

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Ткаченко Павел Петрович

**АГЛОМЕРИРОВАНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ
СУСПЕНЗИЙ ПРИ СОУДАРЕНИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ И
ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ТЕХНОЛОГИЯХ ТЕПЛОТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Томск – 2024

Работа выполнена в Научно-образовательном центре И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор, заведующий лабораторией теплопереноса

Официальные оппоненты:

Пахомов Максим Александрович

доктор физико-математических наук, профессор РАН, ФГБУН «Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН», Главный научный сотрудник

Корценштейн Наум Моисеевич

доктор технических наук, ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН», Ведущий научный сотрудник

Защита состоится 29 мая 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «__» апреля 2024 года

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.18
Табакаев Роман Борисович
кандидат технических наук

A handwritten signature in blue ink, located to the right of the text identifying the secretary of the dissertation council.

Общая характеристика работы

Актуальность тематики исследования.

Изучению вопросов интенсификации тепломассообменных и физико-химических процессов и фазовых превращений посвящено большое количество работ российских и зарубежных исследователей. Область практического применения газопарокапельных смесей включает борьбу с природными и техногенными пожарами, интенсификацию процессов в химической и нефтяной промышленности, повышение эффективности тепломассообменного оборудования и др. Большой интерес вызывает применение многокомпонентных смесей в системах впрыска топлива в двигателях и котельных агрегатах. В условиях ограниченности водных ресурсов актуальны задачи термической очистки жидкостей. В теплоэнергетике соответствующие процессы протекают в градирнях, деаэраторах, смешивающих подогревателях, испарителях, гравитационных и гидравлических классификаторах, пылеулавливающих установках и других тепломассообменных аппаратах. Незученными в полной мере остаются режимы, условия и характеристики взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц в теплотехнических технологиях. Они представляют значительный интерес для решения задач интенсификации процессов тепломассопереноса и фазовых превращений. Наиболее существенный вклад в изучение вторичного измельчения капель жидкостей и закономерностей их взаимодействия с твердыми телами (частицами, стенками, решетками и др.) внесли: Алексеенко С.В., Антонов Д.В., Архипов В.А., Бойко В.М., Васенин И.П., Войтков И.С., Волков Р.С., Дулин В.М., Исаев С.А., Кабов О.А., Корценштейн Н.М., Кузнецов В.В., Кузнецов Г.В., Кузма-Кичта Ю.А., Лапин Д.А., Мальцев Л.И., Мисюра С.Я., Нигматулин Р.И., Пахомов М.А., Поплавский С.В., Ратанов Г.С., Сажин С.С., Стрижак П.А., Трофимов В.Ф., Усанина А.С., Al-Dirawi K.H., Ashgriz N., Belletré J., Finotello G., Jang H., Krishnan K.G., Mitra S., Orme M., Pasternak L., Pawar S.K., Planchette K., Sommerfeld M., Wu J., Zhao H. и др.

Взаимодействие капель и частиц позволяет существенно менять дисперсность газопарокапельных потоков и, как следствие, варьировать условия и характеристики тепломассообменных процессов. Пока не установлены в полной мере интегральные характеристики соответствующих процессов в энергетических установках. Как следствие, пока не разработаны технологии приготовления газопарокапельных потоков при раздельной подаче компонентов в составе струй, спреев, взвесей, аэрозольных облаков и др. Изучение агломерирования и разделения компонентов суспензий при соударении капель и частиц в технологиях теплотехники представляет значительный интерес для решения задач интенсификации процессов тепломассопереноса в системах и установках, использующих тепло, оптимизации параметров тепловых технологических процессов, разработки схем установок с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества производимой продукции. Это мотивировало настоящее исследование.

Цель диссертационной работы – определение характеристик и условий агломерирования и разделения компонентов суспензий при соударении капель и частиц в технологиях теплотехники для решения задач интенсификации процессов тепломассопереноса и фазовых превращений в тепломассообменном оборудовании.

Для достижения поставленной цели решались задачи:

1. Разработка экспериментальных методик, создание стендов, планирование и проведение исследований взаимодействия движущихся капель жидкостей и твердых частиц в газозооной среде с учетом влияния условий, соответствующих тепломассообменному оборудованию.

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 раздельной 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 соударности соударений капель и частиц.

Практическая значимость. 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 градилен, 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 исследованиями других авторов.

Связь работы с научными 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 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 при подготовке 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 устойчивого 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 конференциях: 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), 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 (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. Запатентован способ получения композиционного топлива, а также подана заявка на патентование установки для тестирования систем вторичного измельчения капель топлив.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 238 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков, 12 таблиц, 5 приложений. Библиография включает 230 наименований.

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 процессов взаимодействия движущихся капель жидкостей и твердых частиц в газовой среде с различными значениями температуры,

давления и влажности. Приведено описание основных направлений изучения процессов движения капель и жидкостных массивов, взаимодействия капель между собой, 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). Сформулировано заключение об отсутствии результатов экспериментального определения их синергетического влияния на характеристики движения капель жидкостей в газовой среде и их вторичного дробления. Выделены системы, для которых в энергетических приложениях характерны интенсивные взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц. Показано, что данные процессы могут существенно менять характеристики и режимы работы теплообменного и испарительного оборудования.

Во второй главе приведено описание разработанных автором диссертации экспериментальных стендов и методик исследований, а также методов оценки погрешностей результатов измерений. Выполнено сравнение результатов исследований и разработанных стендов с известными данными других авторов для обоснования адекватности используемых методик исследований. В качестве исследуемых жидкостей использовались составы (таблица 1), соответствующие по свойствам применяемым в теплоэнергетических газопарокапельных приложениях.

Таблица 1. Свойства использованных в экспериментах жидкостей.

№	Наименование состава	Начальная температура T , °С	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , мН/м	Динамическая вязкость μ , мПа·с
1	Дистиллированная вода	20	998	72,7	1,0
2	Минеральная вода №1 (минерализация 4–7 г/л)	20	1002–1005	74	1,0
3	Минеральная вода №1 (минерализация 12–18,5 г/л)	20	1010–1016,5	76,5	1,0
4	Раствор Твин-80, 0,5 %	20	998	47,4	1,0
5	Раствор Твин-20, 0,5 %	20	998	40,1	1,0
6	Раствор Неонола АФ9-12, 0,5 %	20	998	36,0	1,0
7	Раствор глицерина, 10 %	20	1022	71,4	1,0
8	Раствор глицерина, 25 %	20	1060	69,4	2,2
9	Раствор глицерина, 50 %	20	1126	66,0	6,3
10	Раствор ПЭГ 6000, 20 %	20	1058	66,0	10,8

Для проведения экспериментов с бинарными столкновениями капель жидкостей при нормальных условиях применен стенд, представленный на рисунке 1. Капли генерировались с применением сменных сопел с различными внутренними диаметрами (0,51–1,12 мм). Используемые жидкости подавались в сопла из рабочих каналов, установленных в шприцевом насосе с поддержанием постоянного расхода 600–1200 мл/ч. Характеристики процесса соударения капель, содержащих твердые частицы, между собой регистрировались высокоскоростной видеокамерой Photron mini UX100.

