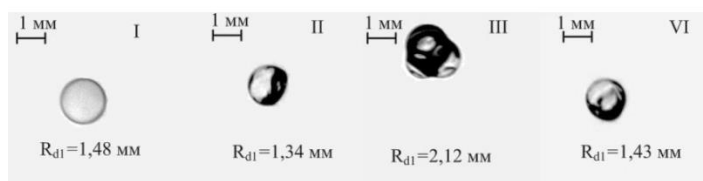
На рисунке 3.5.10 приведены типичные видеogramмы процесса соударения капель воды, в составе которых (одной или обеих) находится паровой пузырь. Анализ рисунка 3.5.10а и 3.5.10б показывает, что процесс трансформации паровых пузырей в составе капель протекает по двум механизмам. Первый заключается в разрушении окружающей пузырь пленки жидкости с образованием большой полидисперсной по размерам совокупности вторичных фрагментов. Но при этом пар все же сохраняется и распределяется по объему одной из новых капель, имеющей, как правило, максимальный размер. Вторым механизмом представляет разрушение капли, в которой находится паровой пузырь, на множество мелких фрагментов без сохранения в них пузырьков. Реализация первого или второго механизмов зависит в основном от двух параметров – относительной скорости движения и температуры газовой среды. Чем выше значения этих параметров, тем выше вероятность реализации второго механизма.



а



б



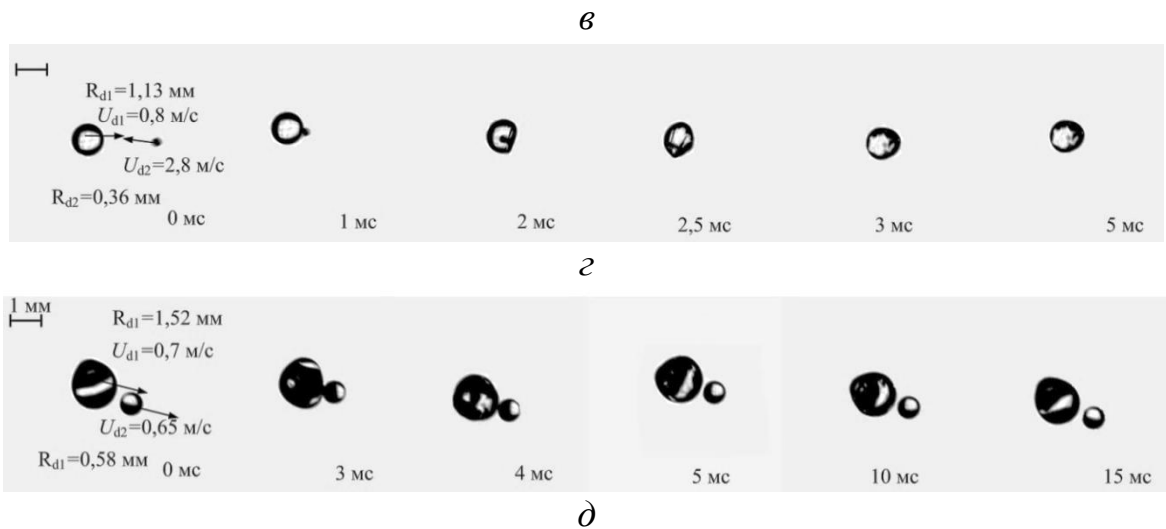


Рисунок 3.5.10 – Кадры видеogramм процессов соударения капель с паровым пузырем: *а* – взаимодействие капли воды (с пузырем внутри) с каплей без пузыря; *б* – схлопывание парового пузыря; *в* – зарегистрированные разновидности паровых пузырьков внутри капли воды; *г* – поглощение капли воды паровым пузырем; *д* – отскок капель с паровой полостью между ними

На рисунке 3.5.10г видно, что капля с достаточно большим по объему паровым пузырем поглощает каплю воды, имеющую много меньший размер. При этом не происходит разрушение образующейся новой капли. Т.е. меньшая капля как бы растворяется внутри большей за счет взаимодействия с пузырем. Также зарегистрированы отскоки капель, имеющих паровые внутренние полости, без разрушения (рисунок 3.5.10д). Эти процессы регистрировались при больших размерах капель (вследствие наполнения паром они могли увеличиться в 2–3 раза относительно начального состояния) и малых относительных скоростях движения (менее 1 м/с). Взаимодействие капель жидкости и паровых пузырьков представляют достаточно сложный комплекс взаимосвязанных процессов, в которых определяющую роль играет толщина пленки жидкости вокруг пузырька. На этот параметр главным образом влияют температура газовой среды и начальный размер капли. При варьировании этих параметров обеспечиваются условия для реализации каждого из проанализированных выше эффектов.

На рисунке 3.5.11 приведены результаты регистрации процесса изменения максимального размера каплей относительно начального диаметра во времени при разных температурах нагрева. Анализировались значения максимального диаметра капли в процессе ее растяжения L_d (т.е. принятия формы эллипсоида) в сравнении с начальным (после генерации дозирующей системой) диаметром (в состоянии сферы). Зарегистрировано существенное снижение соотношения между продольными и поперечными размерами каплей с течением времени для всего исследованного диапазона температур. Это главным образом обусловлено тем, что при нагреве происходит снижение поверхностного натяжения жидкости. Поверхность капли становится нестабильной и она существенно трансформируется относительно сферы. Происходит изменение продольных и поперечных размеров. Поперечный размер капли увеличивается практически в 2 раза. Это обусловлено еще и восходящими потоками разогретого воздуха вследствие термогравитационной конвекции в нагревательной камере. Также при увеличении температур нагрева возрастают скорости испарения капли, что также сказывается на изменении соотношения продольных и поперечных размеров капли из-за образования пузырьков пара и буферных зон внутри каплей. Последние раздуваются изнутри за счет пара, что приводит к увеличению поперечного размера.

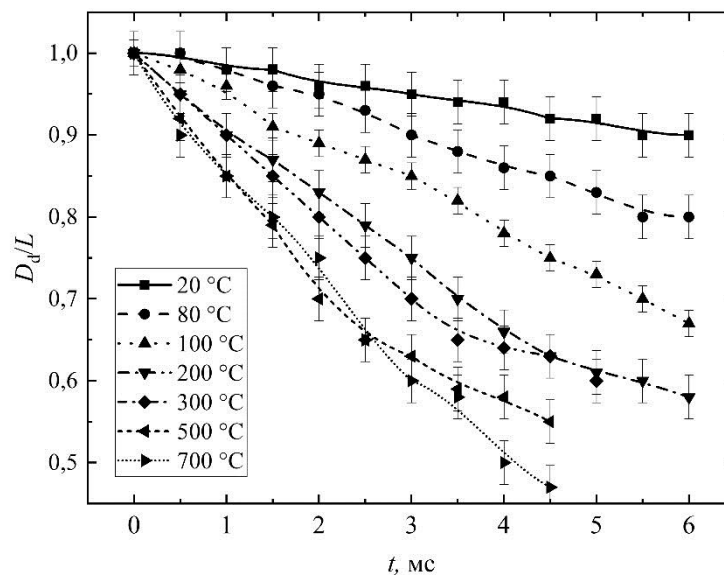


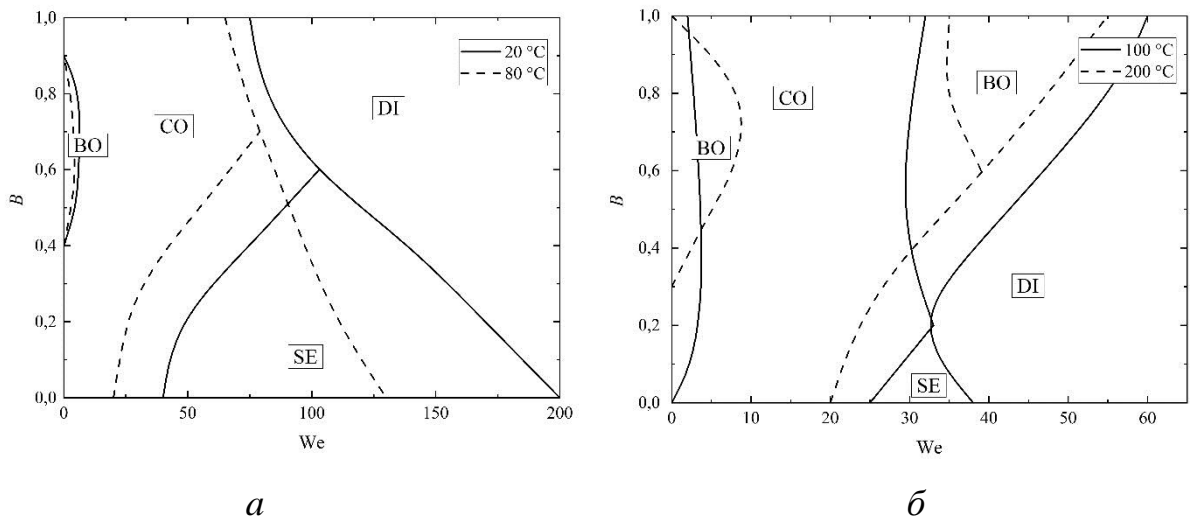
Рисунок 3.5.11 – Значения отношения максимального размера капли при растяжении в форме эллипсоида к начальному диаметру в форме сферы в разные моменты времени при разных температурах газовой среды [209]

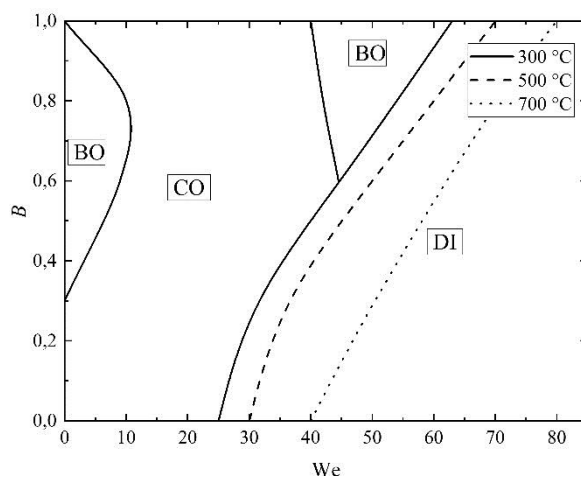
Результаты экспериментов [189] обосновали существенную деформацию капель (то есть изменение их продольного и поперечного размеров) при разной температуре на границе раздела «жидкость – газ». Такая деформация объясняется ростом скорости испарения жидкости при увеличении температуры. В настоящей работе капли проходят аналогичные циклы деформации. В отличие от опытов [189] температура газовой среды существенно выше (до 700 °С). Поэтому ключевая особенность состояла в том, что в проведенных экспериментах циклы деформации капель протекали гораздо дольше (в 1,5–2,5 раза), чем в опытах [189], при идентичных начальных условиях.

Рисунок 3.5.11 отражает экспериментальные результаты, полученные для серий из 10 опытов. Доверительные интервалы на представленных кривых иллюстрируют типичный рассев экспериментальных точек, который обусловлен тем, что нагретые до высоких температур капли воды интенсивно деформируются не только за счет снижения поверхностного натяжения жидкости, но и формирования паровых пузырьков в их объеме. Выделенные процессы протекают параллельно. Поэтому зарождение пузырьков, изменение их количества и размеров в составе капли имеют случайный характер. Чем больше пузырьков в составе капли, тем меньше ее плотность и существеннее торможение в газовой среде. После выхода с поверхности капли пара или схлопывания определенных пузырьков в приповерхностном слое регистрировалось ускорение движения капли. Поэтому практически для каждой капли зарегистрированы условия переменных участков ускорения и замедления перемещения в разогретой газовой среде. Приведенные на рисунке 3.5.11 зависимости показывают области для прогнозирования интегральных характеристик трансформации капель перед соударением с соседними. В проведенных опытах установлено, что при температурах среды до 200 °С определяющую роль при трансформации

поверхности капле до и после соударений играет фактор снижения поверхностного натяжения и вязкости жидкости, а при более высоких температурах доминируют процессы формирования двухфазных капель, снижения их плотности, роста давления как внутри их, так и снаружи за счет интенсивного испарения жидкости.

На рисунке 3.5.12 приведены карты режимов соударений при разных температурах нагрева. Видно, что при увеличении температуры воздуха от 20 до 80 °С существенно возрастают размеры зоны дробления. Смещение границы зоны дробления в сторону меньших значений числа Вебера связано с тем, что с увеличением температуры снижается поверхностное натяжение жидкости и для разрушения поверхности капли требуется меньшее значение кинетической энергии в зоне соударения. Данные факторы приводят к уменьшению размеров области отскока на карте режимов с увеличением температуры газовой среды.





в

Рисунок 3.5.12 – Карты режимов соударений капель воды при разных температурах газовой среды [209]: *а* – 20 и 80 °С; *б* – 100 и 200 °С; *в* – 300, 500 и 700 °С

На рисунке 3.5.12*б* показано увеличение размеров области отскока на карте режимов в диапазоне значений числа Вебера от 0 до 10 при повышении температуры газовой среды от 100 до 200 °С, а также появление аналогичной области в диапазонах значений числа Вебера от 30 до 50. Это обусловлено тем, что с увеличением температуры растет давление парогазовой смеси между каплями. Как следствие, изменяется баланс сил в приповерхностных слоях капель. От режима коалесценции происходит переход к отскоку последних. Анализ видеоклипов показал, что наличие двух зон отскока капель на карте режимов обусловлено разными причинами. При малых относительных скоростях движения капель (соответственно, значениям числа Вебера менее 10) интенсивно испаряющиеся капли зависали на определенном удалении друг от друга в течение довольно длительного периода времени. После определенного роста давления парогазовой смеси между ними они начинали удаляться. При высоких скоростях движения (значения числа Вебера от 30 до 50) и температуре газовой среды 200 °С регистрировалось в несколько (как правило, в 3–5) раз меньшее время взаимодействия. При этом капли не зависали относительно друг друга, а

непрерывно двигались. Регистрировалось отпрыгивание капель при их сближении. Чаще процесс отскока сопровождался определенным охватыванием меньшей капли большей и затем выталкиванием первой вследствие дополнительного импульса, вызванного вдувом паров и ростом давления парогазовой смеси.

На рисунке 3.5.12*в* показано, что с увеличением температуры от 300 до 700 °С размеры области коалесценции капель достаточно существенно увеличивались. Значение критического числа Вебера для температуры газовой среды 300 °С, 500 °С, 700 °С равны 25, 30, 40, соответственно. Область дробления существенно сужается в диапазоне изменения линейного параметра взаимодействия от 0,6 до 1, а при низких значениях параметра B дробление капель начинается при значениях числа Вебера в диапазоне от 35 до 40. В целом области дробления и разлета существенно отличаются от областей, представленных на рисунке 3.5.12*а*. Сформулирован вывод о доминирующей роли фактора нагрева газовой среды на режимы соударений капель.

На рисунке 3.5.12*в* видно, что с увеличением температуры газовой среды от 300 до 700 °С размеры области коалесценции капель достаточно существенно увеличиваются. Такой эффект обусловлен снижением поверхностного натяжения воды (от 1,4 до 0,4 мПа·с), а также уменьшением скоростей относительного движения капель – взаимодействие капель происходит в малом диапазоне изменения значений числа Вебера (0–80). Целесообразно отметить, что положение границ на картах режимов соударений капель достаточно существенно зависит не только от температуры газовой среды, значений B и We , но и режима трансформации поверхности каждой из двух капель в процессе движения. В частности, установлено, что при доминировании вращательного режима трансформации обеих капель существенно (на 15–20 %) возрастают размеры области их отскока на карте $B(We)$. Этот фактор был особенно важен для диапазонов изменения значений числа Вебера, соответствующих разным режимам соударений капель. Он обусловлен тем, что

при вращении обеих капель и интенсивном их испарении векторы скоростей оттока паров и движения капель противоположны. Это приводит к росту сил, отталкивающих капли друг от друга. При сдвиговом режиме деформации размеры области отскока существенно ниже, т.е. доминирует режим коалесценции.

В [210] приведены результаты экспериментов по изучению микро-взрывного разрушения двухкомпонентных капель при температурах, сопоставимых с достигаемыми в настоящей работе, но с использованием конвективной схемы нагрева. Полученные отношения площадей поверхности жидкости после и до процесса микро-взрыва при $T_g \approx 300$ °C соответствуют диапазону от 8 до 18 (в зависимости от их компонентного состава). Однако такого интенсивного вторичного измельчения капель можно добиться только при добавлении к воде горючих компонентов, таких как керосин, дизель, бензин, различные масла и др. Для однокомпонентных капель наиболее рациональным представляется применение схемы с их соударением между собой. На рисунке 3.5.13 представлены значения отношения площадей поверхности жидкости после и до процесса взаимодействия капель при варьировании скоростей движения и размеров исходных капель, соответственно, и значения числа Вебера. При значениях числа Вебера более 150 зарегистрирован определенный прирост площади поверхности с увеличением температуры газовой среды. Это объясняется тем, что капли воды интенсивнее прогреваются, за счет чего активно протекает процесс испарения и образования паровых пузырьков в каплях. Формируются паровые полости в виде совокупности пузырьков, которые при соударении разрушаются, что и приводит к увеличению количества вторичных капель. Но при меньших значениях числа Вебера (менее 100) зарегистрированы обратные процессы, т.е. капли при высоких температурах газовой среды коалесцируют за счет снижения поверхностного натяжения жидкости. Как следствие, образуется меньшее количество вторичных фрагментов, о чем свидетельствуют данные на рисунке 3.5.14 ($We < 50$). Для воды и различных композиций на ее основе (растворы, суспензии, эмульсии) значение

поверхностного натяжения меняется в несколько раз при прогреве капель с 20 до 90–100 °С. Поэтому за счет варьирования температуры газовой среды и значения числа Вебера можно управлять не только режимами соударений капель, но и характеристиками вторичных капель.

