

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи



Федоренко Роман Михайлович

ВТОРИЧНЫЕ ФРАГМЕНТЫ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ РАСПАДЕ
ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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

Томск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Современные представления о вторичных фрагментах при микро-взрывном распаде неоднородных капель	16
1.1 Вторичное измельчение капель жидкостей.....	16
1.2 Экспериментальные исследования вторичных фрагментов.....	18
1.3 Теоретические исследования вторичных фрагментов	23
Выводы по первой главе.....	26
Глава 2. Экспериментальные исследования характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде.....	28
2.1 Планирование экспериментальных исследований	28
2.2 Экспериментальные стенды.....	29
2.3 Технологии формирования исходных капель	36
2.4 Методы экспериментальных исследований характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде	46
2.5 Неопределенности измерений	51
2.6 Результаты экспериментов и их обсуждение	52
2.6.1 Влияние температуры внешней газовой среды	52
2.6.2 Влияние схемы нагрева	54
2.6.3 Влияние начальной температуры негорючего компонента	57
2.6.4 Влияние начального размера родительских капель	63
2.6.5 Исследование компонентного состава вторичных фрагментов.....	65
2.6.6 Влияние вязкости и поверхностного натяжения жидкостей.....	73
2.6.7 Влияние технологии формирования исходных двухжидкостных капель	81
2.6.8 Влияние коллективных эффектов	83
2.6.9 Влияние тонины помола, типа и концентрации твердых частиц	97
2.6.10 Обобщение результатов экспериментальных исследований	99
Выводы по второй главе.....	116
Глава 3. Теоретические исследования характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде	120
3.1 Модель распада двухжидкостной капли по росту давления и расширению паров в паровой пленке	120

3.2 Апробация и достоверность, верификация разработанной модели.....	125
3.3 Результаты математического моделирования и их обсуждение	127
3.3.1 Влияние температуры внешней среды	127
3.3.2 Влияние смещения водяного ядра относительно центра капли	128
3.3.3 Влияние несферичности исходных двухжидкостных капель	130
Выводы по третьей главе.....	131
Список условных обозначений и символов	135
Список литературы	138
Список публикаций по теме диссертации	158

Введение

Вторичное измельчение капель жидкостей является современным и перспективным подходом к решению задач стабилизации распыления топлива, повышения эффективности горения топливных композиций, снижению антропогенных выбросов и многих других [1–3]. За счет эффектов микро-взрывного распада можно кратно увеличить площадь свободной поверхности жидкости, за счет дробления исходных капель до размеров нескольких десятков микрон [1].

Большинство опубликованных в последние годы исследований, сфокусированных на распылении различных жидкостей, сфокусированы на изучении критических условий и режимов распада многокомпонентных капель. Изучение последствий вторичного измельчения неоднородных капель, таких как размеров вторичных фрагментов и заполненного ими аэрозольного облака, является ещё одной важной задачей при изучении закономерностей вторичного измельчения. Для применения данных эффектов в различных технологиях необходимо определить условия, при которых образуются вторичные фрагменты с необходимыми размерами и скоростями движения.

Вторичное измельчение капель жидкостей находит применение в ряде тепломассообменных процессов, включая сжигание жидких видов топлива и их смесей в двигателях внутреннего сгорания и тепловых установках; выпаривание и сушку растворов и суспензий; тушение пожаров; очистку жидкостей от нерегламентированных примесей и др.

Пока опубликовано немного результатов исследований характеристик вторичных капель при микро-взрывном измельчении, особенно если учитывать схемы нагрева с конвективным, радиационным и смешанным теплообменом. Компонентный состав вторичных капель чрезвычайно сложно прогнозировать с высокой достоверностью. Это связано с ограничениями имеющихся экспериментальных методик и стендов, программно-аппаратных комплексов,

необходимостью привлечения специализированных следящих систем и добавок-красителей.

Микро-взрывной распад – процесс, при котором исходные (родительские) многокомпонентные капли распадаются на более мелкие вторичные фрагменты вследствие локального вскипания дисперсной фазы (воды) [4]. Под вторичными фрагментами понимаются жидкостные фрагменты, отрывающиеся от исходной капли при ее распаде. Вторичные фрагменты могут содержать в своем составе как воду, так и горючую жидкость, что может вызывать каскадные эффекты микро-взрывного распада (вторичные фрагменты распадаются вслед за исходными каплями) [5]. Вторичные фрагменты – жидкостные фрагменты, образованные в результате микро-взрывного распада исходной двухжидкостной капли, при этом в каком каскаде они образовались не имеет значения.

На рисунке 1 представлено схематичное изображение процесса микро-взрывного распада двухжидкостной капли. Весь процесс микро-взрывного распада можно условно разделить на два этапа. На первом этапе исходная двухжидкостная капля прогревается от начальных условий до тех пор, пока не достигнет условий микро-взрывного распада за время, которое называется временем задержки распада (τ_p). На втором этапе при достижении условий микро-взрывного распада исходная двухжидкостная капля начинает распадаться с образованием вторичных фрагментов. Время, затраченное на полный распад исходной капли, называется временем формирования аэрозоля (τ_s). Общее время от начала нагрева исходной капли до ее полного распада называется временем существования двухжидкостной капли (τ_h).

При нагреве многокомпонентных капель выделяют несколько режимов их существования [6]: монотонное испарение, кипение и фрагментация. Микро-взрывной распад двухжидкостных капель может протекать в нескольких режимах, как правило, фрагментацию подразделяют на частичную (паффинг) и полную (микро-взрыв) [6–8]. На рисунке 2 представлено схематичное изображение режимов микро-взрывного распада двухжидкостных капель с образованием вторичных фрагментов. При изучении микро-взрывного распада наибольший

интерес представляют двухжидкостные капли, поскольку такие составы позволяют реализовать новые подходы к распылению жидкостей. В качестве исследуемых составов, как правило, рассматривают перемешанные и неперемешанные жидкости в исходной капле [6,9]. Также встречаются водо-топливные эмульсии [10], топливные смеси, в которых микро-взрыв возникает в процессе горения [11], а также суспензионные топлива [12].

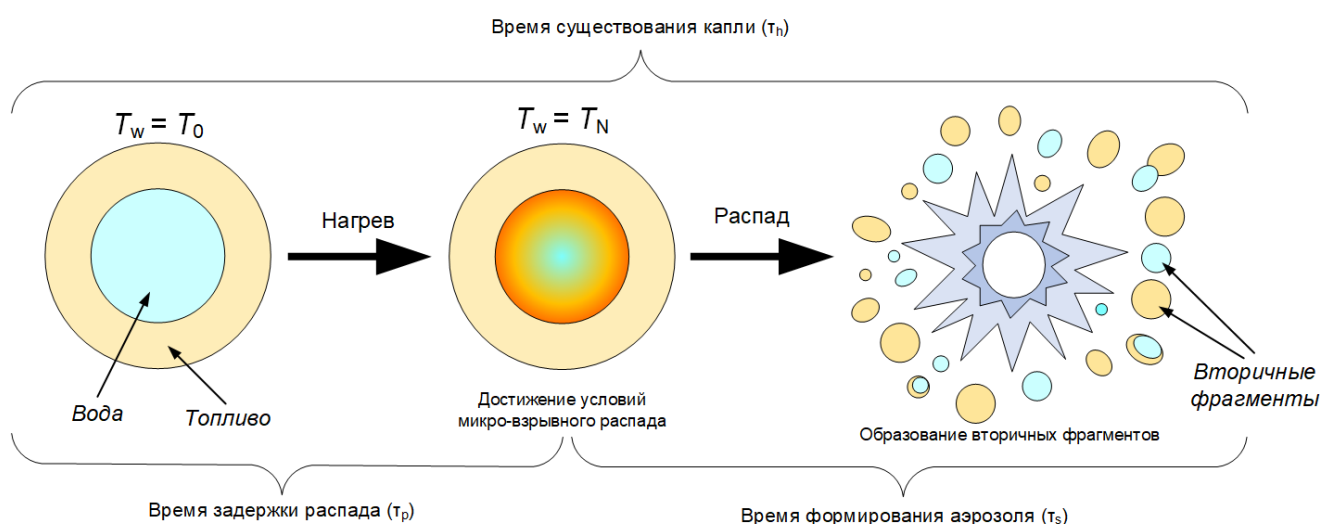


Рисунок 1 – Схематичное изображение процесса микро-взрывного распада двухжидкостной капли.

Изучение процессов вторичного измельчения сложных по компонентному составу капель проводится как экспериментально, так и теоретически. Основные исследования в этой области проводятся в Великобритании [8,13,14], Германии [15–17], Израиле [18], Индии [19–22], Италии [23], Китае [24–27], Корее [28–30], Малайзии [31–33], Мексике [34], России [35–38], Саудовской Аравии [39], США [40–42], Тайване [43–45], Франции [46–48], Швеции [10,49] и Японии [50–53]. Применение бесконтактных оптических методов (PIV, PTV, IPI, SP, PLIF, LIP, Two-color LIF и др.) и высокоскоростных программно-аппаратных комплексов позволило получить новые знания о форме капель, их движении и фрагментации. Большой вклад в изучение процессов вторичного измельчения капель жидкостей в России внесли работы В.А. Архипова [54,55], В.М. Бойко и С.В. Поплавского [56], Р.И. Нигматулина [57], Н.Е. Шлегеля [58,59].

Важно также создание физических и прогностических математических моделей для описания изученных процессов. В последние годы исследователи активно изучают механизмы и факторы, влияющие на характеристики и режимы микро-взрывного распада капель. Основное влияние на характеристики микро-взрывного измельчения оказывают факторы: температура внешней газовой среды [12,60], концентрации растворенных в жидкости газов [61,62], размер дисперсной фазы капелек воды в водо-топливных эмульсиях [63,64], соотношение концентраций компонентов [65,66], концентрация и размеры твердых частиц [67–69] и др.