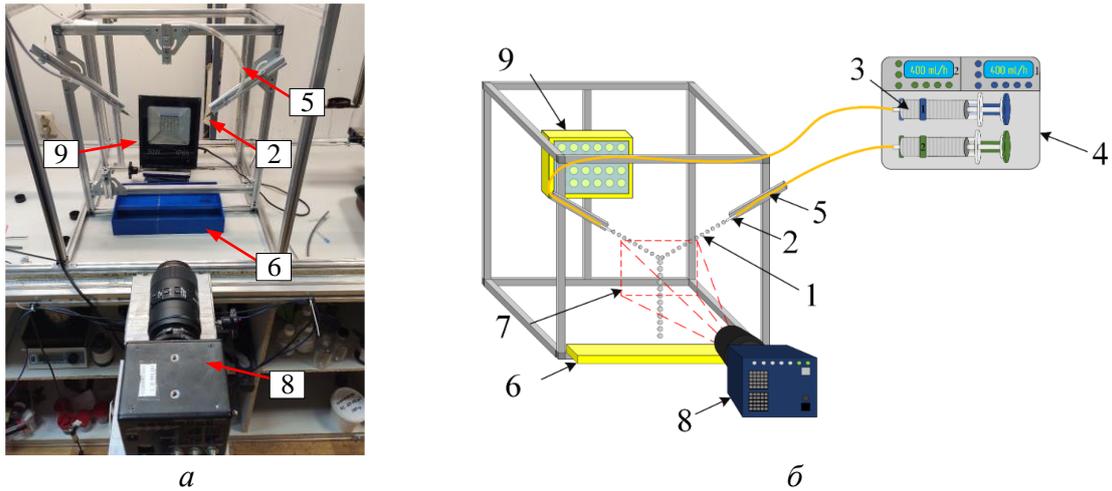


Рисунок 1. Внешний вид (а) и схема (б) стенда для изучения соударения капель и частиц в газозвушной среде при нормальных условиях: 1 – капли, содержащие твердые частицы; 2 – сменные сопла различного диаметра; 3 – шприц с жидкостью; 4 – шприцевой насос; 5 – силиконовые трубки; 6 – емкость для сбора жидкости; 7 – область регистрации; 8 – видеокамера; 9 – диодный прожектор.

При обработке результатов выделены четыре режима взаимодействия: отскок, коалесценция, разлет и дробление. В результате математической обработки экспериментальных данных получены выражения для описания границ режимов взаимодействия капель жидкостей и характеристик вторичных фрагментов.

Для проведения исследований при варьировании температуры газозвушной среды применен стенд с системой индукционного нагрева «ЭЛСИТ-40/20-70» (рисунок 2).

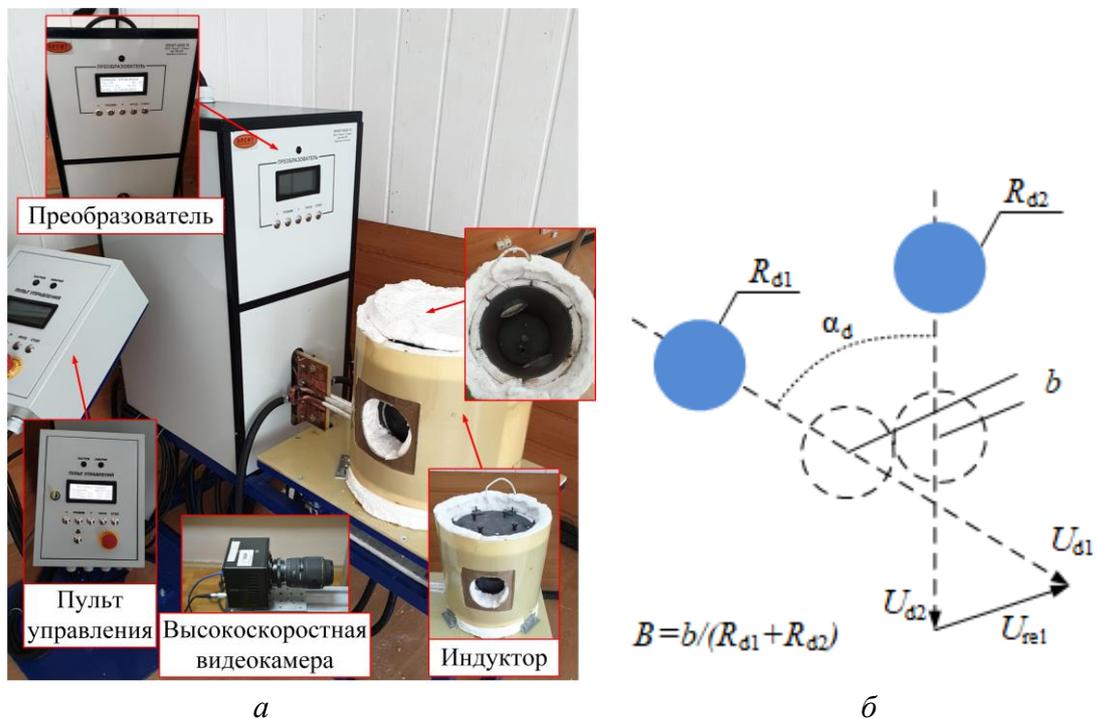


Рисунок 2 – Внешний вид стенда для изучения влияния температуры и влажности газозвушной среды на процессы бинарного столкновения капель (а) и схема бинарного столкновения капель (б).

При создании стенда основной задачей являлась видеорегистрация соударений капель в газовой среде с варьируемой температурой и влажностью. Для проведения исследований использовались сменные сопла генерации потока капель и полосовые форсунки. Форсунки располагались под углом 45° друг к другу в одной плоскости. С их помощью генерировался аэрозольный поток капель с углом раскрытия около 60° . Угол атаки (α_k) варьировался от 0 до 90° , радиусы капель (R_k) от $0,05$ до $0,6$ мм. Скорости движения капель (U_k) изменялись от 2 до 12 м/с, безразмерный линейный параметр взаимодействия (B) изменялся в пределах от 0 до 1 . Температура газовой среды (T_T) в цилиндре варьировалась в диапазоне 20 – 700 °С и снижалась после распыления воды на 10 – 50 °С.

При исследованиях процессов соударения аэрозольных потоков капель жидкостей с твердыми частицами применен стенд, представленный на рисунке 3. В состав стенда входила стальная камера прямоугольной формы, в которой распылялись твердые частицы и капли жидкости. Регистрация параметров их соударений проводилась через два смотровых окна. Первое использовалось для регистрации соударений при помощи высокоскоростной видеокамеры, а второе – для подсветки области регистрации. Соударения капель дистиллированной воды с твердыми частицами регистрировались видеокамерой Fastcam Mini UX100, обеспечившей разрешение съемки 1280×1024 пикс при скорости записи 5000 кадр/с и межкадровой задержке $1/25000$. При анализе видеоснимков высокоскоростной съемки регистрировались основные параметры процессов взаимодействия капель и частиц: радиус капель (R_k), радиус частиц ($R_{ч}$), скорость движения капель (U_k); скорость движения частиц ($U_{ч}$), угол между каплей и частицей (α_k) и расстояние между центрами масс частицы и капли (b). При построении режимных карт использовались следующие безразмерные параметры: числа Вебера (We), Онезорге (Oh), безразмерный линейный параметр (B).

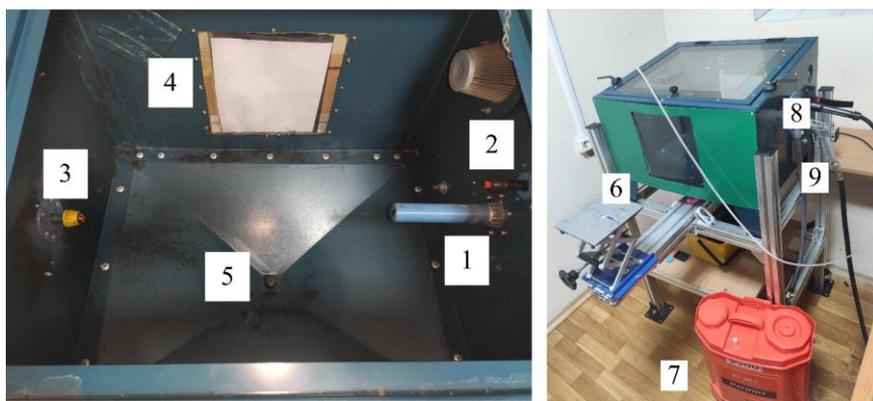


Рисунок 3 – Внешний вид стенда для изучения взаимодействия аэрозольных потоков и струй: 1 – форсунка для твердых частиц; 2, 3 – форсунка для жидкости; 4 – прожектор; 5 – камера соударений; 6 – окно для регистрации соударений; 7 – компрессор для распыления жидкости; 8 – клапан регулирования расхода жидкости; 9 – клапан регулирования расхода твердых частиц.