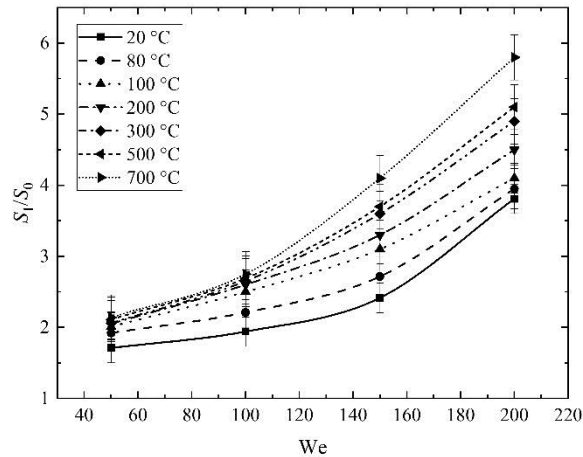
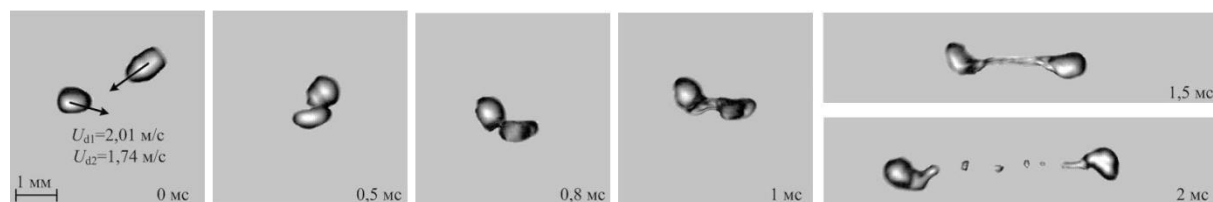
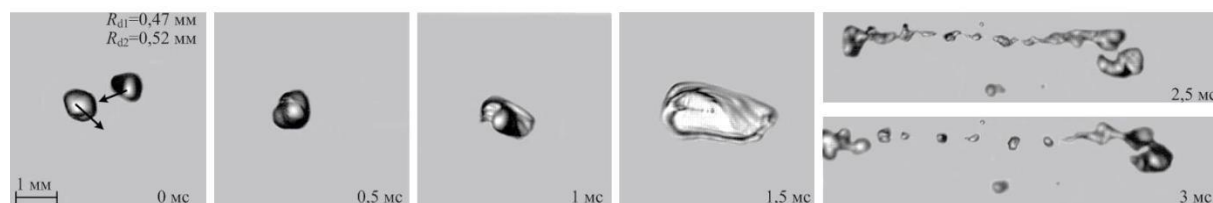


Рисунок 3.5.13 – Отношение площадей поверхности вторичных и исходных капель при соударениях в условиях разных температур нагрева [209]

Экспериментальные данные на рисунке 3.5.14 показывают, что с ростом температуры газовой среды от 20 °С до 700 °С снижается относительная скорость взаимодействия капель при идентичных начальных параметрах их генерации. Такой результат объясняется интенсивным испарением воды с поверхности капель, что, в свою очередь, приводит к торможению обеих капель. Так, например, при температуре газовой среды 20 °С капли размером около 0,5 мм выходят из сопла со скоростью около 0,8 м/с, и далее последняя меняется не более чем на 0,1 м/с. при температуре газовой среды около 700 °С и аналогичных начальных параметрах генерации капель результирующая скорость их движения снижалась на 0,25–0,35 м/с. Этот фактор также целесообразно учитывать при проектировании систем распыления и вторичного измельчения капель для систем, принцип действия которых связан с интенсивно протекающими фазовыми превращениями.



а



б

Рисунок 3.5.14 – Кадры видеogramм процессов соударения капель при температуре газовой среды $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)

Существенный рост площади поверхности жидкости с увеличением температуры газовой среды зарегистрирован для значений числа Вебера более 130 (рисунок 3.5.13). В диапазоне изменения значения числа Вебера от 50 до 125 наибольший прирост площади поверхности жидкости соответствовал экспериментам в газовой среде, нагретой до температуры около $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как было отмечено выше, установлены температуры газовой среды ($200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$), при которых баланс сил смещается от доминирования фактора снижения поверхностного натяжения к доминированию процессов парообразования и роста давления парогазовой смеси между каплями. Ключевым фактором – форма каждой из соударяющихся капель, которая определяется режимом и циклом деформации их поверхности в процессе полета. Если капли соударяются на стадии принятия ими форм, близких к сфере, то количество фрагментов существенно меньше, чем для условий взаимодействия эллипсоидов. Поэтому при управлении процессами вторичного измельчения капель жидкости в газовой среде целесообразно выбирать параметры работы системы впрыска с акцентом на обеспечиваемые режимы трансформации их поверхности до соударения между собой.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение температуры газовой среды более $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в области соударения капель воды приводит к образованию в них паровых пузырей. Трансформация поверхности исходных и вторичных двухфазных капель существенно отличается от аналогичных процессов для однородных капель воды. Как следствие, современные представления о процессах взаимодействия капель жидкости не позволяют в полной мере описать условия и последствия соударений капель жидкостей в высокотемпературных газовых средах. С увеличением температуры газовой среды до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение отношения между продольными и поперечными размерами капель в течении времени полета довольно резко снижается (практически в 2 раза). Этот результат иллюстрирует важную роль циклов деформации капель до соударения с соседними.

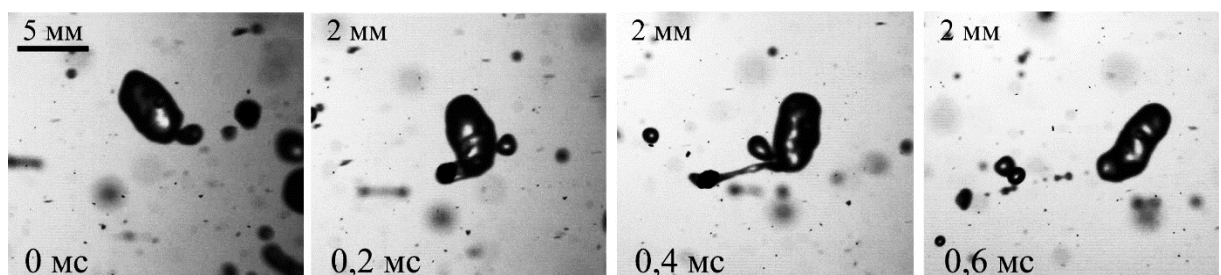
Установлено, что с увеличением температуры газовой среды от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ смещается граница перехода к режиму дробления на 27 % в направлении меньших значений числа Вебера. Отмечено, что при температуре газовой среды выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ проявляются две области отскока на карте режимов $B(We)$ от 0 до 10 и от 30 до 50. При дальнейшем увеличении температуры до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ выявлено снижение значений критического числа Вебера для режима дробления капель и их рост для коалесценции.

Результаты выполненных исследований имеют высокую практическую значимость как база для развития технологий вторичного измельчения капель в высокотемпературных газовых средах, так как установлены условия как значительного прироста, так и уменьшения количества вторичных фрагментов при повышении температуры газовой среды. В частности, показано, что при значениях числа Вебера менее 100 количество вторичных фрагментов, образующихся в высокотемпературной газовой среде, меньше, чем при умеренных температурах (около $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). С увеличением значения числа Вебера более 100 количество вторичных фрагментов увеличивается практически на 70 %,

например, при сравнении результатов опытов с температурой газовой среды 700 °С и 20 °С.

3.6. Изменение дисперсности газопарокапельных сред в элементах топливного цикла

При анализе результатов проведенных экспериментов выделены два режима взаимодействия капель суспензии с кварцевыми частицами в аэрозольных потоках (рисунок 3.6.1): агломерирование и дробление. Аналогичные режимы установлены в [107]. Реализация режима агломерирования регистрировалась при относительно невысоких относительных скоростях движения (менее 2 м/с). Показано, что взаимодействия протекает следующим образом. Частица песка оседает на капле суспензии. Не образуются вторичные фрагменты. С увеличением относительной скорости взаимодействия или же размеров капель и частиц происходил переход между режимами агломерирования и дробление. Режим дробления протекал с образованием вторичных фрагментов. Режимы агломерирования и дробление являются важными для термической сушки твердых частиц. Контроль параметров при протекании данных режимов позволяет производить частицы с требуемыми размерами, что является определяющим в работе установок по термической сушке частиц. Режим агломерирования позволяет укрупнить капли, а при испарении жидкости происходит агломерирование частиц. Увеличиваются их размеры. Режим дробления позволяет измельчить каплю суспензии, что приводит к снижению размера итоговых частиц, но минимальный их размер определен дисперсностью помола таких частиц.



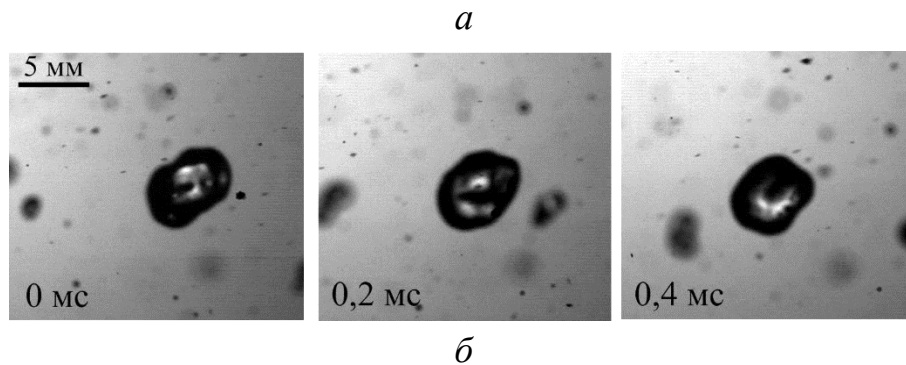


Рисунок 3.6.1 – Кадры, иллюстрирующие процессы соударений капель воды с частицей в аэрозольном потоке: *a* – дробление; *б* – агломерирование

На рисунке 3.6.2 приведены карта режимов соударений капель суспензии и твердых частиц песка в аэрозольных потоках, а также отношение площадей свободной поверхности после и до соударения в зависимости от значения числа Вебера. Для построения карт режимов использовался безразмерный линейный параметр взаимодействия (B), который позволял учесть радиусы капель и частиц, а также центричность их соударения. Число Вебера позволяло учесть силы инерции и поверхностного натяжения, вклад скорости движения и размеров капель. Карта режимов построена при варьировании температуры окружающей среды от 20 °С до 100 °С. Установлено, что при увеличении температуры газовой среды до 100 °С процесс фрагментации капель начинал устойчиво реализовываться при пониженных на 20-30 % значениях числа Вебера относительно 20 °С. Эффект обусловлен тем, что капли попадают в разогретую газовую среду. Жидкость прогревается. Ее поверхностное натяжение снижается на 30-45 % [157]. Снижение поверхностного натяжения жидкости приводит к снижению необходимой и достаточной для фрагментации относительной скорости. Проведенные оценки показали, что капли успевают прогреваться до 40-60 °С. Следовательно поверхностное натяжение снижается с 72,7 мН/м до 66,4 мН/м, вязкость с 1,0 мПа·с до 0,7 мПа·с. К тому же интенсификации фрагментации капли способствует наличие твердых частиц в ней. При снижении поверхностного натяжения в момент удара частицы разрывают приповерхностные слои каплю изнутри вследствие преобладания инерционных сил над силами

поверхностного натяжения. Такой эффект приводит к росту вторичных фрагментов при дроблении капли, а следовательно, возрастает площадь после взаимодействия. Проведенные эксперименты показали, что повышение температуры газовой среды снижает и средний размер вторичных фрагментов после дробления капли (рисунок 3.6.1б). Это обусловлено интенсификацией фазовых превращений. При использованных в проведенных опытах температурах газовой среды не зарегистрировано образование паровой буферной зоны, что не приводило к росту требуемой относительной скорости движения частиц для разрушения капли в процессе их взаимодействия. При повышенных температурах (более 400 °С) газовой среды, характерных теплообменным системам, формируется буферная паровая зона вокруг капли [211]. Она препятствует сближению капель и интенсифицирует их отталкивание вследствие противоположно направленных потоков водяного пара с поверхности капель.

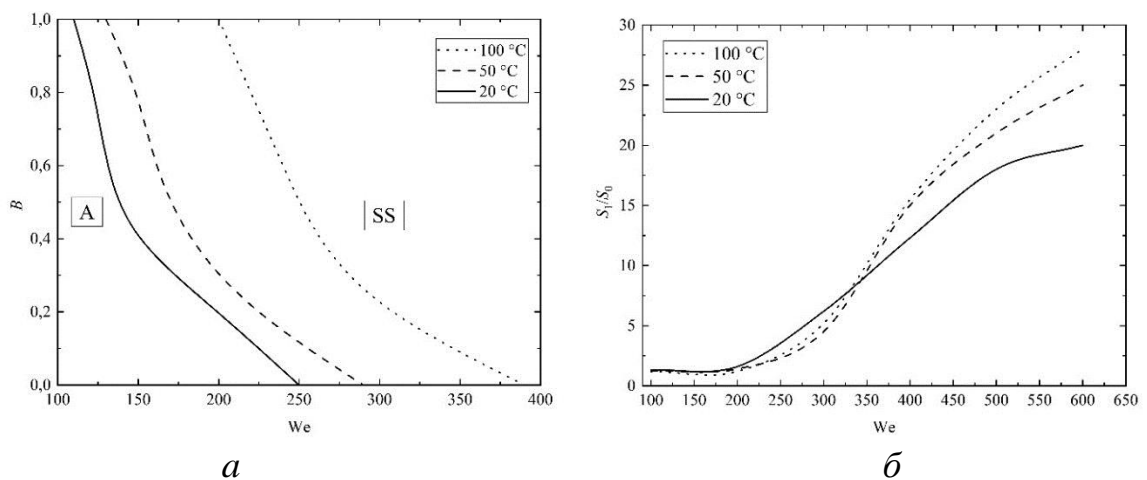


Рисунок 3.6.2 – Карты режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами (а) и отношения площадей свободных поверхностей после и до соударения (б) при варьировании температуры газовой среды

При анализе видеозаписей проведенных экспериментов сформулировано заключение об определяющем влиянии отношения размеров капель и частиц на режимы и последствия их соударений. Установлено, что чем меньше размеры

исходных капель, тем меньше количество формируемых в процессе соударений вторичных фрагментов. Для измельчения мелких капель достаточны пониженные относительные скорости соударения с частицами. Наоборот, рост размеров исходных капель сопровождался повышением требуемых для их распада относительных скоростей движения. Соответственно, увеличение размеров капли приводило к росту значения числа Вебера для режима дробления возрастает. Это обусловлено тем, что капля, имеющая большие размеры, при одинаковых относительных скоростях движения как бы втягивала в себя частицу. При увеличении же скоростей движения частиц и капель происходила фрагментация капель.

При математической обработке данных на рисунке 3.6.2 установлена зависимость линейного параметра взаимодействия от значения числа Вебера при варьировании температуры газовой среды:

$$B = a \cdot We^2 - b \cdot We + c. \quad (3.6.1)$$

Коэффициенты уравнения зависят от температуры газовой среды и описываются следующими зависимостями:

$$a = 2,98 \left(\frac{T_g + 273}{T_{liq} + 273} \right)^{-1,04} \cdot 10^{-4}; \quad (3.6.2)$$

$$b = -0,026 \ln \left(\frac{T_g + 273}{T_{liq} + 273} \right) + 0,0589; \quad (3.6.3)$$

$$c = 0,709 \cdot \frac{T_g + 273}{T_{liq} + 273} + 3,96. \quad (3.6.4)$$

Итоговое выражение для прогнозирования критических условий переходов между режимами агломерирования и растягивающего разделения имеет вид:

$$B = 2,98 \left(\frac{T_g + 273}{T_{liq} + 273} \right)^{-1,04} \cdot 10^{-4} \cdot We^2 + \left(0,026 \ln \left(\frac{T_g + 273}{T_{liq} + 273} \right) + 0,0589 \right) \cdot We + 0,709 \cdot \frac{T_g + 273}{T_{liq} + 273} + 3,96 \quad (3.6.5)$$

Анализ рисунка 3.6.3 [107] показал, что при соударении двух капель воды для устойчивой их фрагментации необходимы меньшие значения числа Вебера на 10-30 %. Такой эффект объясняется повышенной вязкостью и плотностью у капли суспензии. Следовательно при соударении капли суспензии и твердой частице для

ее разрушения необходимы большие инерционные силы, которые преодолеют силы вязкости и трения жидкости. При соударении же двух капель воды энергия удара распределяется по обоим поверхностям и приводит к их фрагментации.