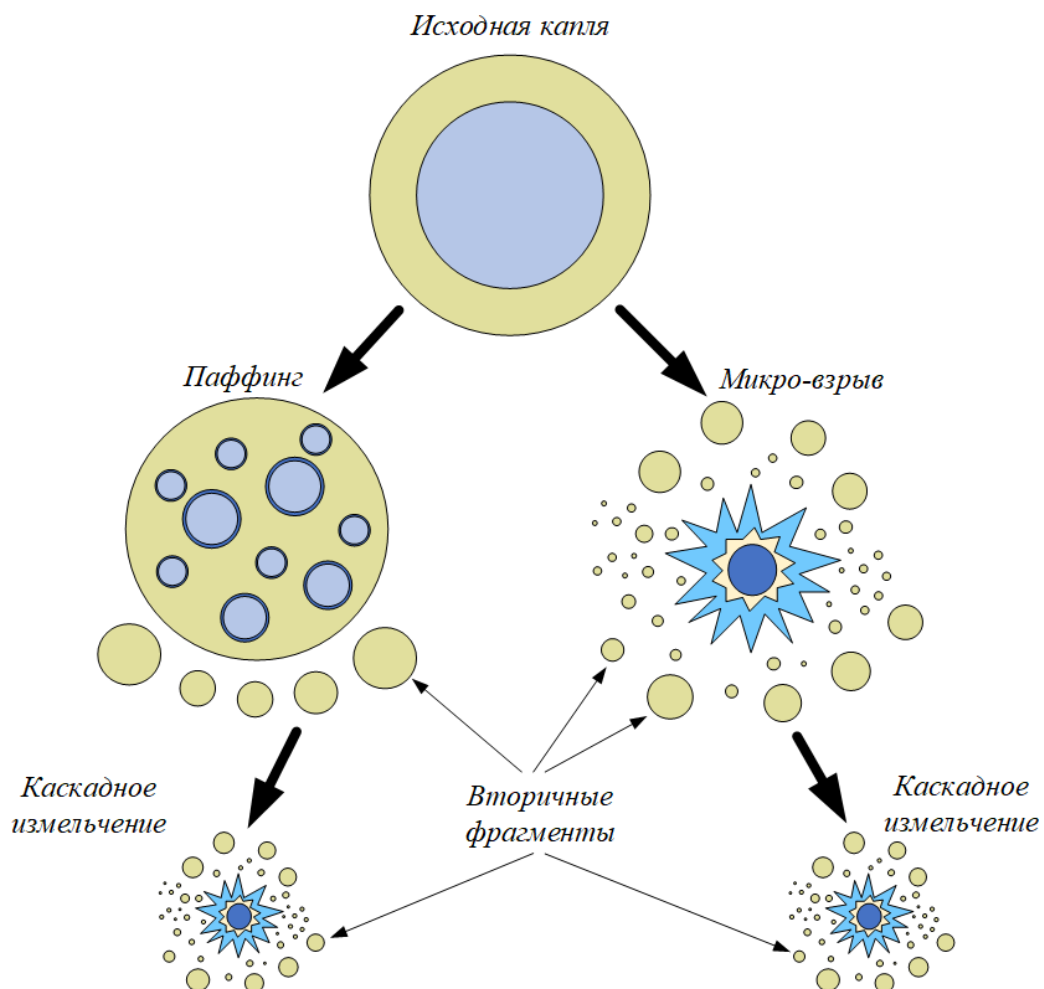


Рисунок 2 – Схематичное изображение режимов микро-взрывного распада двухжидкостных капель.

В качестве основных результатов теоретических исследований целесообразно выделить [70–75]. В них приведены результаты расчетов с

применением авторских программных кодов. Данные модели, как правило, ориентированы на прогнозирование времени задержки распада двухжидкостных капель на основе экспериментально установленных критериев (перегрев межкомпонентной границы [71], достижение критического размера капли, вследствие роста парового пузыря [72–74], превышение критической толщины пленки масла [75], достижение критического значения сил инерции, действующих на каплю [70]) и позволяют с удовлетворительной точностью прогнозировать времена задержки микро-взрыва в установленных пределах. Данные модели имеют ряд допущений, а также накладывают определенные ограничения при прогнозировании последствий распада, в частности, характеристик вторичных капель. В связи с этим, необходимо разработать экспериментальную базу, которая сможет описать распределения размеров и скоростей вторичных капель, образующихся в результате микро-взрывного распада, учитывая влияющие факторы, такие как температура греющей среды, концентрации компонентов, дисперсность и концентрация твердых частиц. Полученные аппроксимационные выражения могут быть использованы в моделях. Особое внимание следует уделить развитию этих методик в области ресурсоэффективных топливных технологий, термической очистки и газопарокапельных теплоносителей.

Целью диссертационной работы является определение характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель с несмешиваемыми компонентами по результатам экспериментальных и численных исследований с применением высокоскоростной видеорегистрации, бесконтактных оптических методов, коммерческих и авторских программных кодов.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка методики экспериментальных исследований, проектирование и создание экспериментальных стендов с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов для изучения характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.

2. Установление размеров и количества вторичных фрагментов, вычисление площадей поверхности испарения жидкости после и до распада при различных условиях подвода тепла к исходным каплям.
3. Установление компонентного состава вторичных фрагментов при варьировании параметров системы (объемное содержание горючей жидкости, температура поверхности подложки, размер и способ нагрева исходных капель).
4. Изучение влияния коллективных эффектов на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.
5. Изучение влияния вязкости и поверхностного натяжения жидкостей на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.
6. Обобщение результатов исследований с применением безразмерных комплексов, связывающих характеристики вторичных фрагментов с входными параметрами процесса микро-взрывной фрагментации капель.
7. Разработка физических и математических моделей для прогнозирования характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель с использованием коммерческих и авторских программных кодов.

Научная новизна. Экспериментально и теоретически установлены характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель с несмешиваемыми компонентами при различных условиях подвода тепла – с доминированием кондуктивного, радиационного, конвективного и смешанного теплообмена. С применением разработанных экспериментальных методик на базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и оптических методов диагностики потоков «Laser-Induced Fluorescence» (LIF), «Particle Tracking Velocimetry» (PTV) и «Shadow Photography» (SP) установлены распределения размеров и скоростей вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, а также их компонентный состав. Установлено влияние состава и свойств компонентов исходной капли (двухжидкостная капля или эмульсия) на характеристики вторичных фрагментов

при микро-взрывном распаде. Определено влияние вязкости и поверхностного натяжения жидких компонентов исходных капель на характеристики вторичных фрагментов. Выделены значительные коллективные и каскадные эффекты совместного влияния исходных капель в спреях на характеристики их микро-взрывного распада. Проведено сравнение характеристик вторичных фрагментов при реализации различных режимов микро-взрывного распада (микро-взрыв, паффинг). Определены характерные значения соотношений площадей поверхности испарения жидкости после и до микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Построены карты режимов микро-взрывного распада с применением безразмерных комплексов, позволяющие прогнозировать фрагментацию капель с различной интенсивностью.

Практическая значимость. Полученные при выполнении работы результаты экспериментов и численного моделирования, сформулированные заключения и выводы значительно расширяют существующие знания о процессах микро-взрывного распада. Эти данные могут послужить основой для разработки эффективных методов управления процессами тепломассообмена в перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологиях (сжигание жидких и суспензионных топлив, термическая и огневая очистка жидкостей, пожаротушение и др.). Представленные детальные данные о характеристиках вторичных фрагментов обладают большим потенциалом для верификации и апробации математических моделей, разработки аналитических методик для анализа процессов вторичного измельчения.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов измерений, анализом систематических и случайных погрешностей, проверкой воспроизводимости экспериментальных данных, сравнением с заключениями других авторов. Методики, использованные при проведении исследований, были апробированы, а результаты сравнивались с известными работами других научных коллективов. Достоверность полученных данных также подтверждается публикацией материалов диссертации в рецензируемых журналах.

Связь работы с научными программами и грантами. Экспериментальные и численные исследования характеристик вторичных фрагментов при нагреве капель композиционных жидких топлив с твердыми и жидкими отходами выполнены в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2020-806. Экспериментальные исследования характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде модельных двухжидкостных капель выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10008. Теоретические исследования характеристик вторичных фрагментов выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-69-10006. Исследования условий фрагментации капель биотоплив проведены при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-1616.2022.4.

Тема диссертационных исследований соответствует приоритетным направлениям развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», «Безопасность и противодействие терроризму», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Условия теплообмена и темп нагрева исходных капель оказывают определяющее влияние на количество и размеры вторичных фрагментов, получаемых в режимах паффинга и микро-взрыва. При идентичной температуре внешней среды максимальное количество вторичных фрагментов соответствует кондуктивному теплообмену с каплей, а минимальное – при радиационном теплообмене. В опытах с доминированием конвективного теплообмена регистрировались средние значения количества вторичных фрагментов относительно других исследованных условий.

Построены карты режимов фрагментации капель с применением обобщенных безразмерных комплексов.

2. Компонентным составом вторичных фрагментов можно управлять за счет варьирования значений основных входных параметров: условия теплообмена, тепловой поток, начальный размер исходных капель, относительная концентрация в них воды и других компонентов. На базе комбинации методов «Laser-Induced Fluorescence» (LIF) и «Shadow Photography» (SP) разработана методика для выделения вторичных фрагментов, содержащих разные концентрации компонентов. С ее применением можно выполнять прогнозирование состава спрея при распылении композиционных жидких топлив.
3. Характеристики вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада двухжидкостных неперемешанных капель и эмульсий существенно отличаются при идентичных условиях теплообмена. При распаде двухжидкостных неперемешанных капель средние размеры вторичных фрагментов в 3 раза меньше, чем для эмульсий. При варьировании вязкости и поверхностного натяжения горючего компонента можно увеличить площадь свободной поверхности жидкости в 6–7 раз.
4. Установлены коллективные эффекты совместного влияния исходных капель в спреях на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде. Обосновано, что при расположении исходных капель на расстоянии более 8–10 их характерных радиусов друг от друга распределения вторичных фрагментов от каждой из них практически идентичны (отличия значений S_1/S_0 не превышают 6%). При сближении исходных капель относительно выделенного выше удаления регистрировались каскадные измельчения капель в режимах паффинга и микро-взрыва (отличия значений S_1/S_0 могут достигать более 20%). Определены синергетические эффекты при фрагментации совокупности движущихся в разогретой газовой среде капель.

5. Разработана двумерная математическая модель для прогнозирования среднего размера вторичных фрагментов и их количества при микро-взрыве и паффинге, отличающаяся от известных учетом влияния степени перегрева межжидкостной границы и роста давления вблизи последней. Обосновано, что для предсказания средних размеров вторичных фрагментов правомерно использование модели, учитывающей их связь со степенью перегрева воды на границе раздела «вода/горючая жидкость» выше равновесной температуры кипения.

Личный вклад автора. Основные научные результаты и выводы, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад соискателя состоял в проектировании и сборке экспериментальных стендов, отладке экспериментальных методик и вычислительных кодов, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе результатов. Автор принимал участие в подготовке публикаций в рецензируемых журналах и научных конференциях. Математические модели и авторские программные коды, а также методики экспериментальной регистрации характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель разработаны совместно с профессором П.А. Стрижаком и доцентом Д.В. Антоновым. Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории тепломассопереноса ТПУ за помощь в проведении исследований, обсуждении результатов и сформулированные предложения по дальнейшему развитию работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных научных мероприятиях: Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2019, 2020); Семинаре ВУЗов по теплофизике и энергетике (2019, 2023); Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2019, 2021, 2022, 2023); Школе-семинаре молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках»

(2021, 2023); Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (2020, 2023); Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ» (Иваново, 2022, 2023); Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская теплофизика – 2023» (Красноярск, 2023); Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Нижний Новгород, 2023); Третьем Китайско-Российском научно-техническом форуме «Научоёмкие технологии: от науки к внедрению» (Харбин, 2023); Всероссийском молодежном форуме «Наука будущего – наука молодых» (Новосибирск, 2022); International Conference on Combustion Science and Processes (2021); International Conference on Fluid Flow and Thermal Science (2021); Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2021); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2020); Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, 2020); Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020); Международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2019).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в более чем 20 печатных работах, в том числе 4 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Горение и взрыв», «Письма в Журнал технической физики» («Technical Physics Letters»), «Journal of Engineering Physics and Thermophysics», более 10 статей в высокорейтинговых журналах (входят в 1–2 квартили Web of Science): «International Journal of Heat and Mass Transfer» (ИФ= 5,2), «Fuel» (ИФ=7,4), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=6,4), «Acta Astronautica» (ИФ=3,5), «Chemical Engineering Research and Design» (ИФ=3,9), «Powder Technology» (ИФ=5,2), «Combustion and Flame» (ИФ=4,4), «International Journal of Thermal Sciences»

(ИФ=4,5), «International Communications in Heat and Mass Transfer» (ИФ=7), «Energies» (ИФ=3,2). Получены 17 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

Благодарности. Особую благодарность соискатель выражает научному руководителю д.ф.-м.н. П.А. Стрижаку за помощь в постановке задачи, выборе темы, постоянное внимание и руководство работой. Автор выражает благодарность лаборатории тепломассопереноса Томского политехнического университета во главе с П.А. Стрижаком за поддержку и помощь в проведении экспериментальных исследований, обсуждении результатов и сформулированные предложения по дальнейшему развитию работы. Автор также выражает благодарность доц. Д.В. Антонову за помощь в проведении экспериментальных и теоретических исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, содержит 61 рисунок, 7 таблиц, 159 страниц.