С целью соответствия энергетическим системам на базе композиционных жидких топлив в качестве материалов твердых частиц применялись угли разных марок: бурый (Б) (Назаровское месторождение, Красноярский край); слабо спекающийся (СС) (разрез Черниговский, Кемеровская область); тощий (Т) (разрез Калтанский, Кемеровская область). Также выбор этих марок углей связан с существенными различиями в свойствах

смачиваемости. Так, например, контактные углы для углей марок Т, СС и Б составили: 74,4°, 98,4° и 97,2°, соответственно. Размер частиц угля при их распылении составлял не менее 1 мм. Для достижения такого размера уголь измельчался на роторной мельнице Pulverisette 14, просеивался с помощью виброгрохота Analysette 18. Подача частиц в экспериментальную камеру (рисунок 3) осуществлялась при помощи компрессора. Варьирование скорости движения частиц реализовалось изменением давления подачи от 2 до 6 кгс/см².

Для наблюдения за перемещением межфазной границы сталкивающихся капель, а также определения продолжительности их полного смешения при коалесценции применялся стенд, представленный на рисунке 4. Использовался метод на основе Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) (Плоская лазерно-индуцированная флуоресценция). 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 В в жидкости составляла 1 мг/л. В другую емкость добавлялся растворимый краситель объемной концентрацией 0,5 %. Такая концентрация красителя позволила затемнить одну из капель и, как следствие, визуализировать смешивание жидкостей без существенного влияния на их свойства.

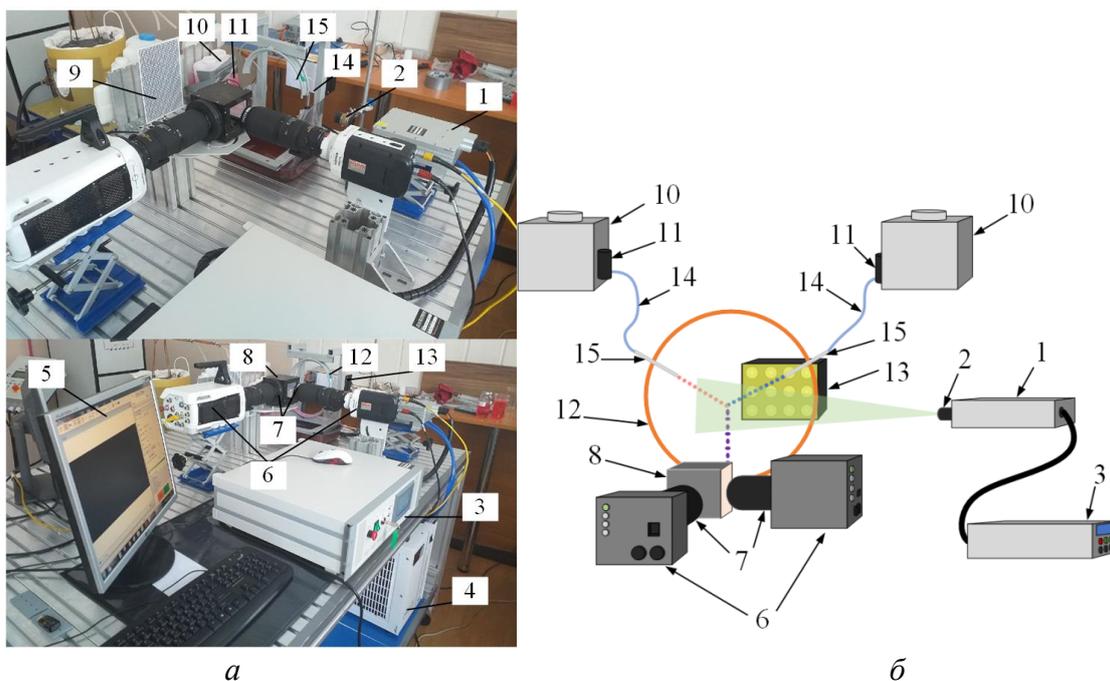


Рисунок 4 – Внешний вид (а) и схема (б) стенда для изучения закономерностей перемешивания компонентов в составе капель жидкостей: 1 – Nd:YAG лазер; 2 – лазерный коллиматор; 3 – пульт управления; 4 – блок охлаждения; 5 – компьютер; 6 – видеокамеры; 7 – макрообъективы со светофильтрами 600–10 нм и 530–10 нм; 8 – светоделитель; 9 – калибровочная мишень; 10 – емкость с жидкостью; 11 – насос; 12 – дисковый держатель сопел; 13 – источник света; 14 – капилляры; 15 – сопла.

Систематические погрешности измерения размеров капель определялись величиной масштабного коэффициента и составили 0,052 мм/пикс, скоростей движения – 0,061 м/с и углов атаки – 1,1°. Максимальное значение случайной погрешности измерения размеров капель составило 5,1 %, скоростей движения 4,1 %, углов атаки 3,1 %.

В третьей главе приведены результаты исследования движения капель жидкости в газовой среде с варьируемыми величинами температуры, давления и влажности. 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 энергетических системах, а также развитию сформулированных теоретических следствий. Выделены четыре режима столкновения капель (рисунок 5): отскок, коалесценция, разлет и дробление.

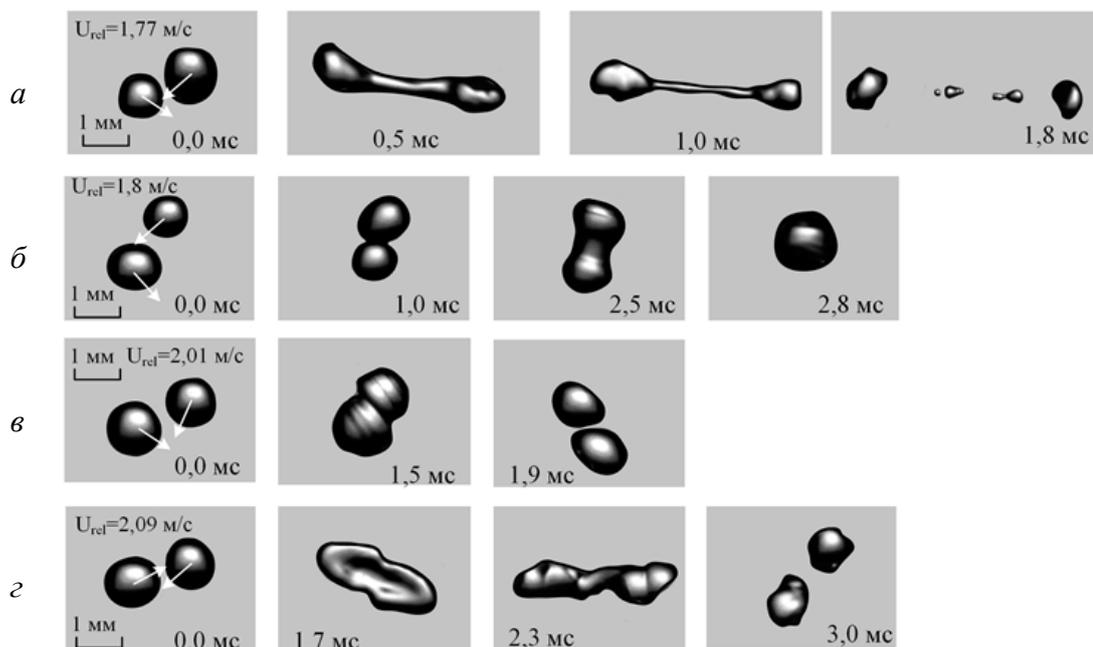


Рисунок 5 – Типичные видеокдры столкновения капель талой воды при $T_{ж}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$: а – дробление; б – коалесценция; в – отскок; г – разлет.