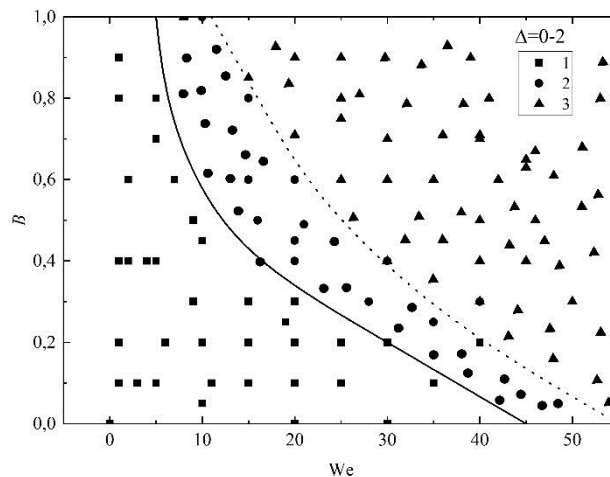
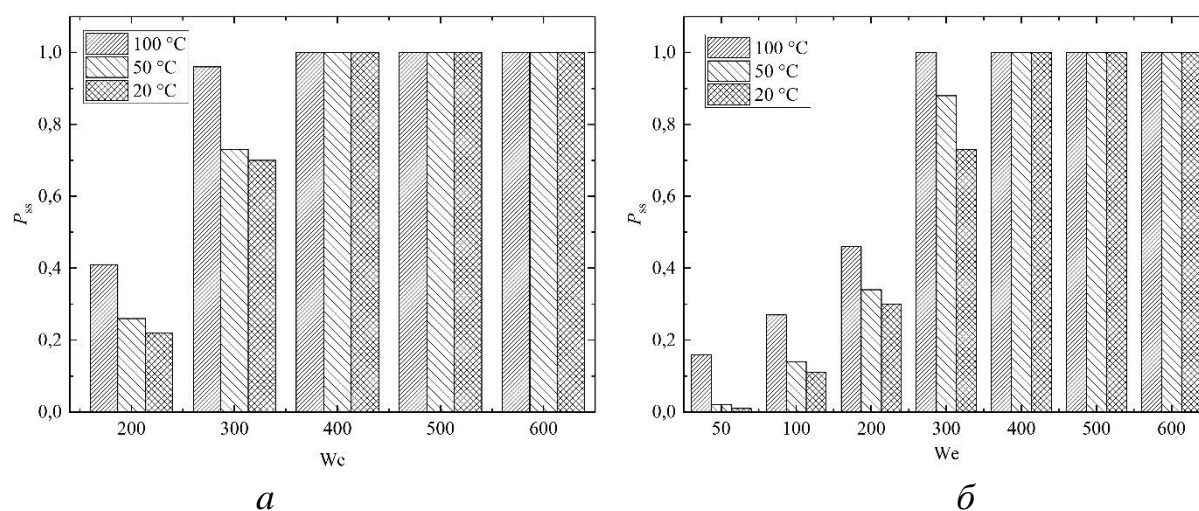
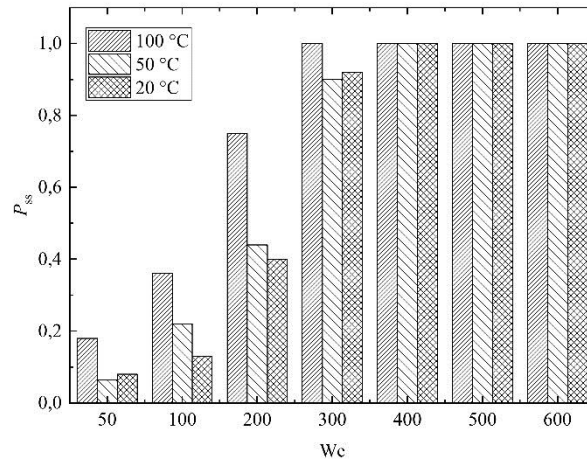


Рисунок 3.6.3 – Карты режимов соударений капель воды [107]: 1 – коалесценция; 2 – разлет; 3 – дробление

На рисунке 3.6.4 приведены установленные при проведении экспериментов частоты реализации режима дробления в зависимости от значений числа Вебера при варьировании температуры воздушной среды, где происходит соударение капель суспензии и частиц песка в аэрозольных потоках. По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение концентрации капель и частиц в зоне соударения приводит к росту вероятности дробления капель на 10-15 %. Такой эффект обусловлен тем, что в зоне соударения реализуется больше взаимодействий капли с частицей и между собой, что приводит к укрупнению капель, после чего же фрагментация происходит при меньших скоростях, а следовательно, происходит снижения значений числа Вебера необходимых для протекания режима дробления. Проведенные эксперименты показали, что рост температуры газовой среды приводит к увеличению вероятности вторичного измельчения капли о твердые частицы при значениях числа Вебера менее 350.

Установлено, что при увеличении концентрации капель и частиц в аэрозольных потоках частота реализации режима растягивающего разделения возрастала на 10-15 %. Это обусловлено деформацией поверхности капель вследствие частых соударений с соседними частицами и каплями. Каждый последующий удар частицы по такой капле приводил ее измельчению. Увеличение концентрации капель и частиц приводило к снижению среднего размера вторичных капель в аэрозольных потоках на 10-25 %. Т.е. интегрально жидкость измельчалась более интенсивно. Для формирования большего количества капель необходимо увеличить как расход жидкости, так и расход воздуха. Увеличение расходов приводило к повышению скорости движения капель на 5-10 %. Как следствие, возрастали действующие на капли силы инерции. С помощью данных рисунка 3.6.4 правомерно выполнять прогнозирование условий, при которых преобладает режим дробления для типичных установок распылительной сушки. В частности, выделено совместное влияние скоростей движения, отношений размеров, углов атаки капель и частиц, температуры газовой среды. Показаны диапазоны, при которых данные условия обеспечиваются достаточно рационально, т.е. оптимизируется применение основных ресурсов.





в

Рисунок 3.6.4 – Частота реализации режима растягивающего разделения от значения числа Вебера при варьировании температуры газовой среды, а также при изменении их относительной концентрации капель: *а* – $\gamma_0/\gamma_{\min}=2-4$; *б* – $\gamma_0/\gamma_{\min}=4-5$; *в* – $\gamma_0/\gamma_{\min}=5-6$. $\gamma_0=10^{-4}$ – масштаб относительной концентрации (м^3 капель жидкости в 1 м^3 газа) до взаимодействия капель

На рисунке 3.6.5 приведены установленные распределения размеров капель и частиц до их соударений, а также при совместном движении взаимодействующих капель и частиц при значениях числа Вебера около 250 для температуры газовой среды 20 °C и 100 °C. Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что при распыле суспензии размер капли может достигать около 1,5 мм (рисунок 3.6.5*а*). При соударении капель суспензии с частицами песка такой параметр снижается до 1 мм (рисунок 3.6.5*б*). Т.е. при значениях числа Вебера около 300 происходит полное дробление крупных капель, что способствует росту количества вторичных фрагментов размерами менее 0,2 мм практически в 5–7 раз. Для процессов термической сушки определяющим является такой параметр как размер полученной из капли твердой частицы. При встречном направлении распыления форсуночных устройств обеспечивается существенное снижение размеров капель. Фрагментация капель позволяет снижать размеры камеры взаимодействия и тем самым удешевлять процесс производства осушенных твердых частиц.

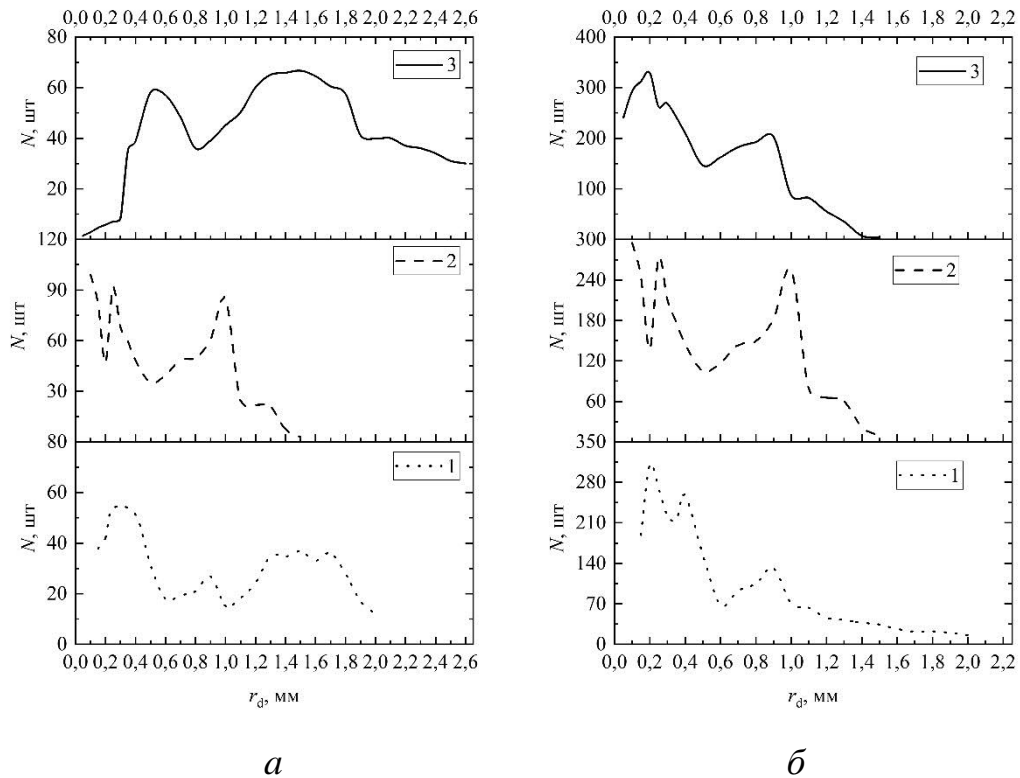


Рисунок 3.6.5 – Распределения размеров капель и частиц в аэрозольных потоках по размерам для температуры газовой среды 20 °С (*a*) и 100 °С (*б*):
 1 – капли воды; 2 – частицы песка; 3 – после соударения аэрозольных потоков
 капель воды и частиц песка при значении числа Вебера около 250

Анализ видеogramм проведенных экспериментов показал, что соударения капель с частицами, имеющими форму сфер и многогранников, существенно отличаются. Этот вывод коррелирует с заключениями [180,212]. При столкновении с каплей суспензии возникало большее трение и большее сопротивление прохождению частицы сквозь каплю из-за выступающих вершин. Значения критического числа Вебера для дробления ниже в случае многогранников на 7–10 %. Аналогичный эффект выделен и в опытах [213]. На рисунке 3.6.6 приведены частоты реализации режима дробления от значения числа Вебера при варьировании температуры газовой среды в аэрозольных соударяющихся потоках при повторных соударениях вторичных фрагментов. Установлено, что при попадании частицы во вторичные фрагменты возрастает пороговое значение числа Вебера для дробления капли. При значении числа

Вебера менее 200 преобладает режим коалесценция капли и частицы. Такой эффект связан с тем, что при первом соударении капли с частицей и ее измельчении снижается скорость движения.

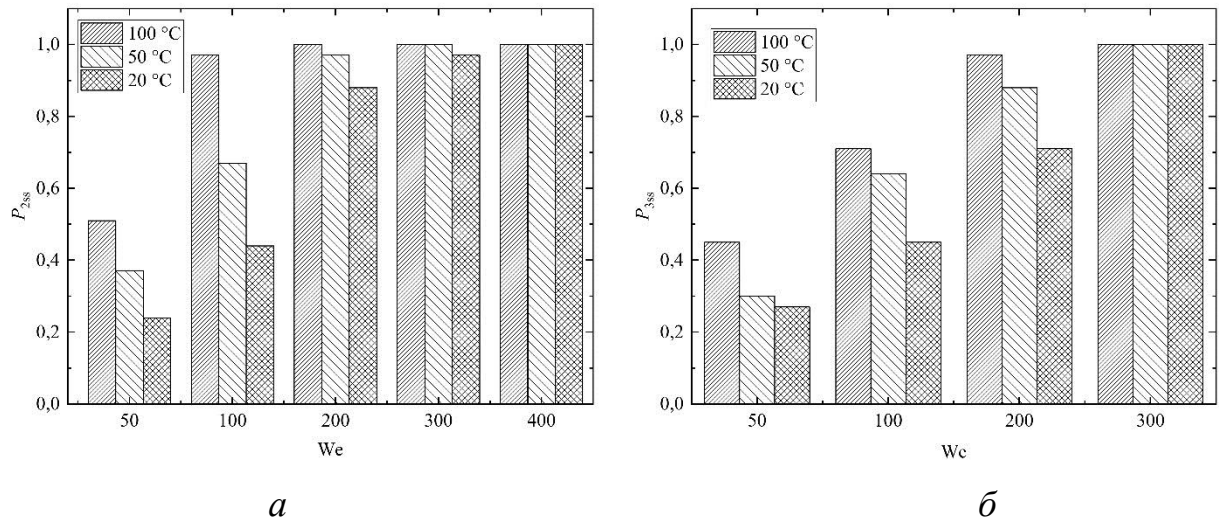


Рисунок 3.6.6 – Частота реализации режима растягивающего разделения от значения числа Вебера при варьировании температуры газовой среды в аэрозольных потоках для второго (а) и третьего соударения вторичных фрагментов с частицей (б)

На рисунке 3.6.7 приведены зависимости отношения площадей свободных поверхностей до и после второго и третьего соударения капли с частицей. Установлено, что за счёт снижения скорости движения как капли, так и частицы при первом их соударении отношение площадей до и после соударения снижается во всем исследуемом диапазоне значений числа Вебера. Коалесценция происходит при значениях числа Вебера менее 100, как для первичного соударения капли и частицы, так и для последующих.

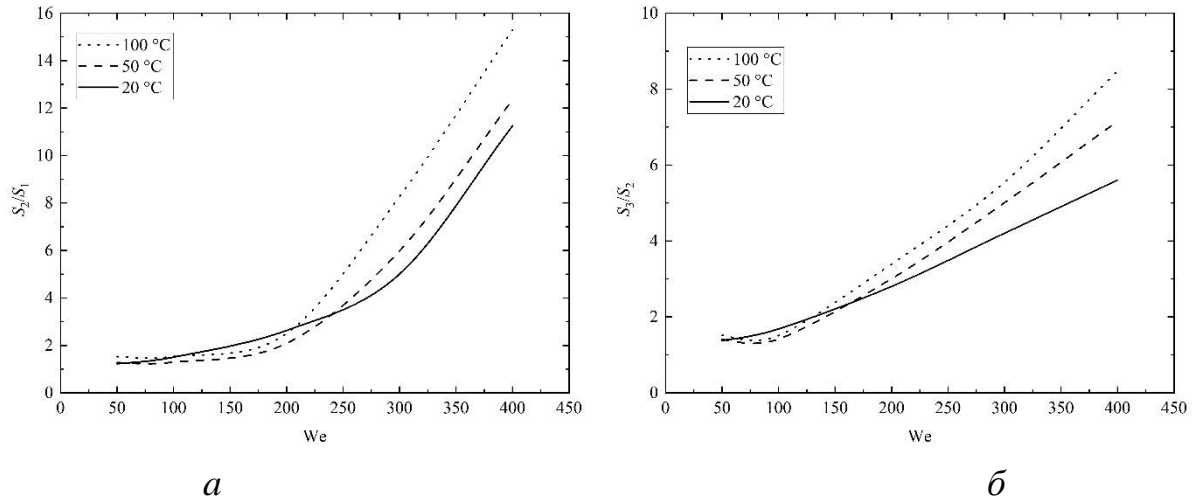


Рисунок 3.6.7 – Отношения площадей свободных поверхностей после и до второго (а) и третьего (б) соударения капли с частицей при варьировании соотношении размеров капель и частиц

На рисунке 3.6.8 приведены распределения размеров как отдельных аэрозольных потоков капель и частиц, так и совместном при значениях числа Вебера около 250 при вторичном и последующем пересечении спрейных струй.