Глава 1. Современные представления о вторичных фрагментах при микро-взрывном распаде неоднородных капель

1.1 Вторичное измельчение капель жидкостей

Проблемы энергоэффективного использования ресурсов и снижения антропогенных выбросов являются главной причиной для развития технологий повышения эффективности зажигания и горения капель топлив в различных практических приложениях. Это особенно актуально для технологий, где необходимо эффективно использовать топливо и снижать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (камеры сгорания двигателей, топки паровых и водогрейных котлов). Также важным направлением развития являются технологии очистки жидкостей от нерегламентированных примесей, а также технологий сушки и выпаривания, которые из-за своей малой эффективности требуют высоких энергозатрат. Одним из основных способов повышения энергетической и экологической эффективности данных технологий является увеличение площади поверхности испарения и химического реагирования жидкости непосредственно в зоне теплообмена, что позволит интенсифицировать процессы прогрева и испарения капель жидких топлив, существенно снизить времена задержки зажигания, а также повысить полноту его выгорания [76–78]. Как правило, для этих целей применяют специальные форсуночные устройства и распылительные насадки, позволяющие реализовать впрыск топлива в топочную камеру в виде аэрозоля. Впрыск капель с малыми размерами и скоростями движения непосредственно в камеру сгорания с помощью распылительных устройств может вызвать их унос из области теплообмена или налипание на стенки [79,80]. Вторичное измельчение капель в процессе нагрева может решить данную проблему.

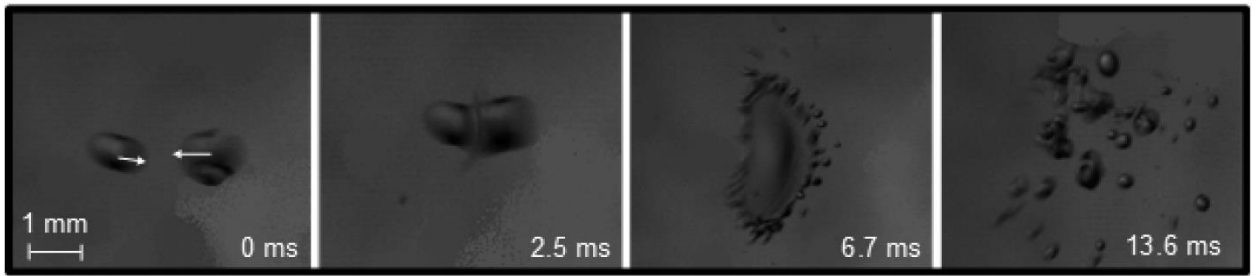
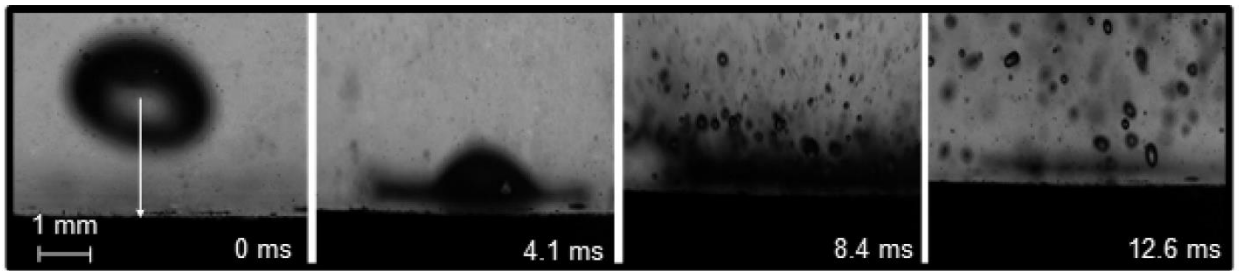
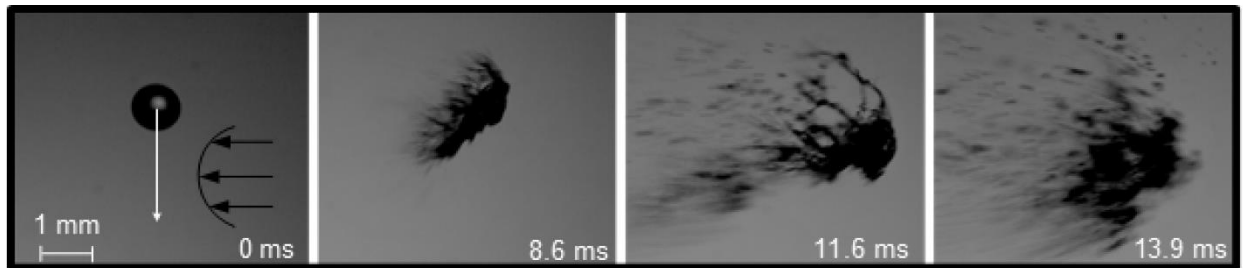
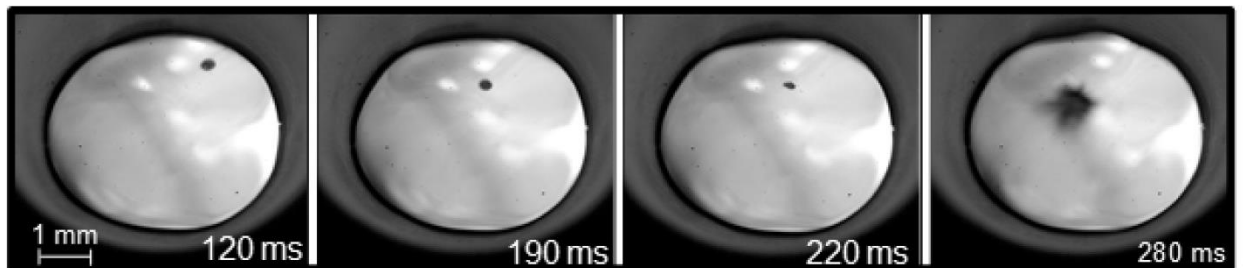
*a**б**в**г*

Рисунок 1.1.1 – Видеокадры процессов вторичного измельчения вододизельной эмульсии для четырёх схем [81]: *a* – соударения капель между собой, *б* – соударение капли с поверхностью, *в* – дробление капли под воздействием газового потока, *г* – микро-взрывной распад.

Выделяют механизмы вторичного измельчения капель жидкостей за счет [82–86]: (1) теплового перегрева (в капельных потоках неоднородных жидкостей, когда в капле возникает граница раздела фаз, при нагревании образуются очаги локального парообразования, развитие которых приводит к разрушению оболочки

капли); (2) аэродинамического воздействия газового потока, в котором происходит движение капель жидкости; (3) взаимного влияния капель при движении в газовой среде (соударения между собой или со стенками нагревательных камер). Типичные видеокadres различных схем вторичного измельчения представлены на рисунке 1.1.1.

Анализ эффективности данных подходов [81] показывает, что каждый из представленных механизмов имеет определенные ограничения, так тепловой механизм фрагментации капель в основном используется в капельных потоках неоднородных жидкостей, когда в капле формируются границы раздела фаз вследствие наличия двух и более компонентов с разными температурами кипения. Использование аэродинамического механизма дробления капель связано с необходимостью поддерживать высокие скорости движения потока, что не всегда целесообразно при ведении технологического процесса. Механизмы дробления капель жидкостей за счет соударений между собой или с твердыми стенками дают наименьший прирост площади поверхности испарения жидкости. Из всех представленных схем вторичного измельчения наибольший интерес представляет механизм микро-взрывного распада, поскольку обеспечивает максимальный прирост площади свободной поверхности жидкости.

1.2 Экспериментальные исследования вторичных фрагментов

Процессы микро-взрывного распада являются одними из самых эффективных в области так называемого вторичного измельчения, т.е. уже после первичного распыления с применением форсуночных устройств [81] данные процессы позитивно влияют на равномерность распыления топлива в камере сгорания, способствуют повышению полноты его выгорания, снижению инерционности зажигания, минимизации расхода топлива и сокращению газовых антропогенных выбросов [2,87–89]. Дробление капель жидкостей непосредственно в зоне теплообмена минимизирует влияние негативных эффектов уноса, разворота и торможения мелких капель за счет встречных конвективных потоков [80].

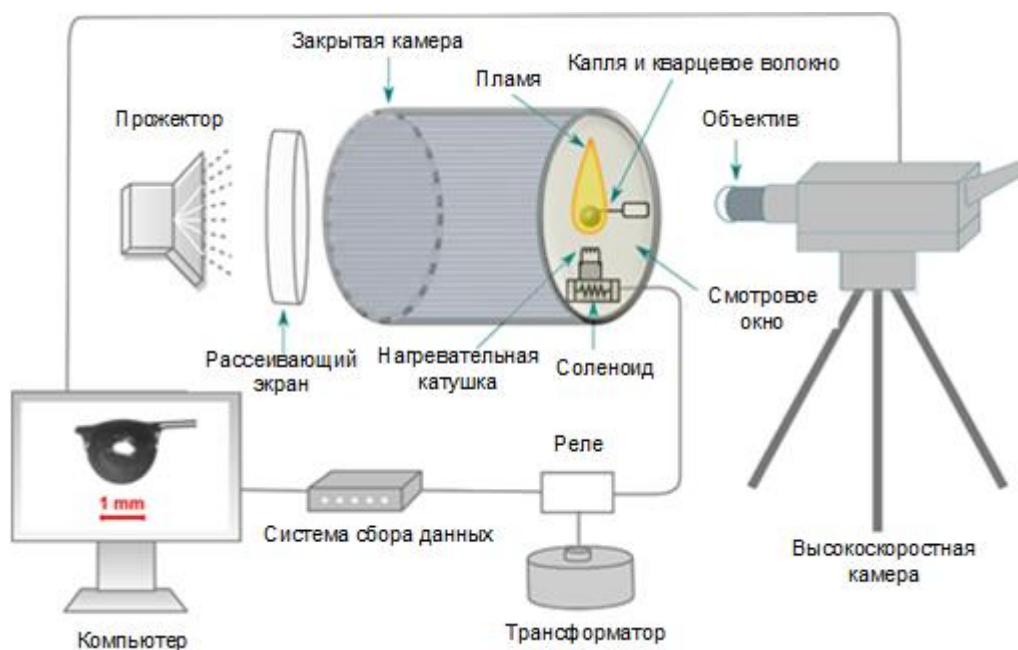
Данные эффекты реализуются в каплях неоднородных жидкостей: эмульсиях, суспензиях, растворах [48,62,64,90–95]. Основной причиной микро-взрывного распада капель эмульсий является разница теплофизических свойств и температур насыщения жидкостей, входящих в их состав [48,96,97]. Эффекты микро-взрывного распада интенсифицируют процесс испарения жидкости [98], что может быть использовано в различных технологиях (сжигание жидких и суспензионных топлив, выпаривание и сушка, термическая и огневая очистка жидкостей, пожаротушение и др.) [48,83,91,93,99–102].