Отскок характеризовался упругим ударом капель, после которого они разлетались без формирования новых фрагментов и без разрушения поверхностной оболочки друг друга. При коалесценции капли после соударения сливались в одну и не распадалась 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 измельчение с образованием большой совокупности мелких вторичных фрагментов. Соответствующие режимы характерны теплообменным установкам смешивающего типа, в которых технологически необходимо использование аэрозольных потоков жидкостей.

На рисунке 6 представлена построенная по результатам экспериментов карта режимов взаимодействия капель воды с различным содержанием растворенных примесей. Представленные жидкости выбраны для моделирования процессов взаимодействия капель воды с различной степенью минерализации. 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.

На рисунке 6 выделены существенные отличия критических значений числа Вебера для реализации режима дробления у водопроводной и дистиллированной воды относительно данных для минеральной и талой воды. Даже при таких существенных расхождении критических значений We прослеживается общая динамика снижения значений числа Вебера с увеличением концентрации растворенных веществ в воде. Показано, что содержащие естественные примеси капли водопроводной воды начинают дробиться при $We = 55-120$ (в зависимости от значения B), для дистиллированной же воды дробление капель начинается в пределах диапазона $We = 70-140$.

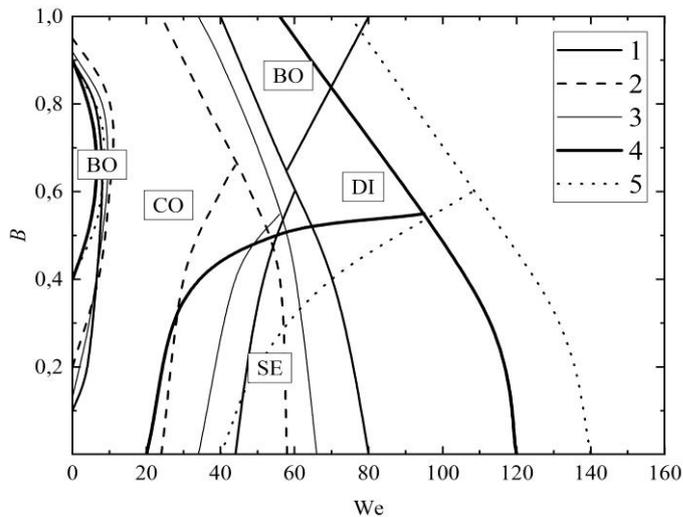


Рисунок 6 – Карта режимов столкновения капель в системе $B(We)$, BO – отскок, CO – коалесценция, SE – разлет, DI – дробление, $R_k = 0,8-1$ мм: 1 – талая вода; 2 – минеральная вода № 1; 3 – минеральная вода № 2; 4 – водопроводная вода; 5 – дистиллированная вода.

жидкости при коалесценции, дроблении и разлете капель. На рисунке 7 показаны видеограммы 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 отсутствие внешних возмущающих воздействий поля скорости не имеют ярко выраженных экстремумов. Основное влияние на скорости конвекции оказывает продолжение формирования сферической формы после отрыва жидкости от капельного дозатора и интенсификация течений посредством обдува капли встречным потоком воздуха при падении. После столкновения и разлета капель 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). Таким образом, на начальном этапе проведения экспериментов задача состояла в определении диапазонов изменения средних значений скоростей конвекции ($U_{конв}$) в свободно

С помощью комбинации высокоскоростной видеорегистрации и метода Particle Image Velocimetry с трассирующими частицами диоксида титана (TiO_2) изучены процессы смещения и перемешивания слоев

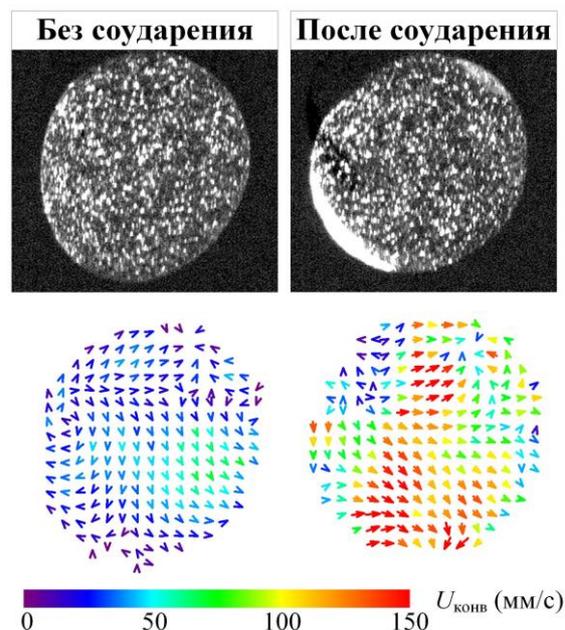


Рисунок 7 – Видеограммы капли и поля скорости конвекции в капле в отсутствие (слева) и после столкновения (справа).

падающей капле при варьировании определяющих параметров – радиуса и скорости движения капли.

На рисунке 8 приведены установленные зависимости вида $U_{\text{конв}} = f(We)$ для трех режимов соударения капель. Показаны дополнительные кривые, отражающие значения $U_{\text{конв}}$ для свободно падающей капли при тех же значениях We . Обосновано, что после соударения скорость конвекции возрастает в несколько раз по сравнению со свободно падающей каплей с теми же параметрами. Для оценки влияния бинарного соударения капель на скорости конвекции рассчитаны средние значения коэффициента $k_{\text{конв}}$ (отношение $U_{\text{конв}}$ капли, образовавшейся в результате столкновения, к $U_{\text{конв}}$ в капле при ее свободном падении). Средние значения $k_{\text{конв}}$ для различных режимов составили: DI – 8,65, SE – 10,05, CO – 10,46.