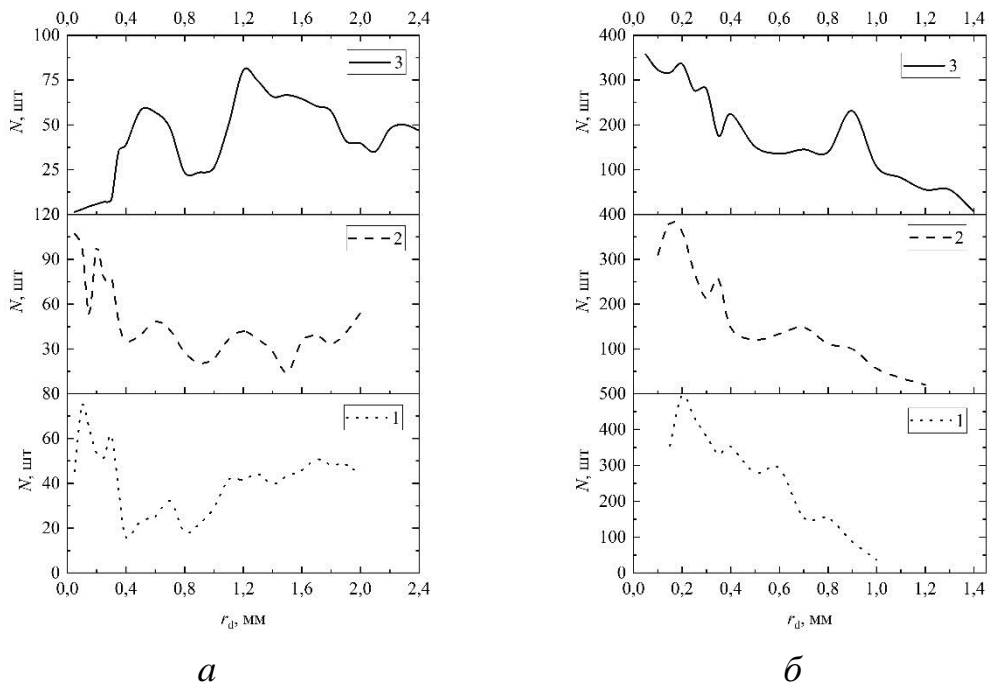


Рисунок 3.6.8 – Распределения размеров капель и частиц в аэрозольных потоках по размерам для температуры газовоздушной среды 20 °С (а) и 100 °С (б):

1 – капли воды; 2 – частицы угля; 3 – после последующих соударений аэрозольных потоков капель воды и частиц угля при значениях числа Вебера около 250

При анализе полученных результатов выделены важные особенности, связанные с каскадными соударениями капель и частиц в спреях. В частности, при первичном соударении капли и частицы, движущихся с относительными скоростями более 2 м/с, происходило дробление. Оно приводило к снижению скорости движения вторичных фрагментов в 2–3 раза. Как следствие, интенсифицировались соударения с режимом коалесценции капель и частиц. Соответствующие эффекты способствовали контролируемому изменению концентраций капель и частиц в спреях.

Высокоскоростная видеорегистрация позволила обосновать интенсивное агломерирование частиц в каплях в процессе свободного движения в газовой среде. При попадании частицы с высокой относительной скоростью (более 3 м/с) происходило дробление капли. Агломераты твердых частиц распадались на 40-60 % относительно сформировавшегося объема. Соударения капель, содержащих твердые частицы, даже при повышенных значениях числа Вебера не позволяют получить спрей с осушенными элементами твердой фазы, имеющими размеры, соответствующие или пониженные относительно исходных размеров частиц. Как следствие, технологии оросительной сушки твердых частиц с учетом реальных диапазонов варьирования углов атаки, размеров и скоростей движения спреев имеют определенные технологические ограничения.

3.7. Рекомендации по использованию результатов исследований для повышения эффективности энергетического оборудования с газопарокапельными потоками

Полученные результаты экспериментальных исследований представляют интерес для развития многофазных газопарокапельных приложений по нескольким причинам. Во-первых, результаты опытов, на основе которых получены карты режимов соударений капель и частиц, а также интегральные характеристики вторичных фрагментов, представляют фундаментальный интерес для развития существующих моделей для прогнозирования последствий соударений капель и твердых частиц и интегральных характеристик измельчения жидкости. В частности, представленные в настоящей работе выражения для описания вклада основных исследованных факторов на границы режимов соударений капель и частиц, а также характеристики вторичных фрагментов, могут быть включены в модели для дополнительного учета как отдельного, так и совместного влияния параметров частицы. Во-вторых, выражения для описания границ переходов между режимами соударений капель и частиц можно использовать в технологических процессах для управления режимами соударений. Наиболее ценный результат проведенных исследований состоит в том, что экспериментально установлены условия, при которых шероховатость поверхности частиц оказывает существенное влияние на режимы и последствия соударения с каплями (агломерирование и разделение растяжением). Выделены условия, при которых данный фактор считается малозначимым (при нанесении шероховатой поверхности механическим методом).

При анализе результатов проведенных экспериментов выделены два режима взаимодействия капель жидкостей с твердыми частицами: агломерирование и разделения. Аналогичные режимы изучались в [107]. При реализации режима агломерирования соударение капель жидкости с твердыми частицами не сопровождалось образованием вторичных фрагментов, т.е. капля полностью оседала на частице. В результате реализации режима разделения формировались вторичные жидкостные фрагменты. Каждый из этих двух режимов важен для применения в топливо-распылительных системах. В частности, при устойчивой реализации режима агломерирования обеспечивается смешение твердых и

жидких компонентов непосредственно в камере сгорания энергетической установки. Например, вода распыляется одним форсуночным устройством, масло – вторым, уголь – третьим. В результате пересечения трех спреев реализуются соударения капель и частиц, которые приводят к формированию неоднородных капель суспензий. Таким образом, капли таких композиционных смесей формируются непосредственно в камере сгорания. Реализация режима разделения позволит снизить размеры капель суспензий и, как следствие, повысить полноту выгорания топлива, снизить времена задержки зажигания и антропогенные газовые выбросы [214].

В связи с тем, что суспензии содержат влагу, времена задержки зажигания такого топлива весьма велики. С целью смешения и сжигания суспензионного топлива мы предлагаем использовать предтопок. На рисунке 13 представлена схема расположения форсунок для создания суспензионного топлива.

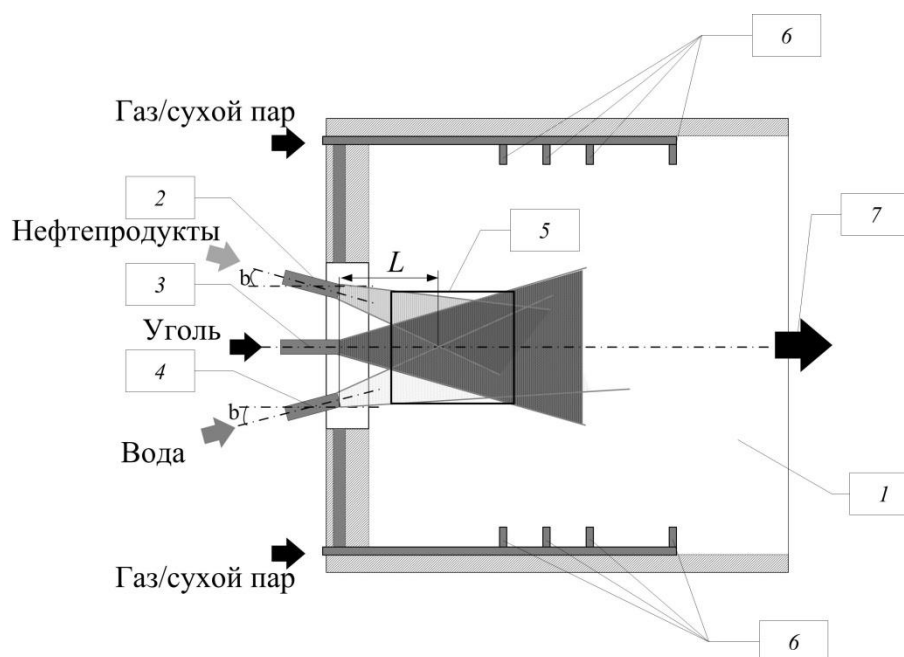


Рисунок 3.7.1 – Схематичное изображение расположения форсунок для создания суспензионного топлива в предтопке: 1 – камера сгорания; 2, 3, 4 – форсунки; 5 – область взаимодействия частиц и капель суспензионного топлива; 6 – вводы газа (горячего воздуха); 7 – выход пламени в топку котла

При распылении твердого топлива (например, угля) будет применяться форсунка с большей производительностью и угла раскрытия струи после распыления, по сравнению с форсунками, которые распыляют жидкости. Варьируя угол (ψ) расположения форсунок, распыляющих масло и воду, возможно контролировать расстояние (L) на котором будет происходить взаимодействие капель и частиц. Известно, что скорость в ядре струи топлива снижается при удалении от устья форсунки, а площадь сечения струи увеличивается. Зная скорости распределения капель жидкостей и частиц после распыления форсунками, подобрав L , а также их размер, на основании полученных карт режимов (п. 3.2) возможно реализовать необходимый режим (агломерирование или разделение) для более эффективного сжигания топлива.

При сравнении полученных результатов по изучению столкновения пиролизирующихся частиц и подложек из угля с взаимодействием капель с нагретыми металлическими поверхностями [215,216] и неорганическими поверхностями [217] сформулирован вывод о том, что выделение газообразных летучих не оказывает значительного влияния на режимы и характеристики разрушения капель. Основными факторами, влияющими на режим исхода удара капель, являются температура поверхности, а также ее шероховатость и пористость. Скорость и плотность выхода летучих газов в исследуемых диапазонах температуры недостаточны для создания газовой прослойки между топливом, которая могла бы стать причиной отскока от поверхности. Возможно, при температурах выше 550 °С летучие газы создают повышенное давление в порах шероховатой поверхности угля и являются дополнительной причиной разрушения капель на большее количество вторичных фрагментов. Такие температуры не достигаются в подготавливающих топливных системах для обеспечения пожаровзрывобезопасности. При столкновении с не нагретой поверхностью в этих же порах содержится воздух, который также при высоких значениях числа We влияет на разрушение капли воды. Поэтому затруднительно выделить долю влияния пиролиза на процесс разрушения капель. Следует отметить, что в диапазоне температур 20–700 °С режим Лейденфроста не зарегистрирован. В тоже же время на металлических и неорганических

поверхностях он наблюдается, например, на никеле при $T_s = 340 - 380$ °С [216] и на стекле при $T_s \approx 300$ °С [217]. Из-за теплофизических свойств угля (низкой теплопроводности и теплоотдачи), а также высокой пористости и шероховатости режим Лейденфроста смещается в область больших температур.

Результаты исследований представляют интерес для развития технологии газификации низкокачественного угля и горючих отходов флотации угля. Такие типы топлива имеют низкую теплотворную способность и высокую зольность, что затрудняет их прямое сжигание в котельных агрегатах. Однако широкому применению низкокачественного угля и горючих отходов флотации угля препятствует образование агрессивных жидких отходов, вызывающих коррозию оборудования, и их низкая температура горения. Эту проблему еще предстоит решить в будущем. С помощью газификации обеспечивается частичная компенсация перечисленных недостатков. Одним из доказавших свою эффективность способов снижения вредных выбросов является добавление воды к пиролизующимся или газифицирующимся топливам [218–220]. Температура твердых фрагментов в реакторах газогенераторов колеблется от 400 до 1100 °С в зависимости от типов реактора и подаваемого топлива. Таким образом впрыск воды в среду с витающими в ней угольными фрагментами ведет к измельчению капель не только вследствие удара, но и за счет быстрого вскипания жидкости при контакте с перегретыми витающими частицами. При сухой газификации высокосортных углей помимо горючего синтез-газа выделяется оксиды серы и азота, вызывающие кислотные дожди и ухудшающие качество воздуха вокруг предприятия. При распылении воды в объеме реактора снижается количество выбросов вредных газов и одновременно очищается выработанный синтез-газ. Прямой впрыск дополнительной воды в реактор положительно сказывается на экологических аспектах процесса незначительно снижая энергетические потери от испарения избыточной влаги. Из существующих типов газогенераторов предложенная технология может быть использована в работающих по схеме газификации в пылевом потоке и в кипящем слое. Схематичное изображение реакторов приведено на рисунке 3.7.2.

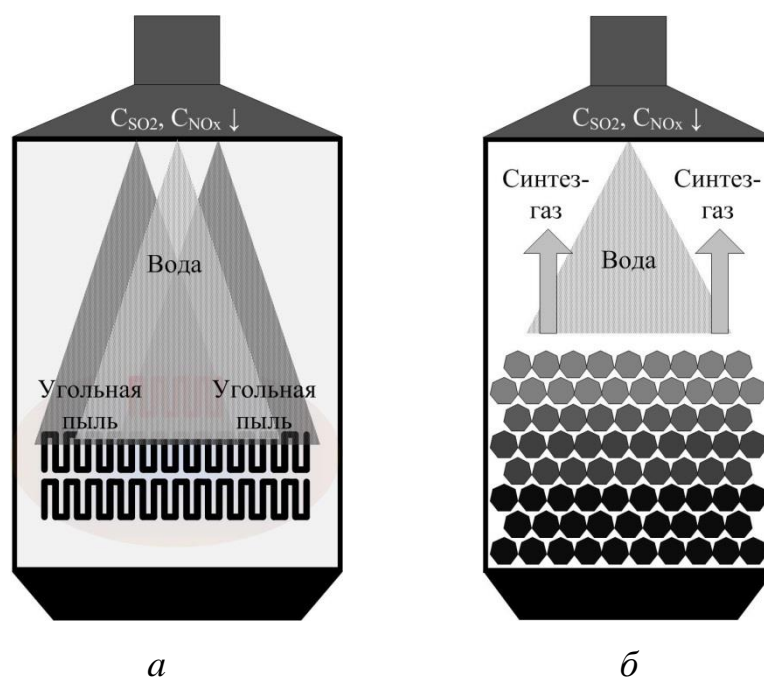


Рисунок 3.7.2 – Схематическое изображение газогенераторов, работающих по схеме газификации в пылевом потоке (а) и кипящем слое (б)

Газификаторы в пылевом потоке в качестве исходного сырья используют измельченные твердые промышленные отходы, угольную пыль и другие подобные материалы. Содержащиеся в газе хлориды и сера вымываются путем распыления жидкости. В газификаторах с кипящим слоем размер частиц находится в диапазоне 20-60 мм. Подаваемая в нижнюю часть генератора паровоздушная смесь приводит к непрерывному движению газифицируемого материала. Таким образом выравнивается температура по всему объему насыпки, увеличивается площадь реакции, из газа удаляются нежелательные примеси.

Полученные результаты позволили сформулировать заключение о том, что вторичное измельчение капель суспензий при соударении с твердыми частицами и их агломерирование оказывают определяющее влияние на эффективность работы устройств и систем распылительной сушки. В зависимости от требований к получаемому продукту существует потребность в измельчении капель суспензий или же, наоборот, их укрупнении и увеличении концентрации частиц. Измельчение капель суспензии позволит получить частицы с минимальными

размерами. Агломерирование капель и частиц позволит увеличить дисперсность спреев. На рисунке 3.7.3а приведена схема реактора термической сушки, при которой подача жидкости и твердых частиц осуществляется в верхней части установки. Для эффективных процессов измельчения или укрупнения капель и твердых частиц форсуночные устройства должны располагаться друг напротив друга с допустимым отклонением не более 10° . За счет применения такой схемы обеспечивается возможность снижения высоты реактора на 30 %. Схема разработанной установки приведена на рисунке 3.7.3б. Применение такой системы компоновки форсуночных устройств позволит снизить затраты на производство реактора за счет снижения габаритных размеров.

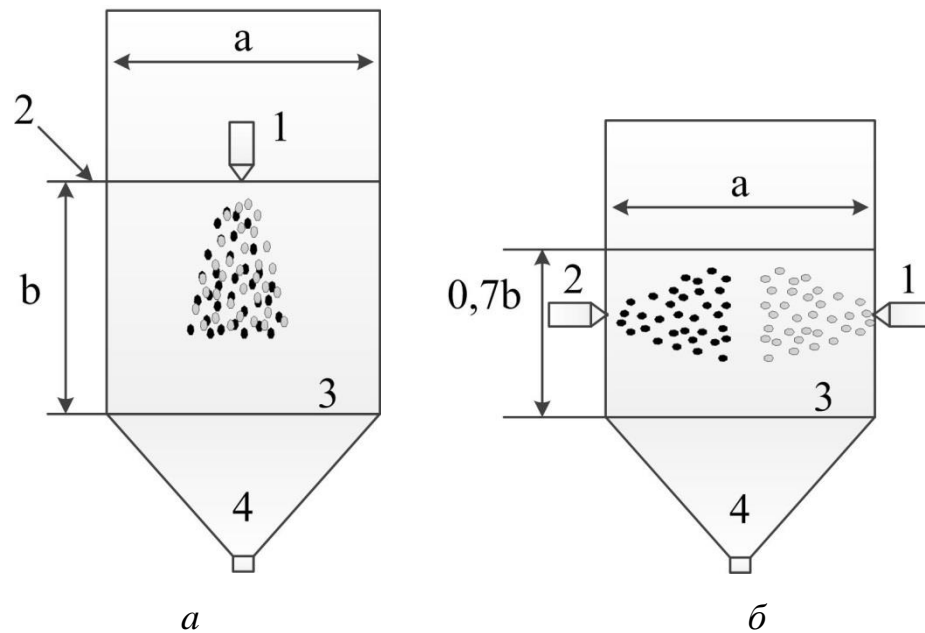


Рисунок 3.7.3 – Схема стандартной распылительной сушки твердых частиц (а) и модифицированной с учетом выполненных исследований (б): 1 – подача жидкости; 2 – подача твердых частиц; 3 – реактор; 4 – бункер хранения готового продукта

Представленные в настоящей работе результаты экспериментов по соударению капель жидкости, содержащих твердые частицы в малой концентрации, целесообразно использовать при модернизации и оптимизации

работы промышленных аппаратов мокрой очистки воздуха и газов. Эксплуатируемые в настоящее время промышленные аппараты мокрой очистки газов (рисунок 3.7.4) характеризуются высокой степенью очистки, способностью увлажнения и снижения температуры воздуха и газов рабочей среды, а также нейтрализацией вредных примесей за счет их абсорбции и адсорбции с помощью определенных химических растворов. Традиционные циклонные фильтры и золоуловители имеют степень очистки проходящих газов 0,85–0,9 [221,222]. При усовершенствовании конструкции и добавления трубы Вентури степень очистки увеличивается до 0,98–0,99. Оптимизация режима работы форсуночных устройств, засева каплями жидкости рабочего объема фильтров, дисперсности подаваемого аэрозоля [223–225] степень очистки проходящих газов до 0,995 и более [226,227]. Повышение степени очистки уходящих газов положительно сказывается на экологической безопасности в населенных пунктах вблизи промышленных объектов.