Впервые процессы микро-взрывного распада были отмечены В.М. Ивановым и П.И. Нефедовым [4] в 1962 году. С развитием регистрационной техники в начале XXI века данное направление получило новый виток развития. Процессы взрывного распада капель эмульсий изучались исследователями из Японии. Ими продемонстрировано влияние насыщения газами CO_2 на характеристики вскипания и взрывного дробления капель водомасляных эмульсий. Установлено, что взрывной распад реализуется при высоких температурах и больших концентрациях горючего компонента [62,64]. В процессе нагрева капли многокомпонентных топлив могут измельчаться в нескольких режимах. В основном разделяют два режима микро-взрывного измельчения [6]: диспергирование или паффинг («puffing») – частичный распад исходной капли, при котором формируются вторичные фрагменты жидкости в количестве до 20 с размерами (радиусами) более 0,3 мм; микро-взрыв («micro-explosion») – полный распад исходной капли (более 20 мелких вторичных капель с размерами менее 0,3 мм) [98].

Большое число научных работ в области процессов микро-взрывного измельчения посвящено изучению предельных условий микро-взрывной фрагментации, механизмов и влияющих факторов [6,63,103–106]. Изучение последствий микро-взрывного распада (характеристик вторичных фрагментов) является не менее важной задачей, которая позволит применять эффекты микро-взрывного распада на практике.



а



б

Рисунок 1.2.1 – Схемы экспериментальных стендов, используемых при изучении характеристик вторичных фрагментов: а – стенд для нагрев капель на разогретой поверхности [48,94,107,108]; б – стенд для изучения микро-взрывного распада капель в процессе горения [8,109,110].

В данной области можно выделить в основном экспериментальные исследования. На характеристики вторичных фрагментов (размеры и скорости) при микро-взрывном распаде капель эмульсий может оказывать размер капелек

дисперсной фазы (воды). Установлен оптимальный размер капелек дисперсной фазы, позволяющий обеспечить наиболее эффективное измельчение исходных капель [108]. Установлены распределения тепловой, кинетической и потенциальной энергий вторичных фрагментов и предложены их распределения в зависимости от размеров капелек дисперсной фазы [48,94]. На характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде капель эмульсий также оказывает размер исходной капли. В частности, размер исходной влияет на режим распада и размеры вторичных фрагментов [111]. Размеры и скорости движения вторичных фрагментов существенно зависят от режима распада исходной капли. По результатам исследований [109] определено, что резком взрыве размеры вторичных фрагментов меньше, чем при микро-взрыве. Чем сильнее выброс пара при микро-взрывном распаде тем меньше размеры вторичных фрагментов и выше скорости их движения [8]. Распределения вторичных фрагментов по размерам могут иметь нормальный [108], логарифмический [94] или логнормальный характер [48].

Экспериментальные исследования процессов микро-взрывного распада топливных смесей [66,112–114] также демонстрируют влияние типа компонентного состава исходных капель на режимы фрагментации и характеристики вторичных фрагментов. Также на размеры вторичных фрагментов влияет и компонентный состав исходной капли [109]. На размеры и скорости вторичных фрагментов могут оказывать влияние концентрация и структура твердых частиц. С ростом концентрации твердых частиц уменьшаются размеры вторичных фрагментов и возрастают скорости их движения [115]. Образование вторичных фрагментов с малыми размерами и высокими скоростями движения улучшает смешивание топлива с окружающим воздухом и испарение, что важно для развития технологий горения и зажигания жидких и суспензионных топлив, выпаривания. Интересным фактом является то, что также как и в исходных двухжидкостных каплях, во вторичных фрагментах наблюдаются эффекты микро-взрывного измельчения, т.е. эффекты каскадного вторичного измельчения [116], что свидетельствует о том, что образующиеся вторичные фрагменты имеют

неоднородный компонентный состав. Схемы экспериментальных стендов, используемых при исследовании характеристик вторичных фрагментов приведены на рисунке 1.2.1.

Последние работы в области эффектов микро-взрывного измельчения посвящены изучению коллективных эффектов, возникающих в аэрозольных потоках при движении группы капель в потоке разогретых газов [117]. Возникающие при испарении температурные и аэродинамические следы снижают температуру потока за каплей, что приводит к увеличению времени задержки распада и изменению режима фрагментации [118]. За счет варьирования расстояния между последующими каплями можно управлять эффектами микро-взрывного измельчения [118]. Однако до сих пор нет результатов, описывающих характеристики вторичных фрагментов при возникновении данных эффектов.

Анализ известных экспериментальных данных [8,66,108–115] позволяет сделать вывод о том, что до сих пор в полной мере не изучено не только совместное, но и даже раздельное влияние совокупности факторов на характеристики вторичных фрагментов, в частности в литературе нет данных о влиянии схемы подвода энергии и формирования исходных капель (неперемешанные двухжидкостные, эмульсии), не установлены механизмы образования вторичных фрагментов. Нерешенными также остаются вопросы идентификации компонентного состава вторичных фрагментов, т.е. определение доли воды и горючего компонента для прогнозирования эффектов каскадного вторичного измельчения.

Для практического применения эффектов микро-взрывной фрагментации также необходимо исследовать компонентный состав образующихся вторичных фрагментов, в особенности это важно для технологий горения жидких и суспензионных топлив. С увеличением интереса к применению перспективных видов топлив возрастает и необходимость в достоверном анализе компонентного состава исходных и дочерних капель. Поскольку в состав двухжидкостных капель входит вода, пары которой повышают теплоемкость топливной смеси, определение компонентного состава и характеристик вторичных фрагментов важно для

понимания и прогнозирования характеристик зажигания и горения композиционных капель в камерах сгорания. Несмотря на представленные в литературе экспериментальные данные по изучению влияния различных жидких компонентов на процессы микро-взрывного распада [8,66,108–115] не проведен комплексный анализ влияния вязкости и поверхностного натяжения на характеристики вторичных фрагментов.

1.3 Теоретические исследования вторичных фрагментов

Существующие модели микро-взрывного распада позволяют достаточно точно прогнозировать времена задержки микро-взрывного распада капель многокомпонентных топлив в зависимости от группы влияющих параметров (температура нагрева, схема подвода энергии, компонентный состав, начальный размер исходных капель и т.д.), данные модели как правило разрабатываются на базе коммерческих программных комплексов Ansys Fluent, Comsol Multiphysics, Matlab, Mathematica и OpenFOAM с применением методов DNS (Discrete Numerical Simulation). Значительная часть работ посвящена изучению критических (необходимых и достаточных) условий микро-взрывной фрагментации. Для моделирования данных процессов в качестве условий распада используют экспериментально установленные критерии. В качестве такого критерия может выступать критический размер двухжидкостной капли перед микро-взрывным распадом вследствие расширения пузырей внутри нее [119,120], на образование пузырей внутри капли оказывает влияние степень перегрева менее летучего компонента [121]. Непосредственно перед микро-взрывным распадом в двухжидкостной капле также наблюдаются предельные скорости конвективных течений, предшествующие распаду [103], что может быть также использовано в качестве критерия. В качестве одного из наиболее распространенных и простых критериев применяется достижение на границе раздела вода/горючая жидкость температуры кипения воды [71].

Результаты математического моделирования [73,74,110,122,123] в значительной степени зависят от экспериментальных данных, а также исключают из рассмотрения некоторые процессы по причине отсутствия экспериментальных сведений [124]. Это затрудняет разработку полной модели распада, учитывающей связь эффектов прогрева, испарения и фрагментации двухжидкостных капель с характеристиками вторичных фрагментов. Типовые постановки, используемые при моделировании процессов микро-взрывного распада, приведены на рисунке 1.3.1 [124].

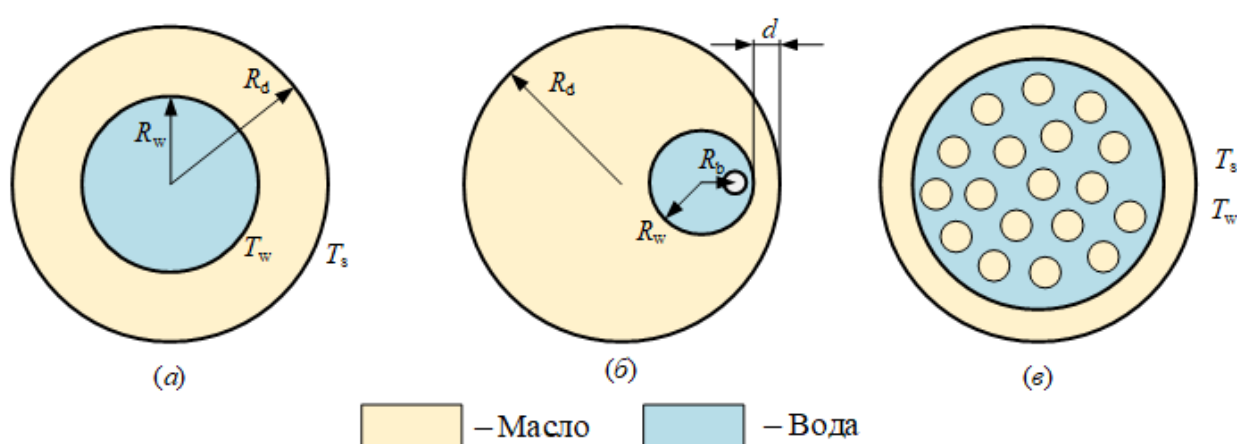


Рисунок 1.3.1 – Типовые постановки, используемые при моделировании микро-взрывного распада двухжидкостных капель: *а* – [125,126], капля воды радиусом R_w внутри капли топлива с радиусом R_d , T_w – температура на границе вода/горючая жидкость, T_s – температура поверхности капли; *б* – [73], геометрия капли эмульсии; *с* – [74], масляная мембрана, формирующаяся при нагреве капли эмульсии.

Однако для практического применения данных эффектов необходимо достоверно прогнозировать последствия микро-взрывного распада. Для правильной настройки технологического оборудования необходимо определить условия, позволяющие получать вторичные фрагменты с требуемыми размерами и скоростями движения. Большая часть существующих моделей микро-взрывного распада позволяет с высокой точностью описывать процессы, протекающие в гетерогенной капле, до ее разрушения, однако прогнозирование характеристики

вторичных фрагментов (последствий микро-взрывного распада) является ключевой нерешенной задачей [124].