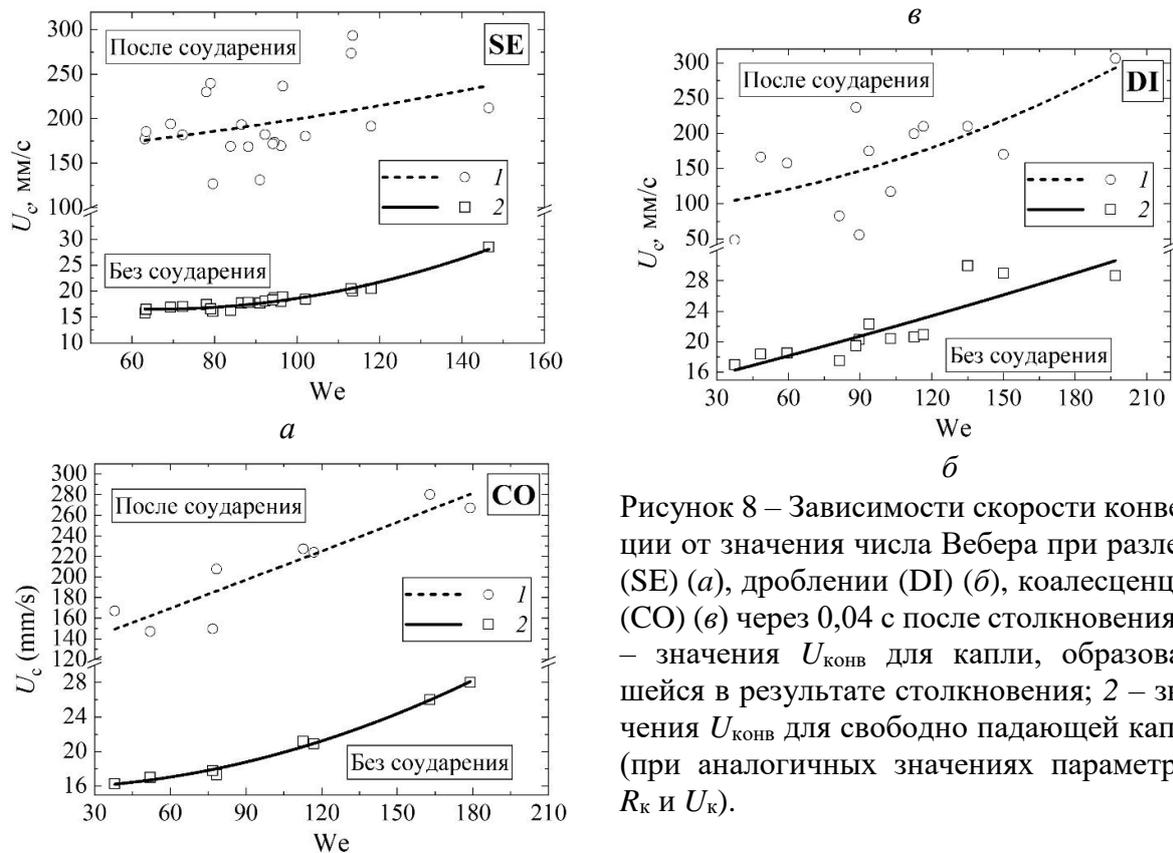


Рисунок 8 – Зависимости скорости конвекции от значения числа Вебера при разлете (SE) (а), дроблении (DI) (б), коалесценции (CO) (в) через 0,04 с после столкновения: 1 – значения $U_{\text{конв}}$ для капли, образовавшейся в результате столкновения; 2 – значения $U_{\text{конв}}$ для свободно падающей капли (при аналогичных значениях параметров R_k и U_k).

В промышленных газопарокапельных установках применяется аэрозольное распыление жидкости. Так как размеры капель и непосредственно созданного потока жидкости (принято называть факелом распыла) форсуночным устройством ограничены, то интерес представляет изучение процесса соударения капель в таком потоке. Зависимости значений отношения площади поверхности капель после (S_1) и до (S_0) соударения от значения числа Вебера при различной температуре приведены на рисунке 9. Зависимости разделены на три группы по соотношению размеров (Δ): $\Delta < 0,3$; $0,3 < \Delta < 0,7$; $\Delta > 0,7$. Для всех зависимостей с ростом We увеличивается значение S_1/S_0 . Максимальные величины S_1/S_0 установлены для температуры газовой среды $T_r = 400$ °C. При такой температуре капли успевают прогреться за время их движения, что приводит к снижению вязкости жидкости. Это позволяет добиться режима дробления при меньшей кинетической энергии капель, а, следовательно, и меньшей относительной скорости их движения.

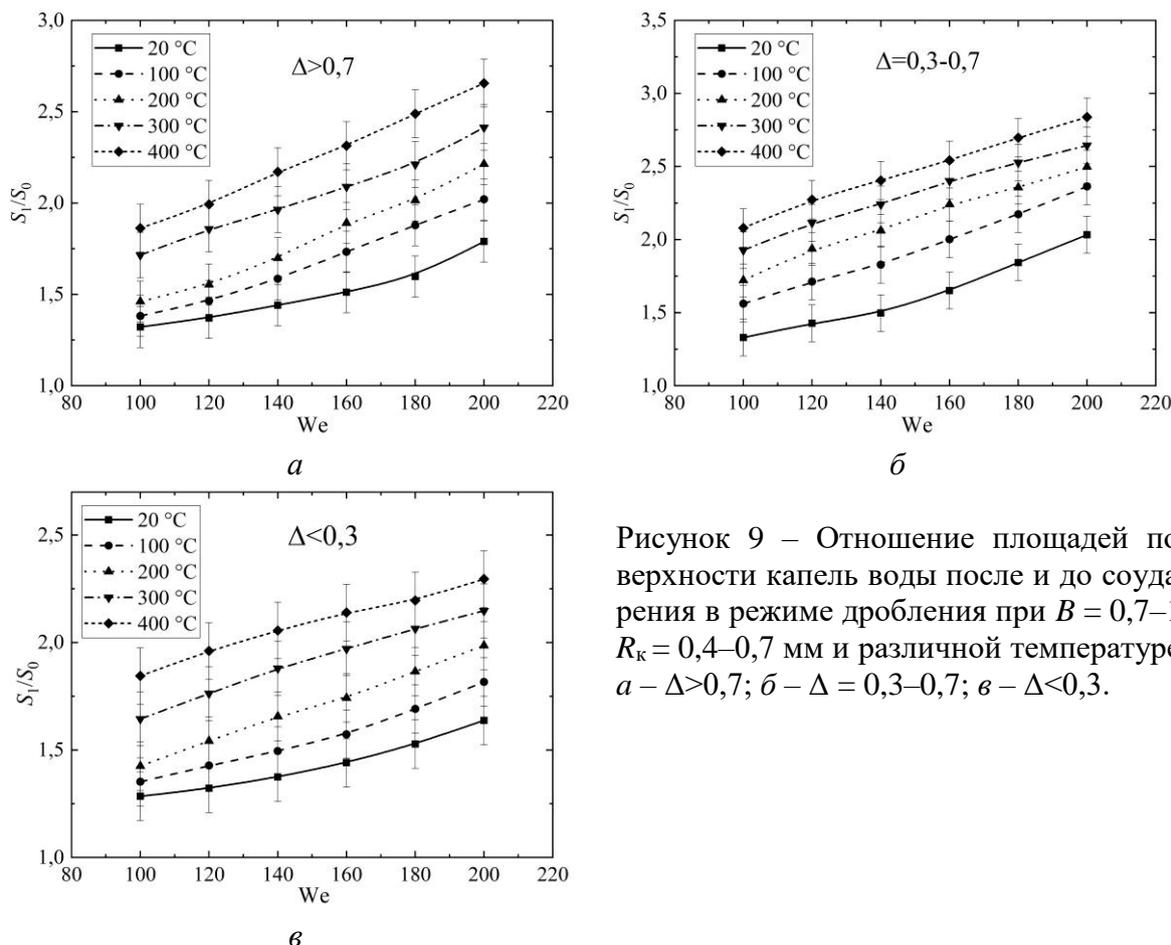


Рисунок 9 – Отношение площадей поверхности капле воды после и до соударения в режиме дробления при $B = 0,7-1$; $R_k = 0,4-0,7$ мм и различной температуре: $a - \Delta > 0,7$; $б - \Delta = 0,3-0,7$; $в - \Delta < 0,3$.

При варьировании значения числа Вебера от 100 до 200 отношения площадей поверхности капле 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 в диапазоне 1,9–2,1 при $T_r = 400$ °C. Скорость роста отношения площадей поверхности капле воды после и до взаимодействия изменялась в зависимости от значения числа Вебера. При столкновении капле часть кинетической энергии затрачивается на преодоление сил вязкого трения в жидкости. Изменение значения числа Вебера в основном связано с увеличением результирующей 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 9а). В этих условиях суммарный объем взаимодействующих капле жидкости максимальный. С ростом значения числа Вебера увеличивается суммарная кинетическая энергия сталкивающихся капле. Возрастающая суммарная энергия способствует более быстрому преодолению сил вязкости, что приводит к росту количества вторичных фрагментов и увеличивает суммарную площадь поверхности вторичных капле после дробления.