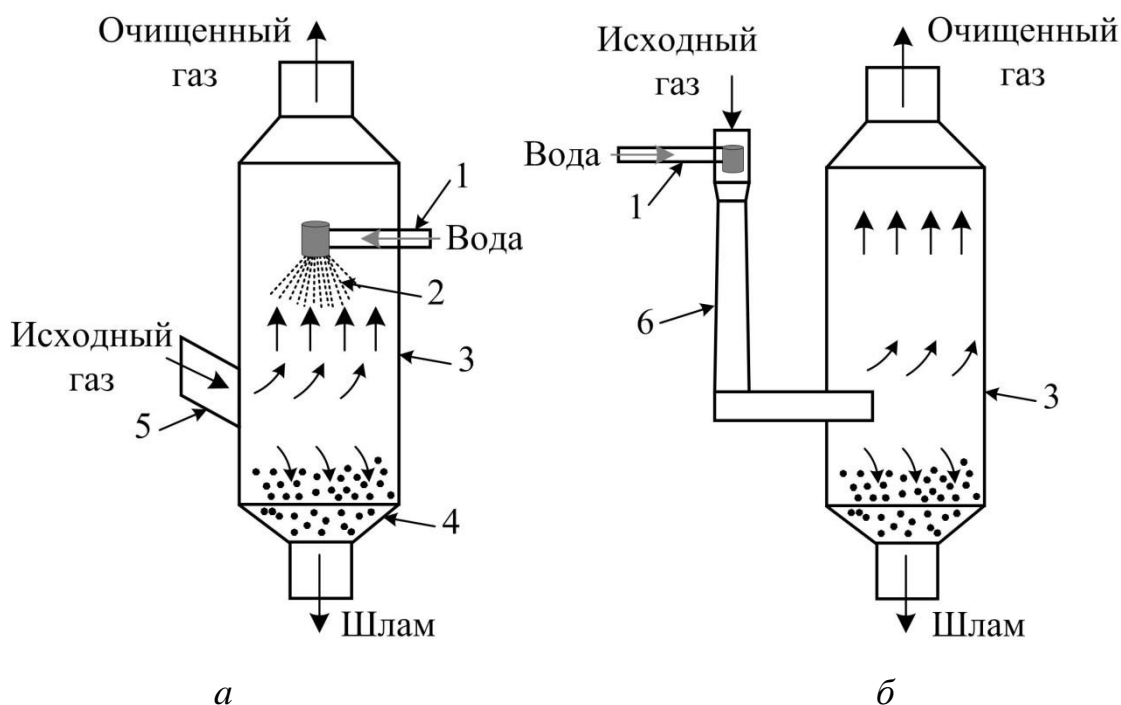


Рисунок 3.7.4 – Схема центробежного скруббер (а) и скруббера Вентури (б) для мокрой очистки газов: 1 – распределительное устройство; 2 – орошающая

жидкость; 3 – корпус установки; 4 – бункер; 5 – входной патрубок; 6 – труба
Вентури

Мокрые методы очистки газов широко применяются в металлургической, химической, энергетической отраслях промышленности, в сфере производства строительных материалов, удобрений, предприятия которых формируют миллионы тонн в год антропогенных выбросов в атмосферу. Во время контакта жидкой и твердой фаз происходит смачивание и слипание частиц с последующей их коалесценцией. Увеличенные по массе и объему загрязнения оседают в нижнюю часть корпуса аппарата и затем смываются в дренаж. В таком случае для аппаратов мокрой очистки актуальным вопросом является повышение скорости коалесценции мелких капель в крупные для ускорения их осаждения. Объединение мелких капель в крупные значительно снижает площадь свободной поверхности распыляемой жидкости при постоянстве ее объема. Из этого следует вывод, что на начальном этапе впрыска жидкости целесообразно ее измельчение до размеров $R_d=0,2-0,4$ мм [228,229], в том числе за счет вторичного измельчения исходных капель вследствие их соударения. Следовательно, необходимо, чтобы значение числа Вебера в этой зоне было не менее 80. После насыщения капель жидкости твердыми частицами необходимо ускорить их коалесценцию для более быстрого их осаждения и вывода из активной зоны реактора. Для этого требуется обеспечить значения числа Вебера в зоне коалесценции от 10 до 30. Применение результатов исследований [226,230] позволило обосновать повышение эффективности работы установок мокрой очистки газов по улавливанию твердых частиц на 3–7 % за счет оптимизации настройки работы и углов форсунок.

Выводы по третьей главе

1. Соударения капель жидкостей и твердых частиц в газовой среде позволяют изменять характеристики газопарокапельных многофазных потоков в широких диапазонах. Приведенные в главе карты режимов и

аппроксимационные математические выражения позволяют прогнозировать критические условия, способствующие агломерированию твердых частиц и капель жидкостей, а также измельчения последних.

2. Результаты проведенных экспериментов обобщены в форме карт режимов соударений капель и твердых частиц в системе координат, учитывающей параметр взаимодействия B и число Вебера (We). На картах выделены режимы агломерирования и растягивающего разделения. Установлено, что оптимальное соотношение размеров капель и частиц для смешивания в топочных камерах превышает 2, что обеспечивает достаточно высокие скорости движения (более 4 м/с), совместимые с промышленными сплинкерными и форсуночными устройствами. Также определено, что для эффективного измельчения капель на твердые частицы необходимо, чтобы их размеры были сопоставимыми.
3. Обоснована значимая роль формы капли на характеристики ее вторичного измельчения при контакте с твердой частицей. Установлено, что существенное измельчение капли суспензии происходит при ее форме в виде эллипсоида, вытянутого в поперечном направлении относительно траектории ее движения. Такая форма капли позволяет снизить значение критического числа Вебера практически на 10 %, но при этом при не высоких скоростях движения (до 2,5 м/с) увеличивается средний размер вторичных фрагментов.
4. В ходе экспериментального исследования воздействия разогретой газовой среды на соударения двухфазных капель жидкости выявлено влияние пузырьков пара на их характеристики и режимы взаимодействия. Изучены двухфазные капли с различной концентрацией паровых пузырей в диапазоне от 10 до 90 процентов. В результате описаны особенности процесса дробления четырех видов двухфазных капель при столкновениях с каплями воды без пузырьков пара. Максимальные значения отношения S_1/S_0 зафиксированные при столкновении двух капель воды достигали до 2,8, в то время как минимальные значения (до 1,4) зарегистрированы при

взаимодействии капли воды с каплями, содержащими от 80 до 90 % пара, которые представляли собой крупные паровые пузыри.

5. Результаты проведённых экспериментов обосновали существенное влияние вязкости суспензии на режимы соударения капли с частицей. Результаты обобщены в виде карт режимов соударений капель и твердых частиц в системе координат $B(We, Oh)$. Для состава с 10 % содержанием твердых частиц зарегистрированы наименьшие значения числа Вебера (меньше 10-30 % по сравнению с остальными составами), при которых возможна реализация режима растягивающего разделения. При дальнейшем увеличении вязкости суспензии границы режимов растягивающего разделения сдвигаются в сторону больших значений числа Вебера на 15-25 %. Снижение поверхностного натяжения с 0,2472 до 0,0139 Н/м приводит к росту S_1/S_0 на 25–40 %. Установлено, что уменьшение поверхностного натяжения жидкости в два раза приводит к смещению границ дробления капли в сторону меньших значений числа Вебера на 20–35 %.
6. Процесс соударения капель суспензий в газовой среде с повышенной температурой является сложным и многопараметрическим процессом, который зависит от совокупности факторов, включая поверхностное натяжение, размеры и формы капель, скорость их движения и вязкость газовой среды. Эти результаты важны для глубокого понимания процессов, происходящих в суспензиях, а также для разработки новых методов контроля их свойств. Выделены режимы агломерирования и разделения при соударении капель и частиц угля в процессе химического реагирования и фазового перехода. Установлены отличия характеристик взаимодействия капель воды с частицами угля при варьировании температуры поверхности $T_s = 20–700$ °С, размеров капель $R_d = 1,2–1,8$ мм и скорости их движения $U_d = 1–3,5$ м/с. Определено, что при пиролизе угля выделение газообразных летучих не оказывает значительного влияния на режимы и характеристики разрушения капель в диапазоне исследуемых температур.

7. Высокоскоростная видеорегистрация соударений капель и частиц в составе спреев позволила выделить значимые эффекты каскадных взаимодействий. Обосновано, что каждое последующее соударение капель и частиц приводит к снижению относительных скоростей движения элементов дисперсной фазы в газовой среде. Это способствует переходу от режима дробления капель и частиц к их устойчивой коалесценции и агломерированию. Выделенные особенности показывают, что лишь на начальном этапе смешения потоков с каплями и твердыми частицами возможно интенсивное изменение дисперсности аэрозоля. Через довольно короткий интервал времени в процессе полета дисперсность стабилизируется. Далее важную роль играет процесс уменьшения размеров капель вследствие испарения жидкости. Попадание новых капель в прогретые с твердыми частицами ускоряет их измельчение и испарение, соответственно. Контролируемые каскадные соударения позволяют управлять характеристиками спреев в широких диапазонах.
8. Полученные результаты экспериментальных исследований позволили предложить конструктивные изменения в системах смешения спреев жидкостей и твердых частиц. С применением данных изменений возможно изменение интегральных характеристик работы реакторов и камер смешения в широких диапазонах. В частности, обосновано, что себестоимость готового продукта снизится на 12 %. Приведенные примеры схем и результаты прогностических расчетов показали, что снижение тепловой мощности за счет снижения размеров реактора при предложенном расположении форсуночных устройств позволит снизить ежедневные финансовые затраты на собственные нужды установки практически на 7 %.
9. Анализ проведенных экспериментальных исследований показал, что при оптимальных параметрах распыла суспензии можно добиться эффективного вторичного измельчения капли о частицу песка. В частности, при настройке горелки (скорость не менее 5 м/с) можно добиться фрагментации капель, а,

следовательно, снизить средний размер капель распыляемой суспензии в аэрозольном потоке практически на 40–50 %.

10. Полученные результаты исследований представляют собой ценную информацию для оптимизации технологий впрыска перспективных жидкостей и суспензий в рабочие камеры теплогенерирующих и теплопотребляющих агрегатов, а также энергетических установок. Они демонстрируют необходимые и достаточные условия для реализации режимов агломерирования и дробления, что способствует значительному увеличению площади поверхности теплообмена и, следовательно, тепловой мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны экспериментальные методики, созданы стенды, спланированы и проведены экспериментальные исследования взаимодействия движущихся капель жидкостей и твердых частиц в газовой среде с варьируемыми значениями температуры, давления и влажности.
2. Выбраны перспективные жидкие и твердые компоненты, параметры газовой среды, методики приготовления водных растворов, эмульсий, суспензий для проведения исследований в условиях, соответствующих газопарокапельным процессам в энергетических установках.
3. Определены критические условия взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц для реализации режимов: отскок, коагуляция, разлет, дробление. Установлены критические (необходимые и достаточные) значения безразмерных чисел для каждого режима.
4. Вычислены интегральные характеристики вторичных фрагментов жидкости после взаимодействия капель. В теплоэнергетических установках перспективно применять вторичное измельчение капель жидкостей за счет взаимодействия газопарокапельных струй жидкостей и твердых частиц с целью повышения площади испарения в несколько раз. Отношение площади теплообмена в системах, генерирующих тепло, вследствие взаимодействия капель и частиц, как элементов дисперсной фазы в газопарокапельных потоках, увеличивается от 1,2 до 4 раз.
5. Установлено влияние основных параметров (температура, относительная скорость движения, угол атаки, компонентный состав, форма и концентрация капель жидкостей в аэрозольном потоке и др.) на режимы взаимодействия капель и частиц, а также характеристики вторичных фрагментов (количество, размеры, форма, энергия, траектория и скорости движения, компонентный состав). В энергетических системах реализуется режим агломерирования капель жидкостей с твердыми частицами отношением размеров от 0,5 до 1,5 в

диапазоне чисел Вебера от 50 до 100 при изменении вязкости жидкости от 1,0 до 6,3 мПа·с и поверхностного натяжения от 36,1 до 72,7 мН/м. Рабочие жидкости для систем, генерирующих тепло, в частности, топлива, очистные растворы, растворительные эмульсии, имеют свойства, соответствующие данным диапазонам.

6. Определено влияние процессов взаимодействия капель на характеристики и условия теплообмена. Полученные результаты экспериментальных исследований позволили предложить конструктивные изменения в системах смешения спреев жидкостей и твердых частиц. С применением данных изменений возможно изменение интегральных характеристик работы реакторов и камер смешения в широких диапазонах.
7. Варьирование параметров многофазных потоков в широких диапазонах, соответствующих энергетическим установкам, позволяет надежно регистрировать условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель, агломерации и дробления взаимодействующих капель и частиц. Проведены экспериментальные оценки влияния линейных параметров взаимодействия капель и частиц на частоту возникновения основных режимов взаимодействия. Показано, что эти частоты могут применяться для прогнозирования условий интенсивного вторичного измельчения капель жидкостей и суспензий в технологиях теплотехники.
8. Соударения капель суспензий в газовой среде с повышенной температурой представляют сложные и многопараметрические процессы, характеристики которых зависят от совокупности факторов, включая поверхностное натяжение и вязкость жидкостей, размеры и форма капель, скорость их движения и вязкость газовой среды. Результаты их изучения важны для глубокого понимания процессов, происходящих в суспензиях, а также для разработки новых методов контроля их свойств. Аэрозольные потоки претерпевают значительные изменения по составу капель и частиц при их распространении в газопарокапельных средах. В частности,

при движении родительских капель в газовой среде с температурой от 20 до 500 °С их размеры меняются в несколько раз за счет теплообмена, фазовых превращений и соударений. В завихрительных системах и охладительных блоках можно понизить времена технологических циклов на 3–7 %. Интегральные характеристики вторичных жидкостных фрагментов, полученных при соударении исходных капель и частиц, в теплотехнических установках при варьировании давления от 0,09 до 0,5 МПа изменяются на 9–25 %, а температуры газовой среды от 20 до 700 °С – в 4–5 раз. Данные эффекты позволяют повысить интегральные характеристики работы теплообменного оборудования на 4–11 %.

9. Результаты экспериментов по соударению капель жидкости, содержащих твердые частицы в малой концентрации, целесообразно использовать при модернизации и оптимизации работы промышленных аппаратов мокрой очистки воздуха и газов. Предложены схемы организации эффективных условий улавливания твердых частиц каплями жидкости для практических приложений. Разработанные рекомендации по практическому применению полученных экспериментальных результатов обеспечивают обоснование выбора основных параметров технологического оборудования (таких как начальные размеры капель в потоке, их температура, скорость движения и компонентный состав) для реализации различных технологий, таких как размораживание сыпучих сред газожидкостными потоками, очистка поверхностей газожидкостными смесями, а также создание теплоносителей на основе уходящих дымовых газов и парокapельных потоков. Эти рекомендации применимы к распылительным системам, нагревателям, сушилкам, газоочистным установкам и другим блокам теплотехнического оборудования.
10. На основании полученных экспериментальных результатов установлено, что в установках, используемых для получения сухих веществ из суспензий целесообразно создавать высокий градиент температур на начальном этапе движения аэрозольного потока. Как показали эксперименты, в таком случае

происходит активное испарение влаги за счет более быстрого нагрева меньших размеров капель суспензий. В случае низкого градиента температур капли суспензий коагулируют и агломерируют при движении в гравитационном поле, за счет этого на полное испарение влаги потребуется или большее количество теплоты, чем для высушивания более мелких капель, или необходимо большее время их нахождения в сушильной установке.