В настоящий момент известно лишь несколько работ, позволяющих в определенных условиях прогнозировать последствия микро-взрывного распада. В качестве одной из первых в данном направлении можно выделить работу Ф.И. Султанова и А.Л. Ярина, опубликованную в 1990 году [127], в которой представлен теоретический анализ деформации жидких сред при диспергировании и взрывном дроблении. В [127] предпринята попытка связать хаотическое разрушение концентрированной полимерной упруговязкой жидкости с процессом распада бесконечного кластера. При решении задачи микро-взрывного распада J. Shinjo и др. [73] использовали постановку, в рамках которой капля эмульсии в начальный момент времени достигла условий микро-взрывного распада, т.е. вода внутри капли топлива находится в перегретом состоянии, при этом в начальный момент времени в ней находится паровой пузырь. Показано, что при такой постановке результаты расчетов очень сильно зависят от начальных условий [73]. Предложенный подход [73] позволил описать процесс разрушения капли эмульсии при достижении условий микровзрывной фрагментации, однако не дает представлений о процессах, происходящих в капле при нагреве. Одна из последних моделей в данном направлении опубликована P. Guida и др. [128], в которой авторы представляют подход, позволяющий прогнозировать такие характеристики как скорость и размеры вторичных фрагментов, образующихся в результате фрагментации двухфазной капли, содержащей в своем составе жидкости и пар.

Изучение характеристик (размеров, количества, скоростей и траекторий движения, температуры, компонентного состава) вторичных фрагментов при микро-взрывной фрагментации в настоящее время является одной из важнейших задач, необходимой для развития теории фазовых превращений сложных по компонентному составу топлив. В настоящий момент не существует единой теории образования вторичных фрагментов при микро-взрыве, для получения более полного представления о процессах фазовых превращений и внедрения данных эффектов в технологии сжигания жидких и суспензионных топлив требуется

разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать характеристики вторичных фрагментов при варьировании вышеперечисленных факторов [124].

Изучение последствий микро-взрывной фрагментации капель сложных по компонентному составу топлив, таких как размеров вторичных фрагментов и заполненного ими аэрозольного облака, является важной задачей при изучении закономерностей микро-взрывного распада. Важно установить условия, при которых образуются вторичные фрагменты с требуемыми характеристиками (размеры, скорости, компонентный состав). Создание базы данных, связывающей параметры системы с характеристиками вторичных фрагментов, важно для применения эффектов микро-взрывного распада в практических приложениях.

Выводы по первой главе

1. Микро-взрывной распад является перспективным механизмом вторичного измельчения многокомпонентных капель, с точки зрения интегральных характеристик, а также затрат энергии и времени. Микро-взрывной распад позволяет получить мелкодисперсный аэрозоль с размерами вторичных фрагментов менее нескольких десятков микрон.
2. Большинство исследований в области микро-взрывного измельчения капель неоднородных жидкостей посвящено изучению предельных условий микро-взрывного распада, механизмов и влияющих факторов. При этом из поля зрения упускается важность изучения характеристик образующихся при микро-взрывном распаде вторичных фрагментов. Определение условий, необходимых для образования вторичных фрагментов с заданными характеристиками, будет способствовать внедрению данных эффектов в промышленных энергетических технологиях.
3. Наибольший вклад на процессы микро-взрывного распада оказывают схема подвода энергии, температура греющей среды, реологические свойства жидкости, схемы формирования исходных капель, коллективные эффекты,

возникающие при движении капель в составе спрея. Важно изучить вклад этих и других факторов на характеристики вторичных фрагментов, образующихся в результате микро-взрывного распада двухжидкостных капель. Также важно изучить компонентный состав образующихся вторичных фрагментов для понимания и прогнозирования характеристик зажигания и горения композиционных капель.

4. Пока не разработаны унифицированные физические и математические модели для достоверного прогноза последствий микро-взрывного распада капель жидкостей. Существующие модели с высокой степенью точности описывают процессы, протекающие в гетерогенной капле при ее нагреве до распада, однако не позволяют прогнозировать последствия микро-взрывной фрагментации. В связи с этим важно разработать прогностические модели, позволяющие прогнозировать такие важные характеристики вторичных фрагментов как размеры, скорости и траектории движения, компонентный состав. Наиболее перспективным представляется создание унифицированной математической модели, позволяющей одновременно прогнозировать как времена задержки распада сложных топливных композиций, так и последствия распада.

Глава 2. Экспериментальные исследования характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде

2.1 Планирование экспериментальных исследований

Основной задачей экспериментальных исследований являлось определение характеристик вторичных фрагментов (размеры, скорости, компонентный состав, отношение площадей поверхности жидкости после и до распада) при реализации режимов частичного (паффинг) и полного (микро-взрыв) распада исходных капель. Изучалось влияние факторов (схема нагрева, температура греющей среды, схема формирования капель, тип и концентрация компонентов капель и др.) на характеристики вторичных фрагментов. В лабораторных условиях воспроизводились условия, приближенные к различным практическим приложениям [20,129,130].

Для достижения поставленной задачи был поставлен многофакторный эксперимент «двухжидкостная капля/ высокотемпературная газовая среда», позволяющий варьировать основные параметры системы. В качестве компонентов исходных двухжидкостных капель при проведении экспериментальных исследований были использованы типичные для различных приложений [20,129,130] жидкости.

Нагрев исходных капель осуществлялся с применением различных схем. Применялись схемы нагрева с доминированием конвективного, кондуктивного и радиационного теплового потока для приближения к различным практическим приложениям. При проведении экспериментов температура газовой среды варьировалась от 300 до 1500 К, скорость газового потока от 0,5 до 3 м/с. Этиловый спирт применялся в качестве топлива для создания высокотемпературной пламенной зоны, что позволяло обеспечить температуру в пламени до 1120 К.

Во время проведения экспериментов температура в области теплообмена T_a (или T_s) регистрировалась с применением малоинерционных термопар и модуля сбора данных National Instruments.

Для генерации двухжидкостных капель применялись электронные дозаторы производства «Ленпипет Новус», позволяющие генерировать объем жидкости с шагом 0,01 мкл [131].

Измерение скорости потока газа в схеме с конвективным нагревом проводилось с помощью метода Particle Image Velocity (PIV). Для визуализации в поток разогретых газов вводились частицы TiO_2 [132].

Ввод исходных капель в область регистрации осуществлялся с помощью координатного механизма. Исходные двухжидкостные капли располагались на держателе. В качестве материалов держателей использовались нихром, медь, сталь, алюминий и керамика. Диаметры держателей варьировались от 0,2 до 0,9 мм.

Высокоскоростные видеокамеры производства Vision Research (США) моделей Phantom Miro M310 и Phantom v411 применялись для регистрации вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде. Для обработки полученных изображений применялось программное обеспечение Phantom Camera Control. Также для определения характеристик вторичных фрагментов использовались авторские программные коды. При обработке полученных изображений регистрировались размеры, количество, скорости движения вторичных фрагментов, а также режимы распада исходных капель.

Методика идентификации компонентного состава вторичных фрагментов основана на применение метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF). Применялся флуорофор Rhodamine B, который растворялся в воде. Полученные видеокадры обрабатывались с применением программного обеспечения DaVis.

2.2 Экспериментальные стенды

При проведении экспериментальных исследований исходные двухжидкостные капли нагревались с использованием стендов, представленных на рисунках 2.2.1–2.2.8. Эксперименты проводились как с исходными каплями,

подвешенными на держателе (рисунки 2.2.1–2.2.6), так и при свободном движении исходных капель в высокотемпературной газовой среде (рисунки 2.2.7–2.2.8).

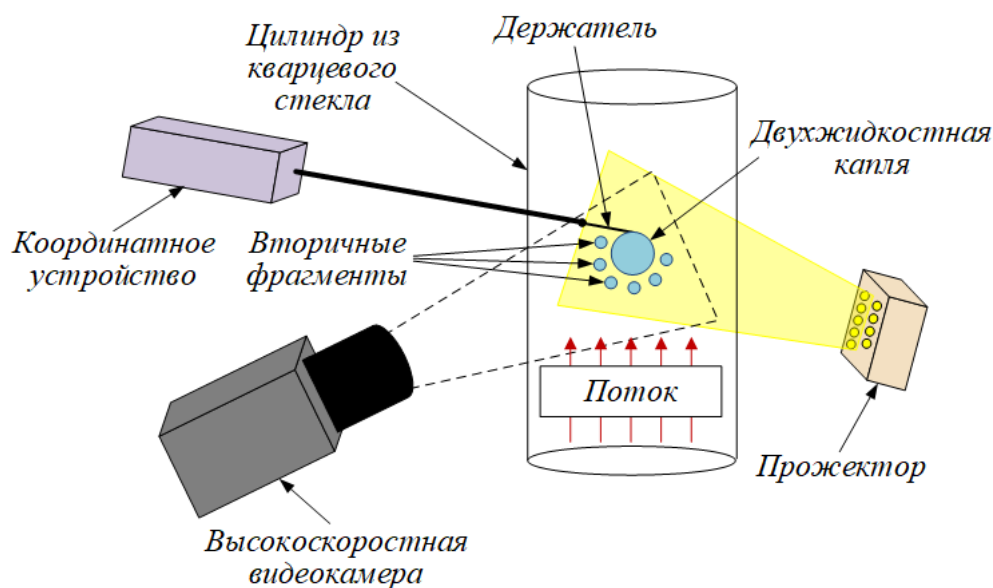


Рисунок 2.2.1 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при нагреве исходных двухжидкостных капель в потоке разогретых газов [133].

Для нагрева исходных двухжидкостных капель в потоке разогретых газов (рисунок 2.2.1) применялась система, состоящая из вентилятора Leister Robust и нагревателя воздуха Leister LHS 61. Данная система позволяла варьировать скорость и температуру воздушного потока в диапазонах от 0,5 до 6 м/с и от 300 до 973 К, соответственно. Продолжением канала вентилятора служил цилиндр из кварцевого стекла, позволяющий наблюдать и регистрировать процессы микро-взрывного распада [133].

Также для создания потока разогретых газов применялась схема (рисунок 2.2.2) при использовании трубчатой муфельной печи. Муфельная печь Loir LF 50/500–1200 (диапазон температур от 293 до 1523 К) располагалась вертикально, продолжением канала муфельной печи являлся металлический теплоизолированный цилиндр, который позволял поддерживать постоянную температуру газового потока [134].

Основные элементы экспериментального стенда для нагрева группы из трех исходных двухжидкостных капель в потоке разогретых газов (рисунок 2.2.3) аналогичны представленным на рисунке 2.2.2. Для формирования группы капель применялся специальный держатель, состоящий из трех нихромовых проволок с диаметром 0,2 мм, которые располагались друг над другом [135].