Вычисленные значения отношения площадей поверхности фрагментов жидкости после и до дробления капле при варьировании давления газовой среды (P_r) от 0,09 до 0,5 МПа при температуре 20, 100 и 200 °C приведены на рисунке 10. Условия проведения экспериментов характерны параметрам работы деаэраторов, сепараторов и другого теплоэнергетического оборудования. Для всего диапазона изменения температуры газовой среды обосновано увеличение значений S_1/S_0 с ростом значения числа Вебера. Это обусловлено повышением роли сил инерции, действующих на капле. Установлено, что с повышением давления газовой среды дробление капле про-

текало менее эффективно. При давлении газовой среды ниже атмосферного зарегистрирован прирост значений отношения S_1/S_0 . Площадь поверхности вторичных фрагментов после дробления при $P_r=0,3$ МПа (рисунок 10б) уменьшилась на 11–14 % относительно дробления при $P_r=0,1$ МПа. При $P_r=0,5$ МПа значение S_1/S_0 снизилось на 15–23 % относительно $P_r=0,1$ МПа (рисунок 10в). При давлении $P_r=0,09$ МПа площадь свободной поверхности вторичных фрагментов после дробления по сравнению с начальной увеличилась на 7–13 % относительно значений для $P_r=0,1$ МПа. С увеличением температуры общая тенденция не изменилась, т.е. с повышением давления газовой среды значение S_1/S_0 также снизилось. Относительно столкновений капель воды при $T_r=20$ °С и давлении $P_r=0,1$ МПа значения S_1/S_0 при повышении температуры газовой среды до 100 и 200 °С увеличились на 7–10 % и 10–16 %, соответственно. При $P_r=0,3$ МПа и нагреве газовой среды рост значений S_1/S_0 составил 5–8 % и 9–13 %, а при $P_r=0,5$ МПа значения S_1/S_0 увеличились на 4–8 % и 6–10 %.

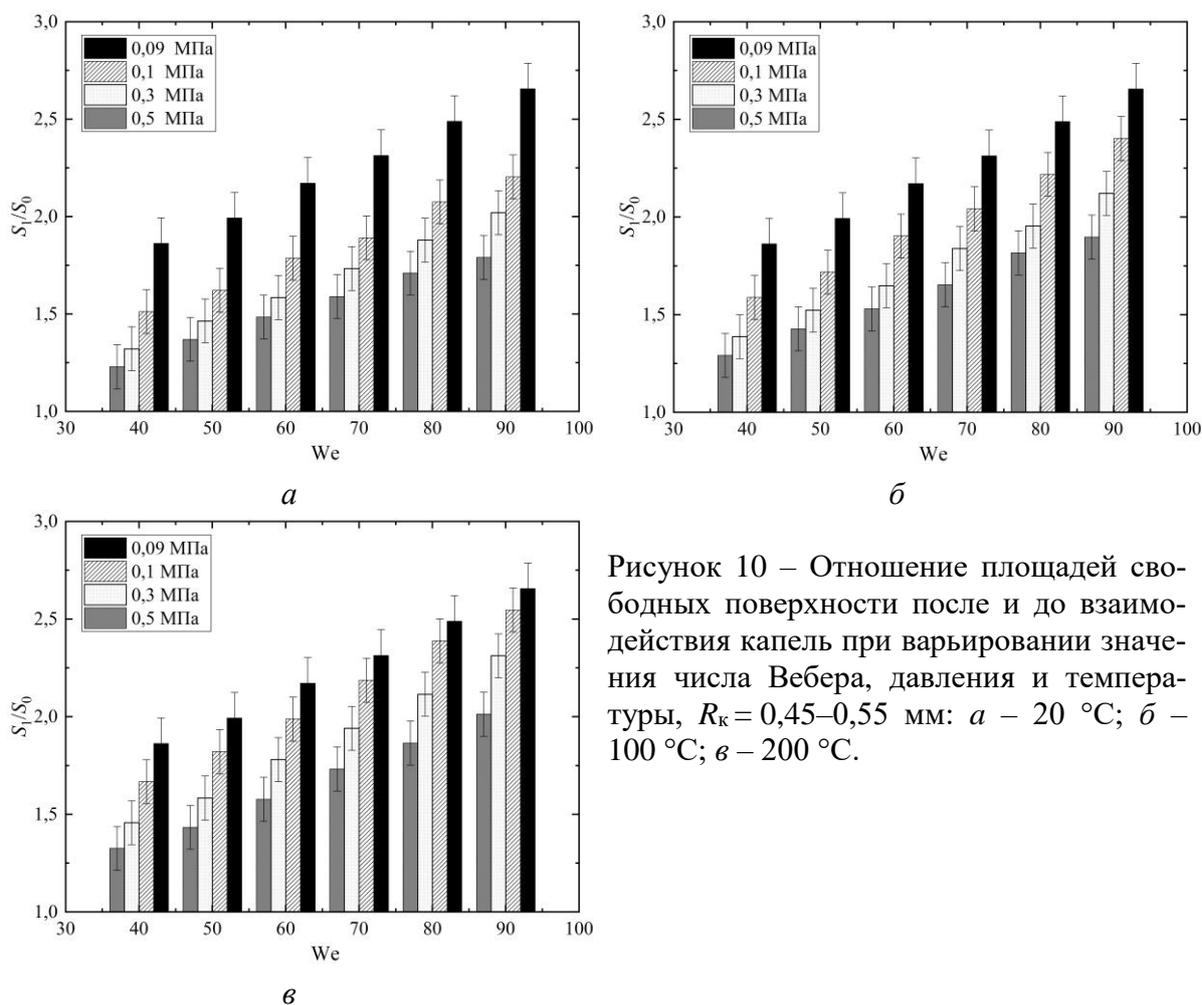


Рисунок 10 – Отношение площадей свободных поверхности после и до взаимодействия капель при варьировании значения числа Вебера, давления и температуры, $R_k=0,45–0,55$ мм: а – 20 °С; б – 100 °С; в – 200 °С.

Причиной снижения относительной эффективности дробления капель при одинаковых температурах (20, 100 и 200 °С) и повышении давления газовой среды стали возросшие внешние силы, действующие на поверхность фрагментов после дробления. Помимо того, что каплям приходилось преодолевать возросшее сопротивление перед столкновением. При дроблении жидкости на нее также оказывали влияние силы давления внешней газовой среды. Под воздействием повышенного давления рост

площади свободной поверхности вторичных фрагментов сдерживался, т.е. ограничивалась их трансформация относительно сферической формы и область разлета относительно зоны соударения становилась достаточно малой.

При анализе результатов проведенных экспериментов по соударению капель суспензии с твердыми кварцевыми частицами в аэрозольных потоках выделены два режима взаимодействия: агломерирование и дробление. Агломерирование регистрировалось при относительных скоростях движения менее 2 м/с. В таком случае частица песка оседала на поверхности капли суспензии, вторичные фрагменты не образовывались. С увеличением относительной скорости взаимодействия или же размеров капель и частиц происходил переход между режимами агломерирования и дробления. Режим дробления протекал с образованием нескольких вторичных фрагментов. Регулирование начальных параметров капель и твердых частиц при протекании выделенных режимов позволяет генерировать капли суспензий с требуемыми размерами, что является определяющим в работе установок по термической сушке. Режим дробления способствует измельчению капли суспензии, что приводит к снижению размера итоговых частиц, и, как следствие, уменьшению времени задержки зажигания топлив. Минимальный размер полученных фрагментов определяется дисперсностью помола твердой фракции.

На рисунке 11 приведены карта режимов соударений капель суспензии и твердых частиц песка в аэрозольных потоках, а также зависимости отношения площадей свободных поверхностей после и до их соударения от значения числа Вебера. 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. Снижение поверхностного натяжения жидкости приводит к снижению необходимой и достаточной для фрагментации относительной скорости. К тому же интенсификации фрагментации капли способствует наличие твердых частиц в ней.