11. Агломерирование твердых частиц размерами менее 0,5 мм с каплями жидкости аэрозольного потока можно реализовать в широком диапазоне скоростей их движения (от 0,1 до 100 м/с). Однако, агломерирование более крупных твердых частиц потребует соблюдения скоростей их движения в границах диапазонов изменения чисел Вебера, установленных в рамках диссертационной работы и будет зависеть от их морфологических и геометрических параметров. При высоких скоростях движения потока твердых частиц и необходимости их агломерирования с каплями целесообразно организовать подачу жидкости в направлении, соответствующем движению частиц.
12. На основании результатов, полученных при выполнении диссертационной работы, подготовлены две заявки на патенты: «Способ получения композиционного топлива», «Установка для изучения вторичного измельчения капель топлива».

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

B – безразмерный линейный параметр взаимодействия;

Bo – число Бонда;

b – расстояние между центрами масс капель, мм;

Ca – число капиллярности;

I – средняя интенсивность свечения, ед;

l_d/L_d – отношение расстояния секущей плоскости от границы изображения капли к ее общей длине;

N – количество вторичных фрагментов, шт;

Oh – число Онезорге;

P_i – вероятность i -го соударения капель в потоке;

P_g – давление газовой среды, Па;

R_a – радиус аэрозольного облака, м;

R_{d0} – начальный радиус капли, м;

R_{d1}, R_{d2} – радиусы первой и второй капли, м;

R_p – радиус твердой частицы, м;

Re – число Рейнольдса;

r_{di} – радиус i -го вторичного фрагмента, м;

S_0 – площадь свободной поверхности начальных капель, m^2 ;

S_1 – площадь свободной поверхности вторичных фрагментов, m^2 ;

S_a – площадь покрытия образованных вторичных фрагментов, m^2 ;

T_g – температура газовой среды, $^{\circ}C$;

T_{liq} – температура жидкости, $^{\circ}C$;

U_c – скорость конвекции в капле, м/с;

U_{di} – скорость движения i -ой капли жидкости, м/с;

U_p – скорость движения твердой частицы, м/с;

U_{rel} – относительная скорость движения, м/с;

V_0 – начальный объем жидкости, m^3 ;

V_1 – объем вторичных фрагментов после дробления, м^3 ;

We – число Вебера;

x_l – крайняя левая координата капли;

x_r – крайняя правая координата капли;

Δx – разность координат капли по горизонтали;

y_b – крайняя нижняя координата капли;

y_t – крайняя верхняя координата капли;

Δy – разность координат капли по вертикали.

Греческие символы:

α_d – угол атаки между каплями, $^\circ$;

β – угловой параметр взаимодействия;

γ_0 – начальная концентрация капель, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

γ_{\min} – минимальная концентрация капель, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

Δ – отношение размеров капель;

θ_{eqi} – равновесный угол соприкосновения, $^\circ$;

μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$.

Аббревиатуры:

ТЭН – термоэлектрический нагреватель;

ОВУТ – органоводоугольное топливо;

ВУТ – водоугольное топливо;

BO – bounce (отскок);

CO – coalescence (коалесценция);

DI – disruption (дробление);

SE – separation (разлет);

VOF – Volume of Fluid.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулич П., Акулич А. Конвективные сушильные установки. Методы и примеры расчета. Litres, 2019.
2. Voytkov I.S., Volkov R.S., Strizhak P.A. Temperature and velocity of the gas-vapor mixture in the trace of several evaporating water droplets // Journal of Heat Transfer. 2019. Т. 141, № 1.
3. Высокоморная О.В. и др. Влияние концентрации капель воды в аэрозольном облаке на характеристики их взаимодействия при столкновениях // Инженерно-физический журнал. Институт тепло-и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, 2020. Т. 93, № 2. С. 311–323.
4. Шевелев С.А., Зяблова Н.Н. О влиянии процессов испарения воды на эффективность охлаждения в градирнях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 3.
5. Губайдуллин Д.А. Динамика двухфазных парогазокапельных сред. Казанское математическое общество, 1998.
6. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках. Новосибирский государственный технический университет, 2009.
7. Войтков И.С. Экспериментальное исследование температуры и скорости парогазовой смеси за испаряющимися каплями жидкости при их движении через высокотемпературные газы. Томск:[б. и.], 2018.
8. Zhdanova A.O. и др. Interaction of a Liquid Aerosol with the Combustion Front of a Forest Combustible Material Under the Conditions of Countercurrent Air Flow // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Т. 92, № 3. С. 687–693.
9. Жданова А.О. и др. Взаимодействие жидкостного аэрозоля с фронтом горения лесного горючего материала в условиях встречного потока воздуха // Инженерно-физический журнал. Институт тепло-и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, 2019. Т. 92, № 3. С. 711–717.

10. Люлин Ю.В. и др. Влияние протяжённости межфазной поверхности на интенсивность испарения горизонтального слоя жидкости под действием потока газа // Теплофизика и аэромеханика. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики..., 2020. Т. 27, № 1. С. 121–125.
11. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: учеб. для вузов. Энергоатомиздат, 1987.
12. Kumar A.R., Gupta N., Schafrik S. CFD modeling and laboratory studies of dust cleaning efficacy of an efficient four stage non-clogging impingement filter for flooded-bed dust scrubbers // International Journal of Coal Science & Technology. 2022. Т. 9, № 1. С. 16.
13. Sun Q. и др. Simulation of Micron and Submicron Particle Trapping by Single Droplets with Electrostatic Fields // Energies. 2022. Т. 15, № 22.
14. Xia S. и др. Effect of the Surface Treatment Process of Filter Bags on the Performance of Hybrid Electrostatic Precipitators and Bag Filters // Atmosphere. 2022. Т. 13, № 8.
15. Liu Z. и др. The effects of the spraying pressure and nozzle orifice diameter on the atomizing rules and dust suppression performances of an external spraying system in a fully-mechanized excavation face // Powder Technology. 2019. Т. 350. С. 62–80.
16. Xie Y. и др. Study on spray dust removal law for cleaner production at fully mechanized mining face with large mining height // Powder Technology. 2021. Т. 389. С. 48–62.
17. Zhou Q. и др. Effects of droplet formation patterns on the atomization characteristics of a dust removal spray in a coal cutter // Powder Technology. 2019. Т. 344. С. 570–580.
18. Beck T.W. и др. Open-Air sprays for capturing and controlling airborne float coal dust on longwall faces // Mining Engineering. 2018. Т. 70, № 1. С. 42 – 48.
19. Organiscak J.A. Examination of water spray airborne coal dust capture with three wetting agents // Trans. Soc. Min. Metall. Explor. Inc. 2013. Т. 334, № 1. С. 427 – 434.
20. Nie W. и др. Study on the optimal parameter range of droplet-wrapped respirable

dust in spray dustfall by mesoscopic method. // *Environmental Research*. 2022. Т. 214. С. 114035.

21. Arya S., Novak T. Numerical Investigation of the Effect of a Novel Wet Scrubber on Dust Reduction in an Underground Coal Mine // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020. Т. 37, № 1. С. 129–139.

22. Sun Z. и др. Agglomeration and removal characteristics of fine particles from coal combustion under different turbulent flow fields // *Journal of Environmental Sciences*. 2020. Т. 89. С. 113–124.

23. Zhou Q. и др. Experimental investigation on the performance of a novel magnetized apparatus used to improve the dust suppression ability of surfactant-magnetized water // *Powder Technology*. 2019. Т. 354. С. 149–157.

24. Kachhwaha S.S., Dhar P.L., Kale S.R. Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with a water spray—I. Horizontal parallel flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998. Т. 41, № 2. С. 447–464.

25. Kröger D.G. Air-cooled heat exchangers and cooling towers. PennWell Books, 2004. Т. 1.

26. Zeng Z., Sadeghpour A., Ju Y.S. A highly effective multi-string humidifier with a low gas stream pressure drop for desalination // *Desalination*. 2019. Т. 449. С. 92–100.

27. Вобликова Т.В., Шлыков С.Н., Пермяков А.В. Процессы и аппараты пищевых производств. Ставропольский государственный аграрный университет | АГРУС, 2013.

28. Zhu Z., Li Y., Sun D.-W. Effects of initial temperatures on vacuum film cooling and vacuum spray cooling on apple juice and milk // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. Т. 44, № 7. С. e14500.

29. Hosseini Araghi A., Khiadani M. Experimental investigation and analysis of a new single-stage vacuum spray flash desalinators utilising a gas-liquid ejector // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Т. 190. С. 118–127.

30. Fathinia F. и др. Performance improvement of spray flash evaporation desalination systems using multiple nozzle arrangement // *Applied Thermal*

Engineering. 2019. Т. 163. С. 114385.

31. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС., 2002.
32. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. ИНФРА-М, 2012.
33. Каган А.М. и др. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Отечество, 2013.
34. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Комплексная оценка тепломассообменных и энергетических характеристик контактных устройств // Надежность и безопасность энергетики. Общество с ограниченной ответственностью НПО Энергобезопасность, 2014. № 4. С. 50–54.
35. Пушинов А.С. и др. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена // Химическая технология. Общество с ограниченной ответственностью "Наука и технологии", 2014. Т. 15, № 4. С. 244–250.
36. Шараров В.И. Подготовка подпиточной воды систем теплоснабжения с применением вакуумных деаэраторов. Энергоатомиздат, 1996.
37. Шараров В.И., Озерова С.Л. Совершенствование физико-химических методов противокоррозионной обработки подпиточной воды систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 1989. № 6. С. 34.
38. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. Энергоатомиздат, 1998.
39. Макаров А.В. и др. Устройство предотвращения льдообразования в вентиляторной градирне. 2019.
40. Лаптев А.Г., Ведыгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен. 2004.
41. Бринь А.А., Петручик А.И. Тепловой расчет эжекционной градирни и способ повышения ее эффективности // Инженерно-физический журнал. Институт тепло-и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, 2011. Т. 84, № 2. С. 270–273.

42. Monjurul Ehsan M. и др. Design and comparison of direct and indirect cooling system for 25 MW solar power plant operated with supercritical CO₂ cycle // *Energy Conversion and Management*. 2018. Т. 168. С. 611–628.
43. Sadafi M.H. и др. An investigation on spray cooling using saline water with experimental verification // *Energy Conversion and Management*. 2016. Т. 108. С. 336–347.
44. Lefebvre A.H., McDonell V.G. *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
45. Фарахов Т.М., Башаров М.М., Шигапов И.М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных теплообменных насадок // *Сетевое издание Нефтегазовое дело*. 2011. № 2. С. 192–207.
46. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Эффективность тепло- и массоотдачи в насадочных слоях // *Фундаментальные исследования*, 2015. № 11–2. С. 278–282.
47. Wang X., Han Z., Su W. Numerical study of the impact on high-pressure and evaporating spray behavior of nozzle cavitation at typical diesel engine conditions // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017. Т. 81. С. 175–182.
48. Alavi S.R., Rahmati M. Experimental investigation on thermal performance of natural draft wet cooling towers employing an innovative wind-creator setup // *Energy Conversion and Management*. 2016. Т. 122. С. 504–514.
49. Mondal P.K. и др. Investigation of the crosswind-influenced thermal performance of a natural draft counterflow cooling tower // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Т. 85. С. 1049–1057.
50. Sadafi M.H. и др. Numerical and experimental study on a single cone saline water spray in a wind tunnel // *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Т. 120. С. 190–202.
51. Fisenko S.P., Brin A.A., Petrushik A.I. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Т. 47, № 1. С. 165–177.
52. Miliauskas G. и др. The defining factors of the phase change cycle of water

droplets that are warming in humid gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. T. 113. C. 683–703.

53. Huang X. и др. Evaporation aided improvement for cooling performance of large scale natural draft dry cooling system // *Applied Thermal Engineering*. 2019. T. 163. C. 114350.

54. Sun Y. и др. Investigation on the influence of injection direction on the spray cooling performance in natural draft dry cooling tower // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. T. 110. C. 113–131.

55. Guildenbecher D.R., López-Rivera C., Sojka P.E. Secondary atomization // *Experiments in Fluids*. 2009. T. 46, № 3. C. 371.

56. Hsiang L.-P., Faeth G.M. Near-limit drop deformation and secondary breakup // *International Journal of Multiphase Flow*. 1992. T. 18, № 5. C. 635–652.

57. Arcoumanis C., Whitelaw D.S., Whitelaw J.H. Breakup of droplets of Newtonian and non-Newtonian fluids // *Atomization and Sprays*. Begel House Inc., 1996. T. 6, № 3.

58. AlZahrani A.A., Dincer I. Modeling of n-Hexane and n-Octane liquid fuel jets in gaseous crossflow for evaporation, combustion and breakup evaluation // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017. T. 88. C. 203–210.

59. Brenn G., Valkovska D., Danov K.D. The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions // *Physics of Fluids*. 2001. T. 13, № 9. C. 2463–2477.

60. Pischke P. Modeling of collisional transport processes in spray dynamics. 2014.

61. Tjahjadi M., Stone H.A., Ottino J.M. Satellite and subsatellite formation in capillary breakup // *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 1992. T. 243. C. 297–317.

62. Breitenbach J. и др. Characterization of secondary droplets during thermal atomization regime // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. T. 98. C. 516–522.

63. Marengo M. и др. Drop collisions with simple and complex surfaces // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2011. T. 16, № 4. C. 292–302.

64. Cao X.-K. и др. A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow // *Physics of Fluids*. AIP, 2007. Т. 19, № 5. С. 57103.
65. Lee C.H., Reitz R.D. An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream // *International Journal of Multiphase Flow*. 2000. Т. 26, № 2. С. 229–244.
66. Avulapati M.M. и др. Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets // *Fuel*. 2019. Т. 239. С. 1284–1292.
67. Tarlet D., Allouis C., Bellettre J. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion // *International Journal of Thermal Sciences*. Elsevier Masson, 2016. Т. 107. С. 179–183.
68. Sazhin S.S. и др. Models for droplet transient heating: Effects on droplet evaporation, ignition, and break-up // *International Journal of Thermal Sciences*. Elsevier Masson, 2005. Т. 44, № 7. С. 610–622.
69. Krishnan K.G., Loth E. Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2015. Т. 77. С. 171–186.
70. Post S.L., Abraham J. Modeling the outcome of drop–drop collisions in Diesel sprays // *International Journal of Multiphase Flow*. 2002. Т. 28, № 6. С. 997–1019.
71. Li X. и др. Multiscale descriptions of particle-droplet interactions in multiphase spray processing // *International Journal of Multiphase Flow*. 2016. Т. 80. С. 15–28.
72. Kuznetsov G. V и др. Effect of the Angular and Linear Parameters of Interaction of Water Droplets of Various Shapes on the Characteristics of Their Collisions // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Т. 60, № 4. С. 650–660.
73. Shlegel N.E., Ya S., Strizhak P.A. Experimental research into the characteristics of child droplets formed due to collisions of liquid fragments in a gas // *Powder Technology*. 2019.
74. Piskunov M. V и др. Experimental research into collisions of homogeneous and multi-component liquid droplets // *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. Т. 150. С. 84–98.

75. Shlegel' N.E., Strizhak P.A. Characteristics of "Bounce" of Interacting Water Droplets // *Technical Physics*. 2019. T. 64, № 6. C. 796–801.
76. Li Y., Ning Z., Lü M. Experimental study on fusion and break-up motion after droplet collision // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019.
77. Wang F.-C., Feng J.-T., Zhao Y.-P. The head-on colliding process of binary liquid droplets at low velocity: High-speed photography experiments and modeling // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. T. 326, № 1. C. 196–200.
78. Zhao H. и др. Interaction of two drops in the bag breakup regime by a continuous air jet // *Fuel*. 2019. T. 236. C. 843–850.
79. Taskiran O.O., Ergeneman M. Trajectory based droplet collision model for spray modeling // *Fuel*. 2014. T. 115. C. 896–900.
80. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone // *Fire Safety Journal*. 2014. T. 70.
81. Almohammed N., Breuer M. Towards a deterministic composite collision outcome model for surface-tension dominated droplets // *International Journal of Multiphase Flow*. 2019. T. 110. C. 1–17.
82. Gu X., Basu S., Kumar R. Correlations of vaporization performance of conventional and biofuel sprays in a crossflow heated chamber // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2012. T. 39, № 10. C. 1478–1486.
83. Finotello G. и др. The dynamics of milk droplet–droplet collisions // *Experiments in Fluids*. 2018. T. 59, № 1.
84. Zen T.-S., Chou F.-C., Ma J.-L. Ethanol drop impact on an inclined moving surface // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010. T. 37, № 8. C. 1025–1030.
85. Liang G. и др. Liquid sheet behaviors during a drop impact on wetted cylindrical surfaces // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. T. 54. C. 67–74.
86. Focke C. и др. Collision between high and low viscosity droplets: Direct

Numerical Simulations and experiments // *International Journal of Multiphase Flow*. 2013. T. 56. C. 81–92.

87. Sommerfeld M., Kuschel M. Modelling droplet collision outcomes for different substances and viscosities // *Experiments in Fluids*. 2016. T. 57, № 12. C. 187.

88. Planchette C., Lorenceau E., Brenn G. Liquid encapsulation by binary collisions of immiscible liquid drops // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. T. 365, № 1. C. 89–94.

89. Williams Y.O. и др. Modeling droplet coalescence kinetics in microfluidic devices using population balances // *Chemical Engineering Science*. 2019. T. 201. C. 475–483.