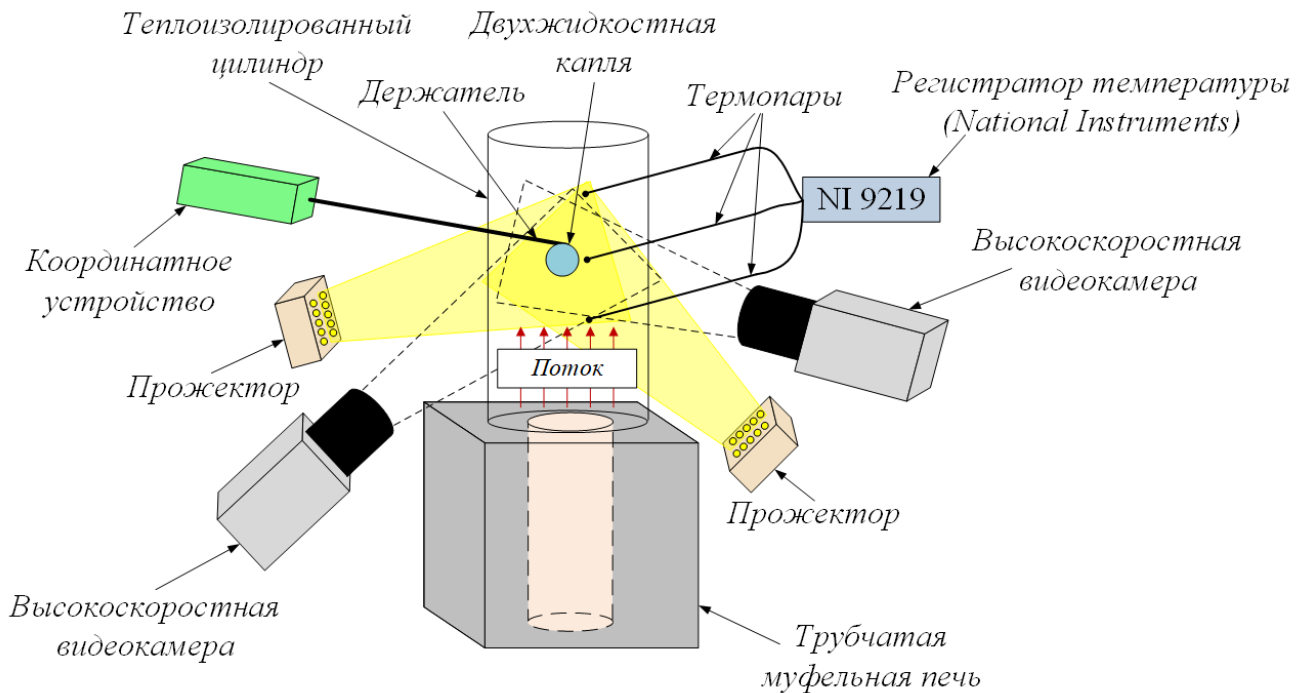


Рисунок 2.2.2 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при нагреве исходных двухжидкостных капель в потоке разогретых газов [134].

Для нагрева исходных капель (рисунок 2.2.4) также применялась трубчатая муфельная печь Nabertherm R 50/250/13 (диапазон температур от 293 К до 1523 К).

Металлическая подложка (рисунок 2.2.5) из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т нагревалась с помощью высокочастотного индукционного нагревателя ВЧ-15АВ (мощность 15 кВт, диапазон частот 30–100 кГц) [133]. Исходные двухжидкостные капли помещались на разогретую поверхность.

Для нагрева исходных двухжидкостных капель в высокотемпературной пламенной зоне (рисунок 2.2.6) применялось горелочное устройство (топливо – этиловый спирт, максимальная температура 1120 К). Контроль температуры

осуществлялся в нескольких сечениях пламенной зоны на различном удалении от основания горелочного устройства.

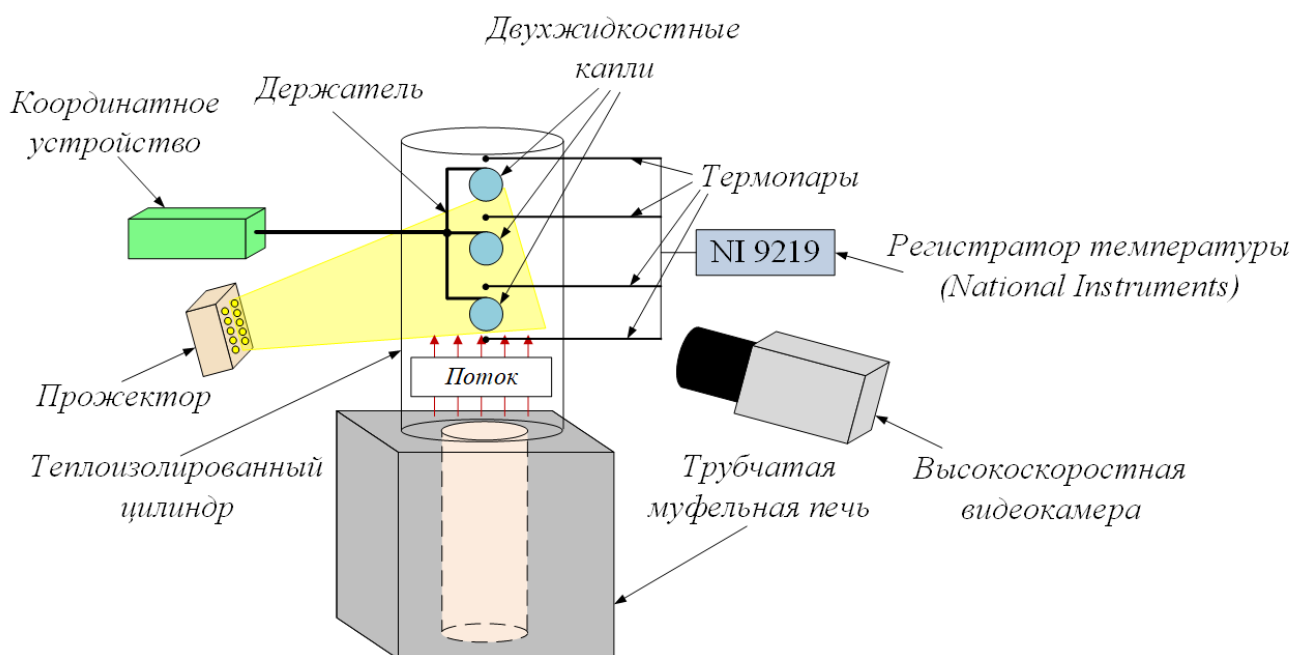


Рисунок 2.2.3 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при нагреве группы из трех двухжидкостных капель в потоке разогретых газов [135].

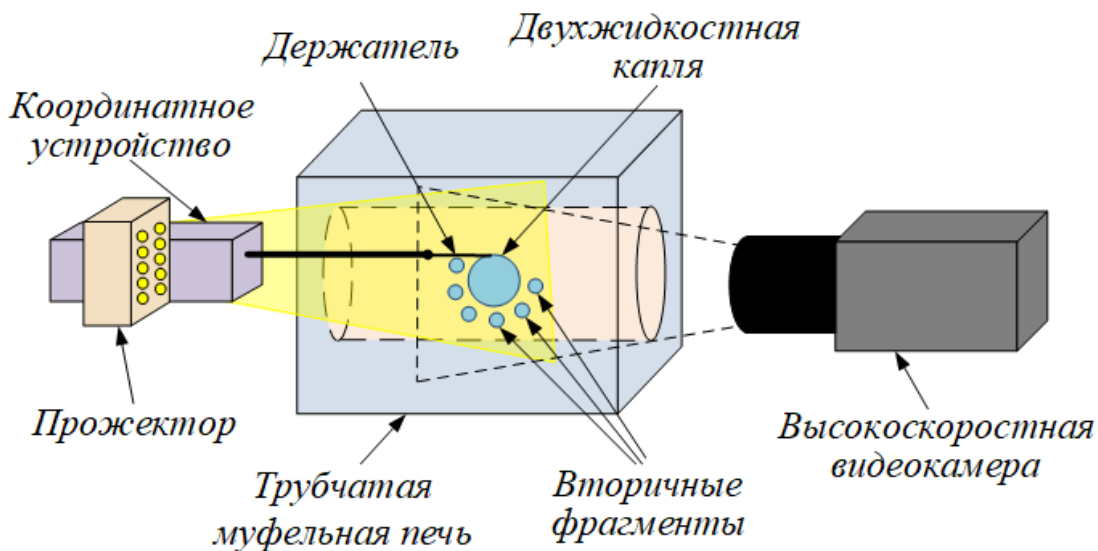


Рисунок 2.2.4 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при нагреве исходных двухжидкостных капель в трубчатой муфельной печи [133].

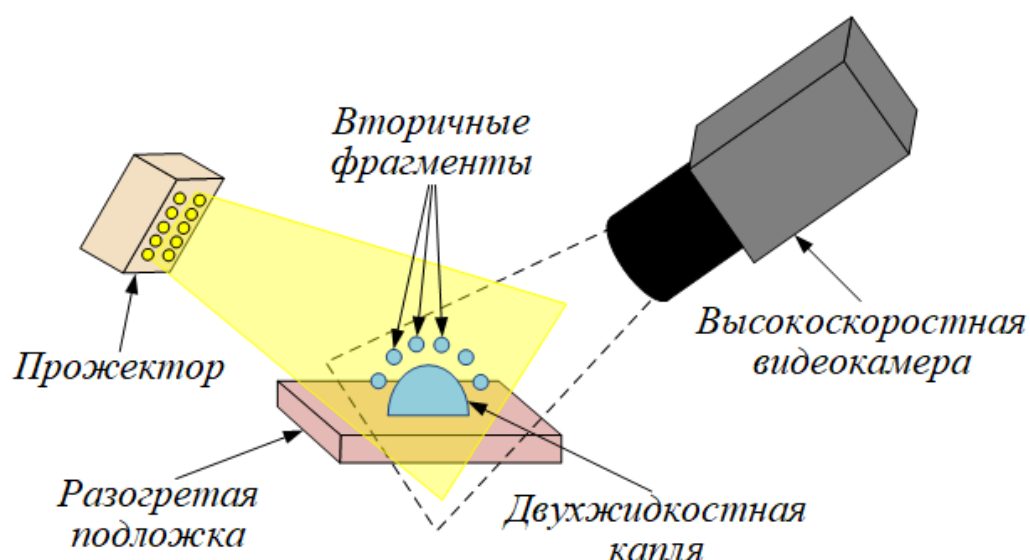


Рисунок 2.2.5 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при нагреве исходных двухжидкостных капель на разогретой подложке [133].