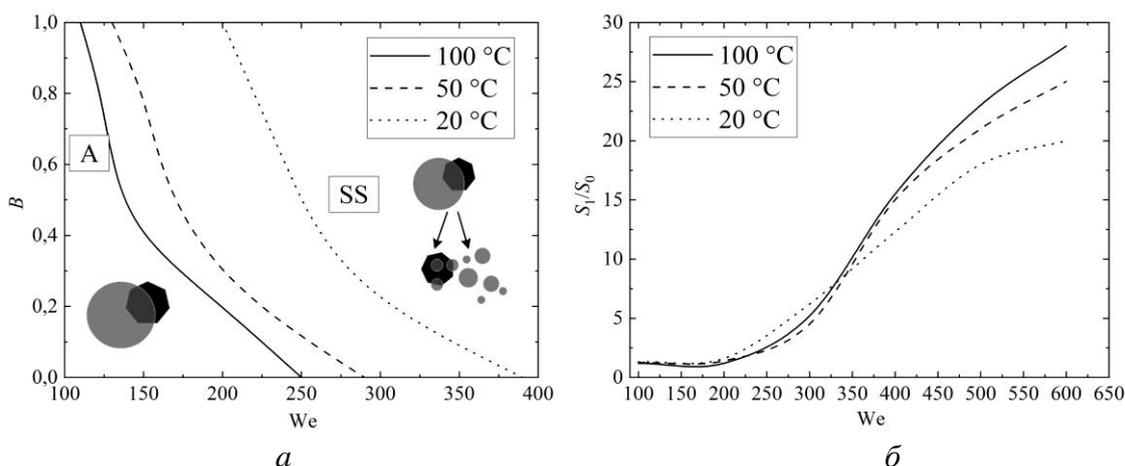


Рисунок 11 – Карта режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами (а) и зависимости отношения площадей свободных поверхностей после и до их соударения от значения числа Вебера (б) при варьировании температуры газовой среды; А – режим агломерирования, SS – режим разделения.

В опытах с понижением поверхностного натяжения жидкости в момент удара частицы разрывают приповерхностные слои капли изнутри вследствие преобладания инерционных сил над силами поверхностного натяжения. Такой эффект приводит к росту ко-

личества вторичных фрагментов при дроблении капли. Проведенные эксперименты показали, что повышение температуры газовой среды снижает и средний размер вторичных фрагментов после дробления капли. Это обусловлено интенсификацией фазовых превращений.

Для обобщения результатов исследования вторичного измельчения капель при соударении между собой построены карты режимов в координатах $We(Oh)$ (рисунок 12а). 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. На рисунке 12б представлены карты режимов при использовании критериев подобия Рейнольдса и капиллярности. Выделены диапазоны устойчивой реализации каждого из режимов взаимодействия. Установлено, что при высоких значениях Ca и Re происходила устойчивая реализация режима разделения растяжением.

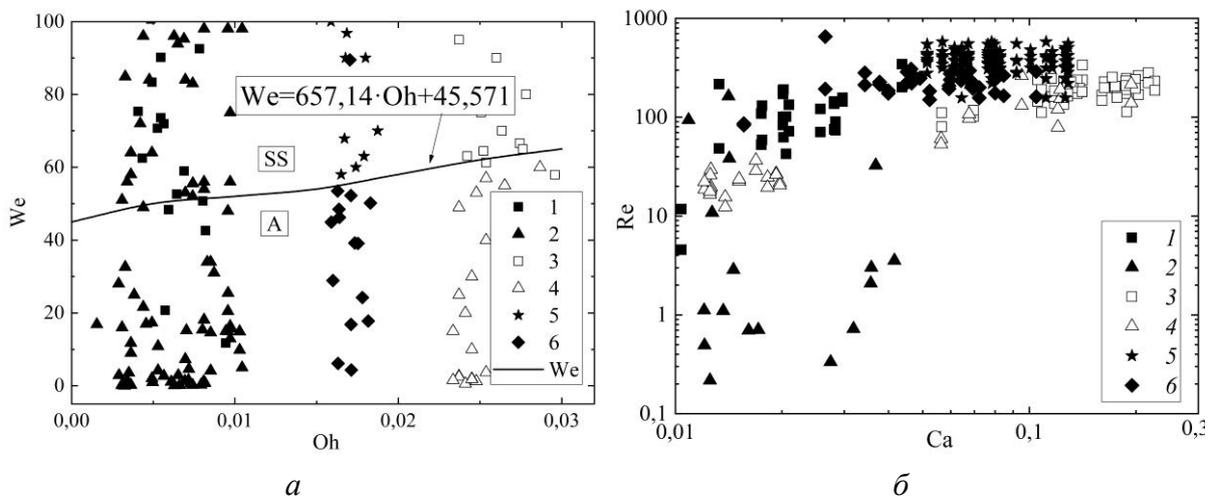


Рисунок 12 – Карты режимов агломерирования и разделения растяжением при соударении двух капель при варьировании свойств жидкости: 1, 2 – вода; 3, 4 – 50 об.% глицерина, 50 об.% вода; 5, 6 – 10 об.% вода, 90 об.% дизель; 1, 3, 5 – разделение растяжением; 2, 4, 6 – агломерирование.

С применением карт режимов взаимодействия в координатах $We(Oh)$, $Re(Ca)$ можно выделить диапазоны изменения как Oh , Ca , так Re и We (рисунок 12) 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 условий соударения капель. 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 натяжения жидкости в два раза без изменения других ее свойств увеличивает число Ca на 15-25 % при переходе между режимами агломерирования и разделения растяжением для всех изученных условий соударения капель.

Полученные результаты 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.

На рисунке 13 приведены установленные распределения размеров капель и частиц до их соударений, а также при совместном движении взаимодействующих капель и частиц при значении числа Вебера 250 для температуры газовой среды 20 °С и 100 °С.

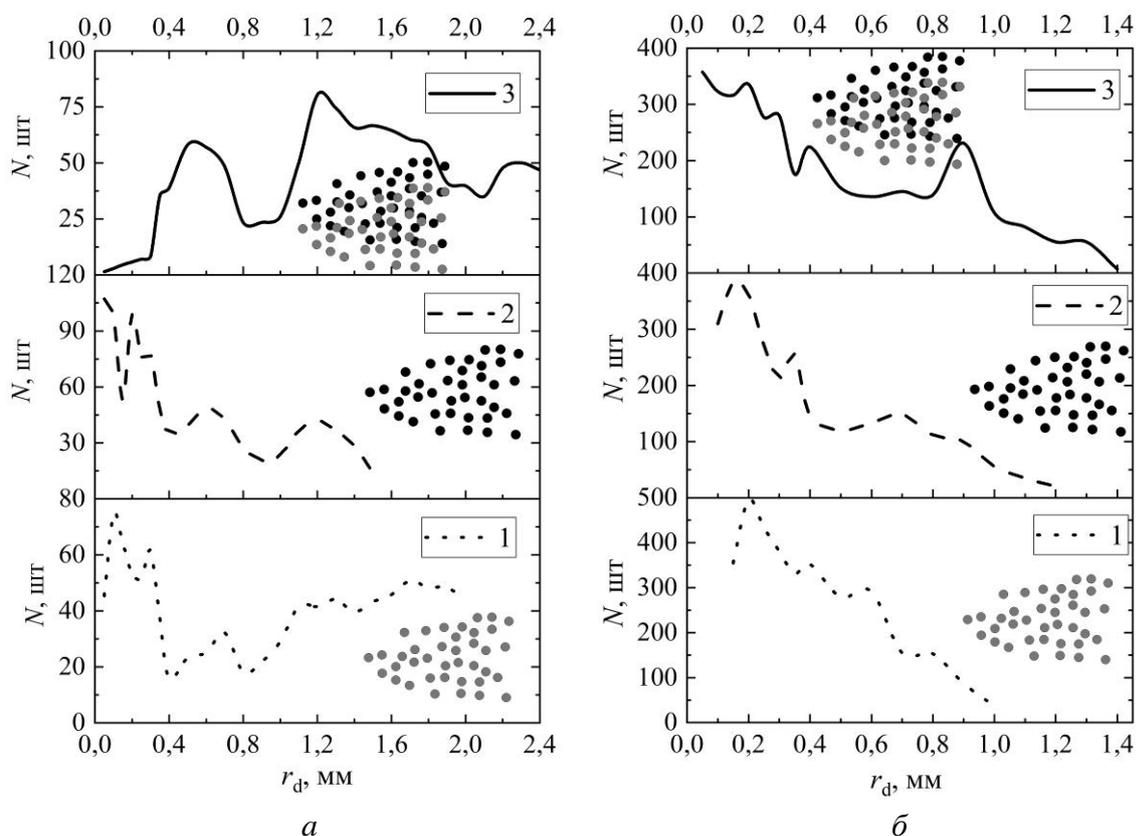


Рисунок 13 – Размеры капель и частиц в аэрозольных потоках при значении числа Вебера 250 для температуры газовой среды 20 °С (а) и 100 °С (б): 1 – капли воды; 2 – частицы песка; 3 – после соударения потоков капель воды и частиц песка.