90. Acevedo-Malavé A., Loaiza N. Fluid mechanics calculations in physics of droplets – IV: Head-on and off-center numerical collisions of unequal-size drops // *Journal of Computational Multiphase Flows*. 2016. T. 8, № 3. C. 148–156.

91. Sadafi H., Jahn I., Hooman K. Heat Transfer in Saline Water Evaporative Cooling // *Heat Transfer Engineering*. Taylor & Francis, 2019. T. 40, № 5–6. C. 429–436.

92. Omidvar A., Mahdavi A., Mehryar R. A simulated study on the effect of water temperature on cooling efficiency of water mist fire extinguishers // *Journal of Thermal Engineering*. 2020. T. 6, № 4. C. 460–473.

93. Xiaomeng Z., Guangxuan L., Bo C. Improvement of water mist's fire-extinguishing efficiency with MC additive // *Fire Safety Journal*. 2006. T. 41, № 1. C. 39–45.

94. Jung S. и др. Experimental study of atomization patterns produced by the oblique collision of two viscoelastic liquid jets // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2011. T. 166, № 5–6. C. 297–306.

95. Sommerfeld M., Pasternak L. Advances in modelling of binary droplet collision outcomes in Sprays: A review of available knowledge // *International Journal of Multiphase Flow*. 2019. T. 117. C. 182–205.

96. Nikolopoulos N., Nikas K.-S., Bergeles G. A numerical investigation of central

- binary collision of droplets // *Computers & Fluids*. 2009. Т. 38, № 6. С. 1191–1202.
97. Nikolopoulos N. и др. The effect of Weber number on the central binary collision outcome between unequal-sized droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Т. 55, № 7. С. 2137–2150.
98. Collin A. и др. Numerical simulation of a water spray—Radiation attenuation related to spray dynamics // *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. Т. 46, № 9. С. 856–868.
99. Kanda Y. и др. Measurement of transient heat transfer in vicinity of gas–liquid interface using high-speed phase-shifting interferometer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017. Т. 89. С. 57–63.
100. Misyura S.Y., Volkov R.S., Filatova A.S. Interaction of two drops at different temperatures: The role of thermocapillary convection and surfactant // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. Т. 559. С. 275–283.
101. Shlegel N. и др. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019. Т. 108.
102. Донских Б.Д. и др. Перспективные методы определения капельного уноса углеводородов с установок низкотемпературной сепарации природного газа // *Вести газовой науки.*, 2012. № 3 (11). С. 265–281.
103. Воронцов М.А. и др. Методический подход к расчетному исследованию промышленной подготовки природного газа к транспорту по технологии низкотемпературной сепарации с применением турбодетандерных агрегатов // *Вести газовой науки.*, 2016. № 2 (26). С. 105–111.
104. Jin Y., Chen X.D. Entropy production during the drying process of milk droplets in an industrial spray dryer // *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. Т. 50, № 4. С. 615–625.
105. Süverkrüp R. и др. Collisions and coalescence in droplet streams for the production of freeze-dried powders // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2016. Т. 141. С. 443–449.

106. Gac J.M., Gradoń L. Lattice-Boltzmann modeling of collisions between droplets and particles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2014. Т. 441. С. 831–836.
107. Pawar S.K. и др. An experimental study of droplet-particle collisions // *Powder Technology*. 2016. Т. 300. С. 157–163.
108. Yang B., Chen S. Simulation of interaction between a freely moving solid particle and a freely moving liquid droplet by lattice Boltzmann method // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Т. 127. С. 474–484.
109. Василевский М.В., Росляк А.Т., Зыков Е.Г. Исследования батарейного сепаратора с циклонными элементами для очистки природного газа от примесей // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.*, 2002. Т. 305, № 8. С. 124–130.
110. Naveen P.T., Simhadri R.R., Ranjith S.K. Simultaneous Effect of Droplet Temperature and Surface Wettability on Single Drop Impact Dynamics // *Fluid Dynamics*. 2020. Т. 55, № 5. С. 640–652.
111. Li J. и др. Directional transport of high-temperature Janus droplets mediated by structural topography // *Nature Physics*. 2016. Т. 12, № 6. С. 606–612.
112. Caswell T.A. Dynamics of the vapor layer below a Leidenfrost drop // *Phys. Rev. E. American Physical Society*, 2014. Т. 90, № 1. С. 13014.
113. Zhang T. и др. High-Temperature Wetting Transition on Micro- and Nanostructured Surfaces // *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Т. 50, № 23. С. 5311–5314.
114. Vakarelski I.U. и др. Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces // *Nature*. 2012. Т. 489, № 7415. С. 274–277.
115. Aboud D.G.K., Kietzig A.M. Splashing Threshold of Oblique Droplet Impacts on Surfaces of Various Wettability // *Langmuir. American Chemical Society*, 2015. Т. 31, № 36. С. 10100–10111.
116. Banitabaei S.A., Amirfazli A. Droplet impact onto a solid sphere: Effect of wettability and impact velocity // *Physics of Fluids*. 2017. Т. 29, № 6. С. 62111.

117. Mitra S. и др. Interactions in droplet and particle system of near unity size ratio // *Chemical Engineering Science*. 2017. Т. 170. С. 154–175.
118. Mitra S. и др. On wetting characteristics of droplet on a spherical particle in film boiling regime // *Chemical Engineering Science*. Elsevier, 2016. Т. 149. С. 181–203.
119. Bird J.C. и др. Reducing the contact time of a bouncing drop // *Nature*. 2013. Т. 503, № 7476. С. 385–388.
120. Shen Y. и др. Approaching the theoretical contact time of a bouncing droplet on the rational macrostructured superhydrophobic surfaces // *Applied Physics Letters*. 2015. Т. 107, № 11. С. 111604.
121. Philippi J., Lagrée P.-Y., Antkowiak A. Drop impact on a solid surface: short-time self-similarity // *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2016. Т. 795. С. 96–135.
122. Richard D., Quéré D. Bouncing water drops // *Europhysics Letters* ({EPL}). {IOP} Publishing, 2000. Т. 50, № 6. С. 769–775.
123. Pasandideh- Fard M. и др. Capillary effects during droplet impact on a solid surface // *Physics of Fluids*. 1996. Т. 8, № 3. С. 650–659.
124. Seo D. и др. Dynamic heat transfer analysis of condensed droplets growing and coalescing on water repellent surfaces // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Т. 114. С. 934–943.
125. Yoon I., Shin S. Direct numerical simulation of droplet collision with stationary spherical particle: A comprehensive map of outcomes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. Т. 135. С. 103503.
126. Бахронов Х.Ш., Ганиева С.У. ХОД РАЗВИТИЯ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ // *Journal of Advances in Engineering Technology*., 2022. № 2. С. 33–38.
127. Загиров А.Н. УСТРОЙСТВА МОКРОЙ ОЧИСТКИ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ // РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ НАУКИ В ОБЩЕСТВЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ. 2022. С. 54–57.
128. Wu G. и др. Simulation on a three-dimensional collision of a moving droplet

- against a moving super-hydrophobic particle // *Powder Technology*. 2022. Т. 405. С. 117558.
129. Liu X., Zhang X., Min J. Maximum spreading of droplets impacting spherical surfaces // *Physics of Fluids*. AIP Publishing LLC, 2019. Т. 31, № 9. С. 92102.
130. Ye X. и др. Process simulation on atomization and evaporation of desulfurization wastewater and its application // *Powder Technology*. 2021. Т. 389. С. 178–188.
131. Ye X. и др. Simulation of desulphurization wastewater evaporation through flue gas // *Powder Technology*. 2020. Т. 361. С. 462–472.
132. Li Z. и др. Characteristics analysis and parameters optimization of desulfurization wastewater evaporation in a rotary spray drying tower // *Powder Technology*. 2022. Т. 399. С. 117211.
133. Fathinia F., Khiadani M., Al-Abdeli Y.M. Experimental and mathematical investigations of spray angle and droplet sizes of a flash evaporation desalination system // *Powder Technology*. 2019. Т. 355. С. 542–551.
134. Mitra S. и др. In-flight collision behaviour of droplets on a spherical particle falling under gravity. 2013.
135. Alba-Arroyo J.E., Caballero-Benitez S.F., Jáuregui R. Weber number and the outcome of binary collisions between quantum droplets // *Scientific Reports*. 2022. Т. 12, № 1. С. 18467.
136. Wu G., Chen S. Simulating spray coating processes by a three-dimensional lattice Boltzmann method-immersed boundary method approach // *Chemical Engineering Science*. 2022. Т. 263. С. 118091.
137. Shao L. и др. Normal collision between partially wetted particles by using direct numerical simulation // *Chemical Engineering Science*. Pergamon, 2022. Т. 247. С. 117090.
138. Kropotova S., Strizhak P. Collisions of liquid droplets in a gaseous medium under conditions of intense phase transformations: Review // *Energies*. 2021. Т. 14, № 19.
139. Qin C. и др. Experimental Study on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Influenced by Bubbles // *Energies*. 2018. Т. 11, № 3.

140. Buck B. и др. Dynamics of wet particle–wall collisions: Influence of wetting condition // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Т. 135. С. 21–29.
141. Mitra S. и др. Collision behaviour of a smaller particle into a larger stationary droplet // *Advanced Powder Technology*. 2015. Т. 26, № 1. С. 280–295.
142. Eijkelboom N.M. и др. Particle structure development during spray drying from a single droplet to pilot-scale perspective // *Journal of Food Engineering*. 2023. Т. 337. С. 111222.
143. Eijkelboom N.M. и др. Particle structure development during spray drying from a single droplet to pilot-scale perspective // *Journal of Food Engineering*. 2023. Т. 337. С. 111222.
144. Zbicinski I., Ciesielski K., Ge B. Mechanism of Particle Agglomeration for Single and Multi-Nozzle Atomization in Spray Drying: A Review // *Processes*. MDPI, 2022. Т. 10, № 4. С. 727.
145. Zheng Z., Huang Y. Investigation on the interaction among multi-sprays generated from pressure-swirl atomizers // *Atomization and Sprays*. 2017. Т. 27, № 6. С. 477 – 491.
146. Nuzzo M. и др. The morphology and internal composition of dried particles from whole milk—From single droplet to full scale drying // *Food Structure*. 2017. Т. 13. С. 35–44.
147. Wu G.(吴国强), Chen S.(陈胜). Simulating the collision of a moving droplet against a moving particle: Impact of Bond number, wettability, size ratio, and eccentricity // *Physics of Fluids*. 2021. Т. 33, № 9. С. 93313.
148. Malgarinos I., Nikolopoulos N., Gavaises M. A numerical study on droplet-particle collision dynamics // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016. Т. 61. С. 499–509.
149. Gac J.M., Gradoń L. Analytical investigation and numerical modeling of collisions between a droplet and a fiber // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2012. Т. 369, № 1. С. 419–425.
150. Тукмаков А.Л., Тукмакова Н.А. Динамика полидисперсной парокапельной

смеси с учетом дробления, коагуляции, испарения капель и конденсации пара // Теплофизика высоких температур., 2019. Т. 57, № 3. С. 437–445.

151. Бабаева Н.Ю. и др. Кинетические и электрические явления в газожидкостных системах // Теплофизика высоких температур. Российская академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и..., 2016. Т. 54, № 5. С. 792–816.

152. Смирнов Б.М. и др. Пузырьковый метод очистки воды // Теплофизика высоких температур., 2019. Т. 57, № 2. С. 316–319.

153. Okuyama K., Yoshida K. Dynamic behavior with rapid evaporation of an inkjet water droplet upon collision with a high-temperature solid above the limit of liquid superheat // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Т. 116. С. 994–1002.

154. Wang L. и др. Interface oscillation of droplets upon impact on a heated surface in the Leidenfrost state // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т. 148. С. 119116.

155. Strotos G. и др. Cooling effectiveness of droplets at low Weber numbers: Effect of temperature // International Journal of Thermal Sciences. 2013. Т. 72. С. 60–72.

156. Fujimoto H., Tong A.Y., Takuda H. Interaction phenomena of two water droplets successively impacting onto a solid surface // International Journal of Thermal Sciences. 2008. Т. 47, № 3. С. 229–236.

157. 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. Т. 220. С. 115639.

158. Tkachenko P.P. и др. Experimental study of miscibility of liquids in binary droplet collisions // Chemical Engineering Research and Design. 2021. Т. 168.

159. Gotaas C. и др. Effect of viscosity on droplet-droplet collision outcome: Experimental study and numerical comparison // Physics of Fluids. 2007. Т. 19, № 10. С. 102106.

160. Finotello G. и др. Effect of viscosity on droplet-droplet collisional interaction //

Physics of Fluids. 2017. T. 29, № 6. C. 67102.

161. Rabe C., Malet J., Feuillebois F. Experimental investigation of water droplet binary collisions and description of outcomes with a symmetric Weber number // Physics of Fluids. 2010. T. 22, № 4. C. 47101.

162. Pawar S.K. и др. The dynamics of milk droplet–droplet collisions // Powder Technology. 2016. T. 300. C. 157–163.

163. Volkov R.S., Strizhak P.A. Research of temperature fields and convection velocities in evaporating water droplets using Planar Laser-Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. T. 97.

164. Volkov R.S., Strizhak P.A. Planar laser-induced fluorescence diagnostics of water droplets heating and evaporation at high-temperature // Applied Thermal Engineering. Pergamon, 2017. T. 127. C. 141–156.

165. Huang K.-L., Pan K.-L., Josserand C. Pinching Dynamics and Satellite Droplet Formation in Symmetrical Droplet Collisions // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 2019. T. 123, № 23. C. 234502.

166. Al-Dirawi K.H., Bayly A.E. An experimental study of binary collisions of miscible droplets with non-identical viscosities // Experiments in Fluids. 2020. T. 61, № 2. C. 50.

167. Volkov R.S., Strizhak P.A. Motion of water droplets in the counter flow of high-temperature combustion products // Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung. 2018. T. 54, № 1. C. 193–207.

168. Voytkov I., Volkov R., Strizhak P. Reducing the flue gases temperature by individual droplets, aerosol, and large water batches // Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. T. 88. C. 301–316.

169. Shlegel N.E., Strizhak P.A., Volkov R.S. Collision Behavior of Heterogeneous Liquid Droplets // Microgravity Science and Technology. 2019. T. 31, № 5. C. 487–503.

170. 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. Т. 162. С. 200–211.

171. Antonov D. V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Applied Thermal Engineering. 2019.

172. Antonov D. V, Kuznetsov G. V, Strizhak P.A. Mathematical Simulation of the Heat and Mass Transfer in the Movement of Liquid Droplets in a Gas Medium Under the Conditions of their Intense Phase Transformations // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Т. 93, № 5. С. 1055–1076.

173. ГОСТ Р. 53708-2009 Нефтепродукты // Жидкости прозрачные и непрозрачные. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. 2010.

174. Drews A. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity) // Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition. 2008. С. 126-126–128.

175. Lunkenheimer K., Wantke K.D. On the applicability of the du Nouy (ring) tensiometer method for the determination of surface tensions of surfactant solutions // Journal of Colloid and Interface Science. 1978. Т. 66, № 3. С. 579–581.

176. Sharma R.K. и др. Accelerated thermal cycle and chemical stability testing of polyethylene glycol (PEG) 6000 for solar thermal energy storage // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016. Т. 147. С. 235–239.

177. Calvo E. и др. Dynamic surface tension, critical micelle concentration, and activity coefficients of aqueous solutions of nonyl phenol ethoxylates // Fluid Phase Equilibria. 2009. Т. 282, № 1. С. 14–19.

178. López Arbeloa F. и др. Photophysics of rhodamines. Molecular structure and solvent effects // Journal of Physical Chemistry. 1991. Т. 95, № 6. С. 2203–2208.

179. Saini K., Rathore R. Identification of volatile components of gel-pen inks through gas chromatography mass spectrometry // Forensic Chemistry. 2018. Т. 11. С. 98–102.

180. Kuznetsov G. V и др. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment // Applied Surface Science. 2019. Т. 469. С. 974–982.

181. Aguilar-Morales A.I. и др. Influence of processing parameters on surface texture homogeneity using Direct Laser Interference Patterning // *Optics & Laser Technology*. 2018. Т. 107. С. 216–227.
182. Pan K.-L. и др. Controlling droplet bouncing and coalescence with surfactant // *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2016. Т. 799. С. 603–636.
183. Kropotova S.S., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. The Effect of Impurities on Water Droplet Collision Regimes and Behavior // *Microgravity Science and Technology*. Springer, 2022. Т. 34, № 4. С. 1–16.
184. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Collision of water droplets with different initial temperatures // *Powder Technology*. 2020. Т. 367. С. 820–830.
185. Rebhun M., Engel G. Reuse of wastewater for industrial cooling systems // *Journal (Water Pollution Control Federation)*. JSTOR, 1988. С. 237–241.
186. Proner M.C. и др. Industrial Cooling Systems and Antibiofouling Strategies: A Comprehensive Review // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. ACS Publications, 2021. Т. 60, № 8. С. 3278–3294.
187. Islamova A.G. и др. Effect of surface roughness of solid particles on the regimes and outcomes of their collisions with liquid droplets // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2023. Т. 142. С. 110829.
188. Islamova A. и др. Effect of Liquid Properties on the Characteristics of Collisions between Droplets and Solid Particles // *Applied Sciences*. MDPI, 2022. Т. 12, № 21. С. 10747.
189. Volkov R.S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Т. 85. С. 1–11.
190. Demidovich A. V и др. The Impact of Single- and Multicomponent Liquid Drops on a Heated Wall: Child Droplets // *Applied Sciences*. 2020. Т. 10, № 3.
191. Islamova A., Tkachenko P., Strizhak P. Interaction of water droplets with pyrolyzing coal particles and tablets // *Defence Technology*. 2023. Т. 30. С. 1–12.
192. Misyura S.Y. и др. The effect of impurity particles on the forced convection

velocity in a drop // Powder Technology. 2020. Т. 362. С. 341–349.