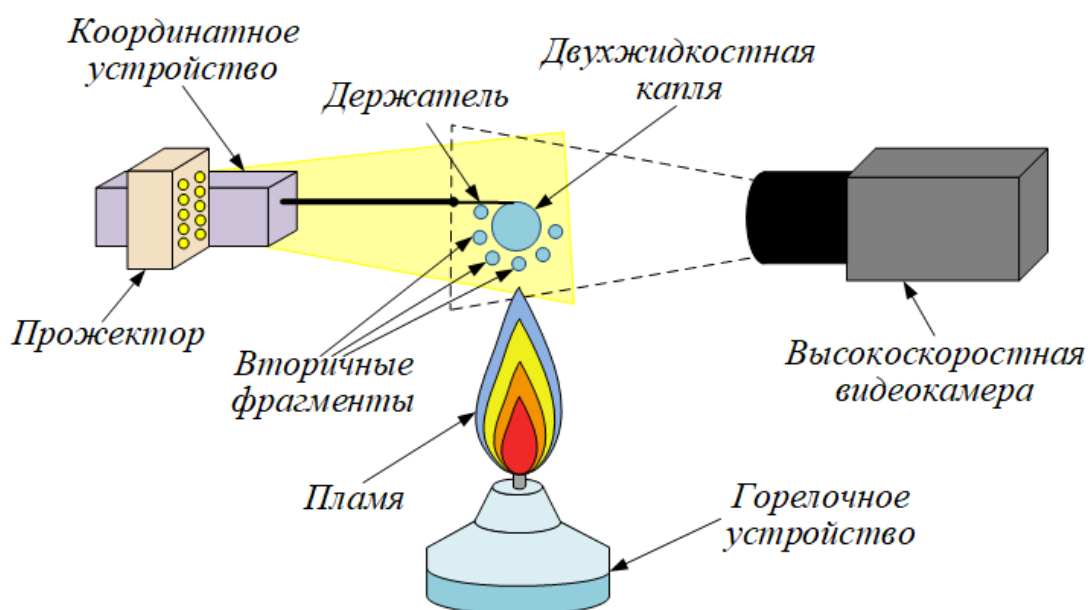


Рисунок 2.2.6 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при нагреве исходных двухжидкостных капель в высокотемпературной пламенной зоне [131].

Ввод исходных капель при проведении экспериментальных исследований с использованием стендов (рисунок 2.2.1 – 2.2.6) в область регистрации осуществлялся с помощью координатного механизма, на конце которого располагался держатель. В качестве держателя применялась тонкая нихромовая проволока диаметром 0,2 мм. Сравнение характеристик микро-взрывного распада

двухжидкостных капель при использовании держателей с разными геометриями и материалами [136] показало, что нихромовая проволока оказывает минимальное влияние на данный процесс. Контроль температуры поверхности и газовой среды осуществлялся с применением комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар.

Нагрев одиночных двухжидкостных капель в процессе свободного движения в потоке разогретых газов осуществлялся с использованием стенда, представленного на рисунке 2.2.7. Трубчатая муфельная печь Loір LF 50/500–1200 (диапазон температур от 293 К до 1523 К) располагалась вертикально, чтобы сбрасываемые капли могли в процессе движения по каналу муфельной печи нагреться до условий микро-взрывного распада и фрагментировать с образованием облака вторичных фрагментов [137].

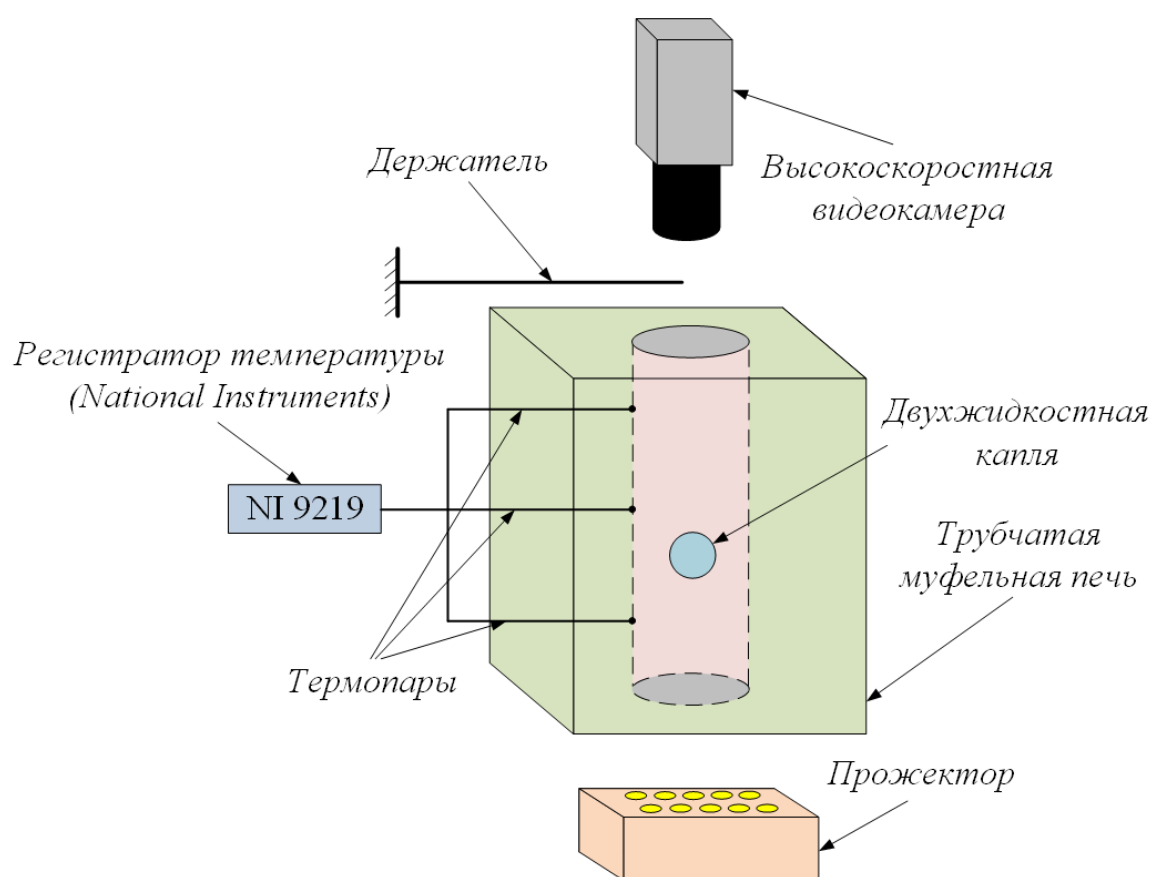
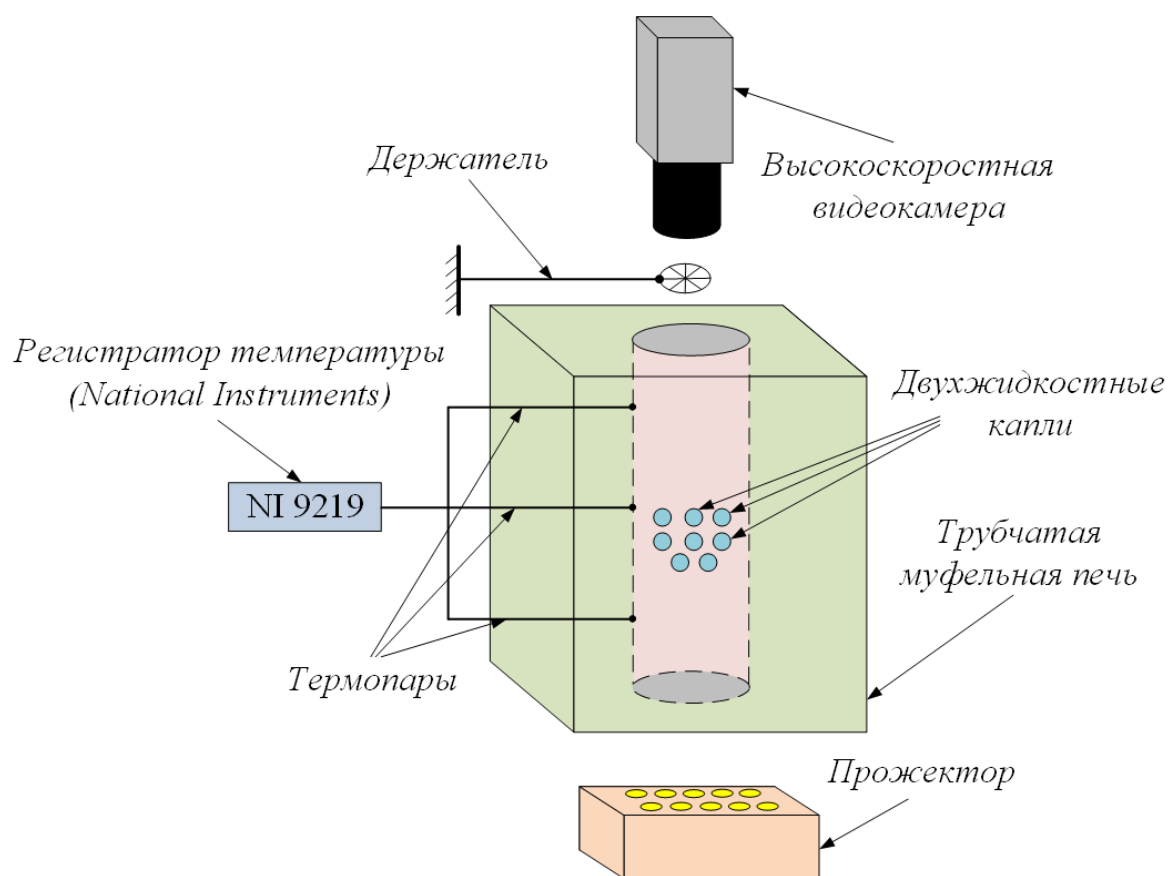
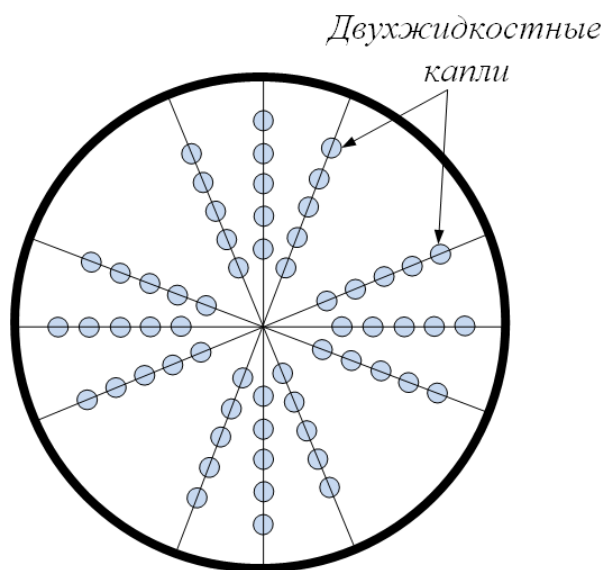


Рисунок 2.2.7 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при свободном движении исходных двухжидкостных капель в потоке разогретых газов [137].



а



б

Рисунок 2.2.8 – Схема экспериментального стенда для изучения характеристик вторичных фрагментов при свободном движении группы исходных двухжидкостных капель в потоке разогретых газов (а) и система подачи группы двухжидкостных капель (б) [117].