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что при распылении суспензий размеры капель могут достигать 1,5 мм (рисунок 13а). При соударении капель суспензии с частицами песка средние размеры снижаются до 1 мм (рисунок 13б). При значении числа Вебера более 300 происходит измельчение крупных исходных капель, что способствует росту в 5–7 раз количества вторичных фрагментов размерами менее 0,2 мм. 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 снизить размеры камеры взаимодействия и тем самым удешевлять процесс производства осушенных твердых частиц. Полученные результаты позволяют описать процессы взаимодействия многокомпонентных потоков с большей информативностью. При проведении экспериментов на реальных действующих агрегатах сложно оценить влияние одного входного параметра на состав потока.

Результаты экспериментальных исследований представляют интерес для развития газопарокапельных технологий по нескольким причинам. Результаты опытов, на основе которых получены карты режимов соударений капель и частиц, а также характеристики вторичных фрагментов, представляют интерес для развития моделей прогнозирования последствий соударений капель и твердых частиц, характеристик их измельчения. В частности, представленные в диссертационной работе выражения для описания влияния основных исследованных факторов на границы режимов соударений капель и частиц, а также характеристики фрагментов, могут быть включены в модели для учета раздельного и совместного влияния параметров частицы.

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 (рисунок 14). Измельчение капель суспензии позволит получить частицы с минимальными размерами. Агломерирование капель и частиц позволяет увеличить дисперсность спреев.

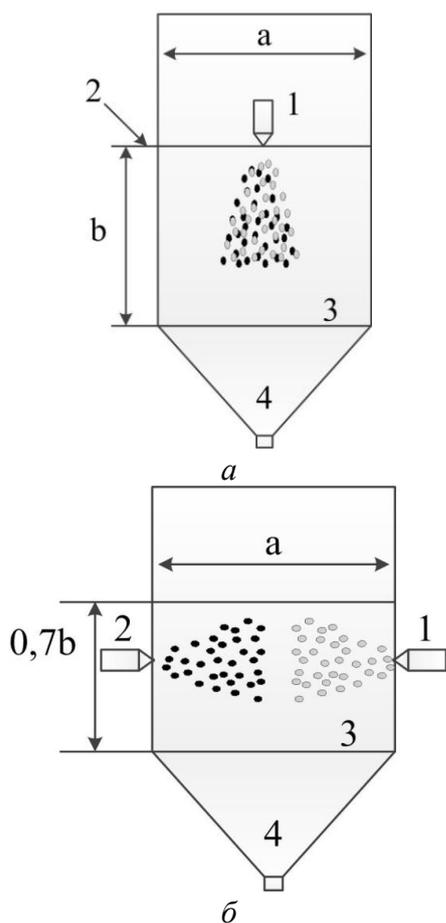


Рисунок 14 – Схема распылительной сушки твердых частиц (а) и модернизированная на базе результатов выполненных исследований (б): 1 – подача жидкости; 2 – подача твердых частиц; 3 – реактор; 4 – бункер хранения готовых продуктов.

Сформулированы рекомендации по практическому применению полученных экспериментальных зависимостей в теплоэнергетике. В частности, при оптимизации настройки горелки (скорость потока топлива не менее 5 м/с) можно добиться фрагментации капель, а, следовательно, снизить средний размер капель распыляемой суспензии в аэрозольном потоке на 40–50 %. Мокрые методы очистки газов широко применяются в металлургической, химической, энергетической отраслях промышленности, в сфере производства строительных материалов, удобрений, предприятия которых производят миллионы тонн в год антропогенных выбросов в атмосферу. Во время контакта жидкой и твердой фаз происходит смачивание и агломерация частиц. 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, что на начальном этапе впрыска жидкости целесообразно ее измельчение до размеров $R_k = 0,2-0,4$ мм, в том числе за счет вторичного измельчения исходных капель вследствие их соударения. Следовательно, необходимое условие $We > 80$.

После агломерации капле с частицами необходимо ускорить их коалесценцию для более быстрого осаждения и вывода из активной зоны реактора. Для этого требуется обеспечить значения числа Вебера в зоне коалесценции от 10 до 30. Для эффективных процессов измельчения и укрупнения капле и частиц форсуночные устройства должны располагаться друг напротив друга с допустимым отклонением не более 10° . За счет применения такой схемы обеспечивается возможность снижения времени нахождения капле в реакционной зоне. Следовательно, можно уменьшить габаритные размеры установки и металлоемкость. На основе результатов исследований предложены технологические решения для модернизации теплоэнергетического оборудования. Запатентован способ получения композиционного топлива. Подана заявка на патентование установки для тестирования систем вторичного измельчения капле жидких и композиционных топлив.

Основные результаты и выводы

1. Разработаны экспериментальные методики, созданы стенды, спланированы и проведены экспериментальные исследования взаимодействия движущихся капле 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 капле жидкостей и твердых частиц для реализации режимов: отскок, коалесценция, разлет, дробление. Установлены критические (необходимые и достаточные) значения безразмерных чисел для каждого режима.

4. Вычислены интегральные характеристики вторичных фрагментов жидкости после взаимодействия капле. В теплоэнергетических установках перспективно применять вторичное измельчение капле 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 капле 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 капле жидкостей в аэрозольном потоке и др.) на режимы взаимодействия капле и частиц, а также характеристики вторичных фрагментов (количество, размеры, форма, энергия, траектория и скорости движения, компонентный состав). В энергетических системах реализуется режим агломерирования капле жидкостей с твердыми частицами отношением размеров от 0,5 до 1,5 в диапазоне значений числа Вебера от 50 до 100 при изменении вязкости жидкости от 1 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 капле 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. Условия отскока, коалесценции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель, агломерирования и дробления при взаимодействии капель и частиц можно регистрировать достоверно при варьировании параметров многофазных потоков в широких диапазонах, соответствующих энергетическим установкам. Выполнены экспериментальные оценки влияния линейных параметров взаимодействия капель и частиц на частоту возникновения основных режимов взаимодействия. Показано, что данные частоты могут быть применимы для прогнозирования условий интенсивного вторичного измельчения капель жидкостей и суспензий в промышленных установках, генерирующих тепло.

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 парокапельных 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 требует соблюдения скоростей их движения в границах диапазонов изменения значений числа 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, запатентован способ получения композиционного топлива, подана заявка на патентование установки для тестирования систем вторичного измельчения капель жидких и композиционных топлив.

Основные публикации по теме диссертации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus или Web of Science

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. Т. 34. С. 101425.

2. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Interaction between droplets of solutions in a heated gaseous medium // *Powder Technology*. 2021. Т. 390. С. 86-96.

3. Shlegel N. E., **Tkachenko P.**, Strizhak P. A. Collision of water droplets with different initial temperatures // *Powder Technology*. 2020. Т. 367. С. 820–830.

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. Т. 170. С. 121011.

4. 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. Т. 142. С. 110829.

5. 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. Т. 12. С. 10747.

6. **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. Т. 179. С. 201–226.

7. 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. Т. 34. С. 54.

8. **Tkachenko P. P.**, Shlegel N. E., Strizhak P. A. Collisions of Two-Phase Liquid Droplets in a Heated Gas Medium // *Entropy*. 2021. Т. 23. С. 1476.

9. **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. Т. 177. С. 200–209.

10. Islamova A., **Tkachenko P.**, Strizhak P. Interaction of water droplets with pyrolyzing coal particles and tablets // *Defense Technologies*. 2023. Т. 30. С. 1–12.

Патенты РФ

1. Стрижак П.А., **Ткаченко П.П.**, Кропотова С.С. Способ получения композиционного топлива // Патент на изобретение 2023115391/04(032770), 13.06.2023.