193. Volkov R. и др. Convection velocities in droplets before and after their collisions // Physics of Fluids. 2024. Т. 36, № 1. С. 12001.

194. Tkachenko P.P., Vysokomornaya O. V, Strizhak P.A. Effect of concentration of droplets in an aerosol cloud on the number and outcomes of their collisions in a gas medium // Atomization and Sprays. Begel House Inc., 2021. Т. 31, № 8.

195. Fan X. и др. Experimental investigations of flow field and atomization field characteristics of pre-filming air-blast atomizers // Energies. MDPI AG, 2019. Т. 12, № 14.

196. Finotello G. и др. Droplet collisions of water and milk in a spray with Langevin turbulence dispersion // International Journal of Multiphase Flow. 2019. С. 154–167.

197. Zhang Z. и др. On the role of droplet bouncing in modeling impinging sprays under elevated pressures // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Т. 102. С. 657–668.

198. Kuznetsov G.V. и др. Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating // Applied Thermal Engineering. 2018. Т. 131.

199. Volkov R.S., Strizhak P.A. Using Planar Laser Induced Fluorescence and Micro Particle Image Velocimetry to study the heating of a droplet with different tracers and schemes of attaching it on a holder // International Journal of Thermal Sciences. 2021. Т. 159. С. 106603.

200. Tkachenko P.P., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Collisions between liquid droplets during the intersection of aerosol flows in a heated gas // Thermal Science and Engineering Progress. 2022. Т. 34. С. 101425.

201. Voitkov I.S., Kuznetsov G. V, Strizhak P.A. Studying gas temperature variation upon aerosol injection // Technical Physics Letters. 2017. Т. 43, № 3. С. 301–304.

202. Vysokomornaya O. V и др. Influence of the Concentration of Water Droplets in an Aerosol Cloud on the Characteristics of their Collisional Interaction // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Т. 93, № 2. С. 298–309.

203. Kuznetsov G. V, Strizhak P.A., Volkov R.S. Heat exchange of an evaporating water droplet in a high-temperature environment // *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. T. 150.
204. Raoult F. и др. CFD water spray model development and physical parameter study on the evaporative cooling // *Applied Thermal Engineering*. 2019. T. 149. С. 960–974.
205. Egorov R.I. и др. The propagation and ignition of the finely dispersed coal-water aerosol // *Fuel*. 2020. T. 263.
206. Tkachenko P.P. и др. Effect of gas pressure and temperature on the regimes of liquid droplet collisions // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. Begel House Inc., 2022. T. 10, № 1.
207. Weaver J.H., Frederikse H.P.R. *Crc handbook of chemistry and physics*. CRC Press Boca Raton, FL, 1977. T. 76.
208. Volkov R.S., Strizhak P.A. Planar laser-induced fluorescence diagnostics of water droplets heating and evaporation at high-temperature // *Applied Thermal Engineering*. 2017. T. 127.
209. 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. T. 170.
210. Antonov D. V, Strizhak P.A. Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow // *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. T. 146. С. 22–35.
211. Demidovich A. V и др. Interaction of Liquid Droplets in Gas and Vapor Flows // *Energies*. 2019. T. 12, № 22.
212. Wang Z. и др. Numerical studies on droplet impact to wettable solid boundary based on SPH method // *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*. 2017. T. 62, № 24. С. 2788–2795.
213. Tkachenko P.P., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Experimental research of liquid droplets colliding with solid particles in a gaseous medium // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. T. 177. С. 200–209.

214. Akhmetshin M.R., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Normalizing anthropogenic gas emissions from the combustion of industrial waste as part of fuel slurries // *Fuel*. 2022. T. 313. С. 122653.
215. Chen R.H., Chiu S.L., Lin T.H. On the collision behaviors of a diesel drop impinging on a hot surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier, 2007. T. 32, № 2. С. 587–595.
216. Dunand P. и др. Energy balance of droplets impinging onto a wall heated above the Leidenfrost temperature // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Elsevier, 2013. T. 44. С. 170–180.
217. Van Limbeek M.A.J. и др. Vapour cooling of poorly conducting hot substrates increases the dynamic Leidenfrost temperature // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Pergamon, 2016. T. 97. С. 101–109.
218. Zaytsev A.S. и др. Light-Induced Gasification of Fuels Prepared from Coal-Enrichment Wastes // *Coke and Chemistry*. 2018. T. 61, № 7.
219. Vershinina K., Nyashina G., Strizhak P. Lab-Scale Combustion of High-Moisture Fuels From Peat, Coal Waste and Milled Lignite // *Waste and Biomass Valorization*. 2021. T. 12, № 12. С. 6619–6634.
220. Sverchkov I., Chukaeva M., Matveeva V. Influence of preparation and combustion parameters of coal-water slurries on gas emission chemistry // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022.
221. Zhang T. и др. Flow of nitrous oxide in a venturi tube under conditions of a hybrid rocket motor // *FirePhysChem*. 2021. T. 1, № 4. С. 199–204.
222. Vaziri Naeen Nejad J., Kheradmand S. The effect of arrangement in multi-cyclone filters on performance and the uniformity of fluid and particle flow distribution // *Powder Technology*. 2022. T. 399. С. 117191.
223. Graham E.M. и др. Vertically installed Venturi tubes for wet-gas flow measurement: Possible improvements to ISO/TR 11583 to extend its range of applicability // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020. T. 74. С. 101757.
224. Xu S. и др. Experiment on flow dynamics and cavitation structure in an

- axisymmetric venturi tube based on x-t diagrams and proper orthogonal decomposition // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2022. Т. 136. С. 110648.
225. Zhang Z. и др. Experimental and numerical study of a gas cyclone with a central filter // *Particuology*. 2022. Т. 63. С. 47–59.
226. Murai Y. и др. Bubble fragmentation dynamics in a subsonic Venturi tube for the design of a compact microbubble generator // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. Т. 139. С. 103645.
227. Liu X., Lao L., Falcone G. A comprehensive assessment of correlations for two-phase flow through Venturi tubes // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Т. 78. С. 103323.
228. Hussain F. и др. CFD simulation of agglomeration and coalescence in spray dryer // *Chemical Engineering Science*. 2022. Т. 247.
229. Dalili A. и др. Coalescence and agglomeration of droplets sprayed on a substrate // *Atomization and Sprays*. Begell House Inc., 2017. Т. 27, № 1. С. 81–94.
230. Zheng W. и др. Wet gas measurements of long-throat Venturi Tube based on forced annular flow // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2021. Т. 81. С. 102037.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Основные публикации по теме диссертации

1. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Collisions between liquid droplets during the intersection of aerosol flows in a heated gas // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. T. 34. C. 101425.
2. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Interaction between droplets of solutions in a heated gaseous medium // *Powder Technology*. 2021. T. 390. C. 86-96.
3. Shlegel N. E., **Tkachenko P.**, Strizhak P. A. Collision of water droplets with different initial temperatures // *Powder Technology*. 2020. T. 367. C. 820–830.
4. **Tkachenko P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Collisions of water droplets in the high-temperature air // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. T. 170. C. 121011.
5. Islamova A. G., **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Effect of surface roughness of solid particles on the regimes and outcomes of their collisions with liquid droplets // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2023. T. 142. C. 110829.
6. Islamova A. G., **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Kuznetsov G. V. Effect of Liquid Properties on the Characteristics of Collisions between Droplets and Solid Particles // *Applied Sciences*. 2022. T. 12. C. 10747.
7. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. The transition boundaries between interaction regimes of liquid droplets colliding in a gas // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. T. 179. C. 201–226.
8. Kropotova S. S., **Tkachenko P. P.**, Strizhak P. A. The Effect of Impurities on Water Droplet Collision Regimes and Behavior // *Microgravity Science and Technology*. 2022. T. 34. C. 54.
9. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Collisions of Two-Phase Liquid Droplets in a Heated Gas Medium // *Entropy*. 2021. T. 23. C. 1476.
10. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Experimental research of liquid droplets colliding with solid particles in a gaseous medium // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. T. 177. C. 200–209.
11. Islamova A., **Tkachenko P.**, Strizhak P. Interaction of water droplets with pyrolyzing coal particles and tablets // *Defense Technologies*. 2023. T. 30. C. 1–12.

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

1. V Международный молодёжный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2017 г.
2. XXII Международный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2018 г.
3. XXII Международный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2019 г.
4. XXII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке», г. Томск, 2020 г.
5. IX Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2020 г.
6. III Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики», г. Москва, 2020 г.
7. XXXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности», г. Балашиха, 2020 г.
8. IX Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2020 г.
9. XV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.», г. Новосибирск, 2021 г.
10. XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2021 г.
11. XXIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках", г. Екатеринбург, 2021 г.

12. VIII Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках», г. Москва, 2021 г.

13. IV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ», г. Кемерово, 2021 г.

14. Всероссийская конференция с международным участием и элементами научной школы для молодых учёных «XXXVII Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2021 г.

15. Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022», г. Иваново, 2022 г.

16. XXVI Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям, г. Санкт-Петербург, 2022 г.

17. Всероссийская конференция с международным участием и элементами научной школы для молодых учёных «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2022 г.

18. Восьмая Российская национальная конференция по теплообмену, г. Москва, 2022 г.

19. Научно-практическая конференция молодых специалистов Уренгойского газопромыслового управления, посвященная 45-летию с даты образования ООО «Газпром добыча Уренгой», г. Новый Уренгой, 2023 г.

20. I Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика», г. Красноярск, 2023 г.

21. XXIV школа семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященная 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Казань, 2023 г.

22. Всероссийская конференция с международным участием и элементами научной школы для молодых учёных «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Заявки на патенты РФ

1. Стрижак П.А., Ткаченко П.П. Способ получения композиционного топлива.
2. Ткаченко П.П., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е. Способ измельчения капель топлива.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Перечень проектов, в рамках которых получены
результаты диссертационных исследований**

1. Проекты РНФ № 18-71-10002, № 18-71-10002-П «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах».
2. Проект РНФ № 18-19-00056 «Подавление пламенного горения и термического разложения конденсированных веществ на больших площадях при специализированной подаче воды перед и во фронте горения».
3. Проект РНФ № 21-71-10008 «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах».

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Материалы об использовании результатов
диссертационных исследований**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и

стратегическим проектам

Национального исследовательского

Томского политехнического

университета, кандидат физико-

математических наук



Гоголев А.С.

2024 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Ткаченко Павла Петровича «Агломерирование и разделение компонентов суспензий при соударении капель жидкостей и твердых частиц в технологиях теплотехники» при выполнении научных проектов сотрудниками Национального исследовательского Томского политехнического университета

Результаты диссертационной работы Ткаченко Павла Петровича «Агломерирование и разделение компонентов суспензий при соударении капель жидкостей и твердых частиц в технологиях теплотехники», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при реализации научно-исследовательского проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках проектов: РНФ № 18-19-00056 «Подавление пламенного горения и термического разложения конденсированных веществ на больших площадях при специализированной подаче воды перед и во фронте горения»; РНФ № 18-71-10002, № 18-71-10002-П «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах»; РНФ № 21-71-10008 «Коагуляция, дробление и фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах». Полученные при выполнении диссертационного исследования результаты позволяют использовать их при оптимизации параметров тепловых технологических процессов и разработке оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах.

Руководитель проекта № 18-19-00056

д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ТПУ

Кузнецов Г.В.

Руководитель проектов № 18-71-10002,

№ 18-71-10002-П

д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ТПУ

Стрижак П.А.

Руководитель проекта № 21-71-10008

к.т.н., доцент ИШФВП ТПУ

Волков Р.С.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг»

Вершинин Р.А.

2024 г.



АКТ

О практическом использовании диссертационной работы
Ткаченко Павла Петровича

В результате рассмотрения материалов и результатов диссертационной работы Ткаченко П.П. «Агломерирование и разделение компонентов суспензий при соударении капель жидкостей и твердых частиц в энергетическом оборудовании», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, комиссией в составе: Дёмочка Денис Сергеевич - главный инженер, Сахаров Николай Константинович – заместитель главного инженера, был составлен настоящий акт, свидетельствующий о следующем:

- результаты диссертационной работы Ткаченко П.П. признаны актуальными, полезными с практической точки зрения для развития процессов подачи технологических жидкостей в тепломассообменное оборудование;
- полученные графические и аппроксимационные выражения использованы при выборе энергоэффективных режимов работы энергетического оборудования;
- сформулированные в диссертационной работе выводы могут быть использованы в виде практических рекомендаций субъектам топливно-энергетического комплекса по результатам экспериментальных и прикладных исследований ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг».

Члены комиссии:

 Д.С. Дёмочка
 Н.К. Сахаров

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИШЭ ТПУ

к.т.н., доцент

Матвеев А.С.

« 15 » 04 2021 г.

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы
Ткаченко Павла Петровича
«Экспериментальное исследование движения капель жидкостей в газовой
среде с разной температурой и влажностью» в образовательном процессе,
реализуемом сотрудниками Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики НИ ТПУ

Представленные в диссертационной работе аспиранта Ткаченко Павла Петровича результаты экспериментальных исследований особенностей движения капель жидкостей в средах с различными свойствами приняты к рассмотрению в качестве рекомендаций по усовершенствованию технологий формирования полидисперсных потоков различного состава.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что увеличение температуры жидкости и газовой среды, а также снижение поверхностного натяжения жидкости приводит к увеличению количества вторичных фрагментов. Таким образом с помощью вторичного дробления жидкости достигается дисперсность аэрозольного потока существенно отличающаяся от генерируемого форсуночными и распылительными устройствами.

Настоящий акт подтверждает, что выводы и практические рекомендации, приведенные в диссертационной работе аспиранта Ткаченко П.П., используются при разработке образовательных курсов с целью обучения студентов и магистрантов ресурсоэффективным технологиям распыления различных жидкостей в соответствующих камерах и установках. При разработке лекционных курсов и учебно-методических материалов для ведения дисциплин в рамках магистерских профилей автоматизации теплоэнергетических процессов и экологически чистых технологий использованы:

- данные о методах определения основных характеристик столкновения капель в газовых средах с различными параметрами с применением высокоскоростной видеорегистрации;
- экспериментальные стенды и методики для бесконтактной и высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов;

- данные о значениях предельных параметров столкновения капель (в безразмерном виде) для генерирования капельного потока с необходимыми параметрами.

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

Тайрашова Т.С.
Заворин А.С.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШЭ

к.т.н., доцент

А.С. Матвеев
« 08 » 04 2021 г.



Методические указания к выполнению лабораторных работ по
дисциплине
«МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»
для магистрантов направления «Теплоэнергетика и теплотехника»

Томск 2021

УДК 621.1.002 – 05

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Методология экспериментальных исследований теплоэнергетических процессов» для магистрантов направления «Теплоэнергетика и теплотехника». – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – 31 с.

Составители:

профессор, д.ф.-м.н. Стрижак П.А.; Шлегель Н.Е., Ткаченко П.П.

Рецензент:

к.т.н. Волков Р.С.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром НОЦ И.Н. Бутакова

« 03 » 02 2021 г. ~5

Руководитель научно-образовательного
центра И.Н. Бутакова, д.т.н., профессор

 А.С. Заворин

Оглавление

Общие сведения	4
1. Лабораторная работа 1. Высокоскоростная видеорегистрация быстропротекающих процессов	5
1.1. Введение	5
1.2. Экспериментальный стенд и методы исследований.....	5
1.3. Определение масштабного коэффициента	8
1.4. Обработка данных.....	8
1.5. Структура отчета о выполнении лабораторной работы	11
1.6. Контрольные вопросы	12
Приложение 1.1	13
Приложение 1.2.....	13
2. Лабораторная работа 2. Определение основных характеристик столкновения капель с применением высокоскоростной видеорегистрации	15
2.1. Экспериментальный стенд и методы исследований.....	15
2.2. Определение масштабного коэффициента	18
2.3. Структура отчета о выполнении лабораторной работы	20
2.4. Контрольные вопросы	21
Приложение 2.1.....	21
3. Лабораторная работа 3. Высокоскоростная видеорегистрация процессов столкновения капель с твердой стенкой	23
3.1. Введение	23
3.2. Экспериментальный стенд и методы исследований.....	23
3.3. Обработка данных.....	27
3.4. Структура отчета о выполнении лабораторной работы	30
3.5. Контрольные вопросы	30
Приложение 3.1	31