Для проведения экспериментальных исследований с группой двухжидкостных капель в свободном падении (рисунок 2.2.8а) использовался экспериментальный стенд аналогичный представленному на рисунке 2.2.7. Для подачи группы капель применялся специальный держатель (рисунок 2.2.8б), состоящий из металлического кольца и проволок (диаметром 0,1 мм) [117]. Преимуществом такой системы подачи капель являлось то, что обеспечивался большой засев регистрационной области каплями. Последние перемещались в виде определенного эшелона, т.е. приблизительно на одной высоте относительно участка сброса, что позволяло зарегистрировать большое количество капель в зоне регистрации при максимальной частоте кадров видеокамеры.

При проведении экспериментов с двухжидкостными каплями в свободном падении (рисунки 2.2.7, 2.2.8) сброс исходных капель в канал муфельной печи осуществлялся с применением механизированного устройства. В результате ударного смещения держателей, происходил срыв исходных капель с поверхности держателей, далее происходило свободное падение капель и их движение в трубчатой печи.

Во всех представленных экспериментальных стендах для подсветки области регистрации (для реализации метода Shadow Photography) применялся светодиодный прожектор MultiLed QT. Видеосъемка процессов микро-взрывного распада осуществлялась с использованием высокоскоростных видеокамер Phantom Miro M310 и Phantom v411. Частота съемки при проведении экспериментов варьировалась от 2000 до 10000 кадров в секунду.

2.3 Технологии формирования исходных капель

В качестве компонентов исходных двухжидкостных капель применялись жидкости представленные в таблице 2.3.1. Данные жидкости находят применение в энергетических технологиях, а также технологиях термической и огневой очистки жидкостей.

В проведенных экспериментах рассмотрены два типа исходных двухжидкостных капель: неперемешанные капли с явно выраженной границей раздела «вода/горючая жидкость» и эмульсии, в которых дисперсная фаза (вода) распределена в объеме горючей жидкости.

Таблица 2.3.1 – Свойства жидкостей (на основе данных [138,139] при 293 К), использованных в проведенных экспериментах.

Жидкость	k , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	μ , мПа·с	σ , Н/м
Дистиллированная вода	0,599	4182	998,2	1,004	0,072
Керосин	0,133	2209	727,1	0,814	0,023
Дизельное топливо	0,137	2215	743,7	1,314	0,025
Рапсовое масло	0,115	2111	868,9	4,737	0,031
Отфильтрованное талловое масло	0,135	1650	881,7	72,025	0,035
Сырое талловое масло	0,135	1650	882,8	2443,963	0,041
Трансформаторное масло	0,115	2000	865	2,509	0,029
Отработанное турбинное масло	0,111	1666	892	4,05	0,031

Исходные двухжидкостные неперемешанные капли генерировались с помощью двух электронных дозаторов «Ленпипет Новус» с функциями забора жидкости (шаг варьирования генерируемого объема 0,01 мкл) [131]. Сначала генерировалась капля воды заданного объема, которая помещалась на держатель. Далее, с помощью второго дозатора генерировалась капля горючей жидкости, которая растекалась по поверхности капли воды, образуя на ее поверхности оболочку толщиной 0,05...0,5 мм, в зависимости от объема исходной капли и соотношения концентраций жидкостей [140]. Толщина оболочки горючей жидкости в двухжидкостных неперемешанных каплях была определена в работе [12] с применением метода Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF). Применение

двухжидкостных неперемешанных капель обусловлено тем, что при высокотемпературном нагреве капель эмульгированных топлив регистрируются процессы коалесценции капелек дисперсной фазы, в результате чего они объединяются в одну общую каплю воды [141]. В качестве одного из перспективных способов формирования неперемешанных двухжидкостных капель можно выделить отдельный впрыск в камеру сгорания струй горючего и негорючего компонентов, которые в результате коагуляции образуют аналогичные структуры [142].

На рисунке 2.3.1 представлен внешний вид исходных двухжидкостных неперемешанных капель. При проведении экспериментов исходные капли имели объемы от 2,5 до 15 мкл, начальные радиусы капель составляли от 0,84 до 1,53 мм, соответственно. Диапазон размеров капель выбран исходя из ограничений по минимальному генерируемому объему (не менее 0,5 мкл) и максимальному объему, который можно ввести в область нагрева [133].

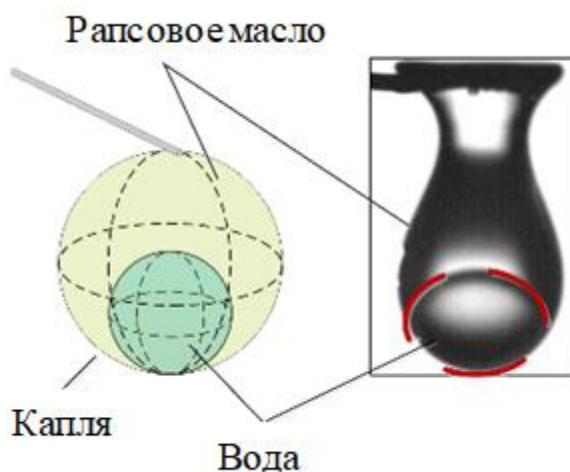


Рисунок 2.3.1 – Схематическое изображение и внешний вид исходных двухжидкостных капель явно выраженной границей «вода/горючая жидкость» [6].

Эмульсии готовились в следующем порядке. На первом этапе происходило смешивание эмульгатора и горючего компонента в ультразвуковой ванне «Сапфир 2.8» в течении 5 минут [143]. На втором этапе к полученной смеси добавлялась дистиллированная вода. Полученная эмульсия перемешивалась в течении 5 минут.

Стабильность и однородность эмульсии проверялась с помощью капельного теста [144]. Распределение капелек дисперсной фазы определялось с помощью метода LSCM (Laser Scanning Confocal Microscopy). Типичное распределение размеров капелек дисперсной фазы представлено на рисунке 2.3.2.

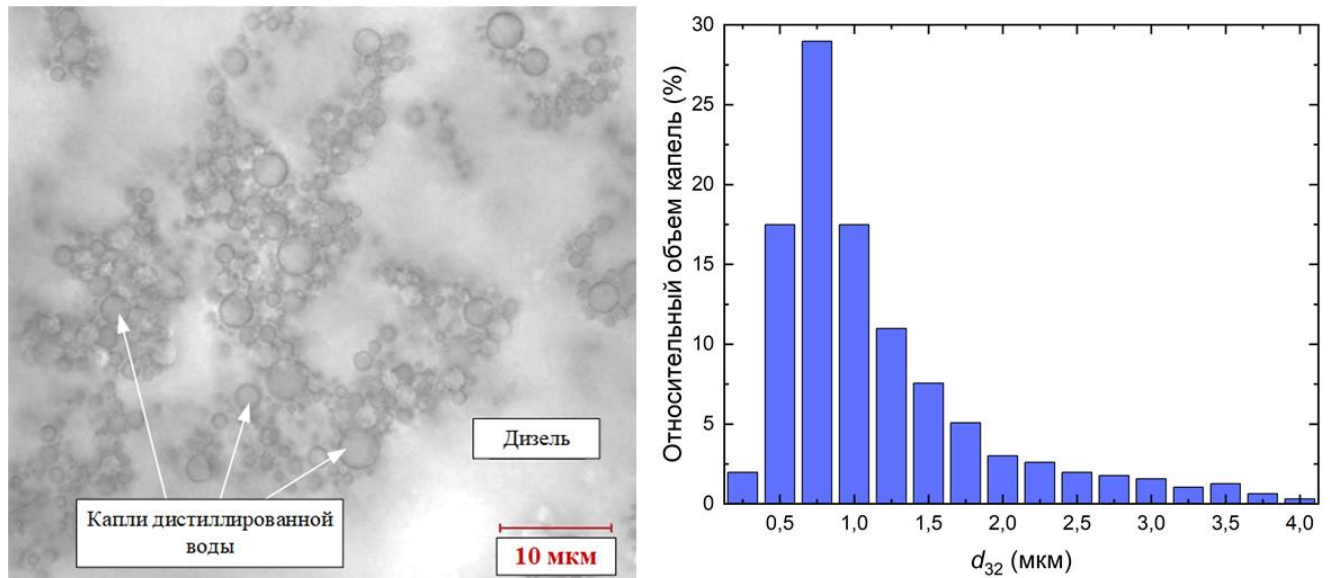


Рисунок 2.3.2 – Распределение капель воды в водо-дизельной эмульсии [6].

Средний размер капелек дисперсной фазы в полученной эмульсии составил 1,2 мкм, что соотносится с результатами других коллективов, занимающихся исследованиями микро-взрывного распада капель водо-дизельных эмульсий [108,145]. Генерация капель эмульсий осуществлялась с помощью электронного дозатора, после чего исследуемые капли помещались на держатель.

В экспериментах по исследованию влияния начальной температуры негорючего компонента (воды) в составе двухжидкостных капель на характеристики вторичных фрагментов [146] вода нагревалась до 353 К с помощью нагревательной плиты мощностью 1,8 кВт. Температуры измерялись термопарами типа ТПП с диапазоном температур 273–1873 К, диаметром спая 0,05 мм, систематической погрешностью измерения времени 0,1 с и систематической погрешностью измерения температуры менее чем ± 1 К. В качестве добавки к горючему компоненту также использовалась замороженная вода в виде тающей ледяной частицы. Воду замораживали в индивидуальной морозильной камере при

температуре 233 К с использованием ячеек заданного объема и конфигурации. Капли воды для замораживания генерировали с помощью дозатора «Ленпипет Новус» с шагом генерируемого объема 0,01 мкл. В таблице 2.3.2 перечислены основные свойства воды при различных температурах.

Таблица 2.3.2 – Основные характеристики воды (на основе данных [139]) при температурах 273, 300 и 353 К.

Температура, К	k , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	$a \cdot 10^8$, м ² /с
273	0,569	4234,8	1030,7	13,04
300	0,611	4191,5	1010,7	14,42
353	0,668	4172,8	968,6	16,52

Для изучения влияния вязкости, поверхностного и межфазного натяжения исходных двухжидкостных капель на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде [147] приготавливались водо-дизельные эмульсии. В экспериментах по варьированию вязкости и межфазного натяжения применялась обратная эмульсия, при варьировании поверхностного натяжения – прямая.

Для варьирования вязкости дизельного топлива применялся бутилкаучук БК-1675Н производства ПАО «Нижнекамскнефтехим» (Республика Татарстан). На начальном этапе готовился концентрат с концентрацией 0,05 г/мл, состоящий из дизельного топлива (ДТ) и растворенного в нем полимера. Варьирование вязкости дизельного топлива осуществлялось путем смешивания концентрата и чистого дизельного топлива [147]. К полученному составу добавлялся эмульгатор, после чего в полученный раствор добавлялось требуемое количество воды. Смешивание компонентов эмульсии проводилось в ультразвуковой ванне.

Вязкость полученных составов измерялась с помощью вискозиметра Brookfield DV3T LV (диапазон измерений 0,001...6000 Па·с). Вязкость измерялась при скорости вращения шпинделей от 10 до 250 об./мин [148]. Погрешность измерений установки не превышает $\pm 1\%$ [147].

Для определения межфазного натяжения применялся метод определения объема капель с применением сталагмометра СТ-2 [143]. Вычисления межфазного натяжения проводились при $k=994,2$ – константа сталагмометра [147].

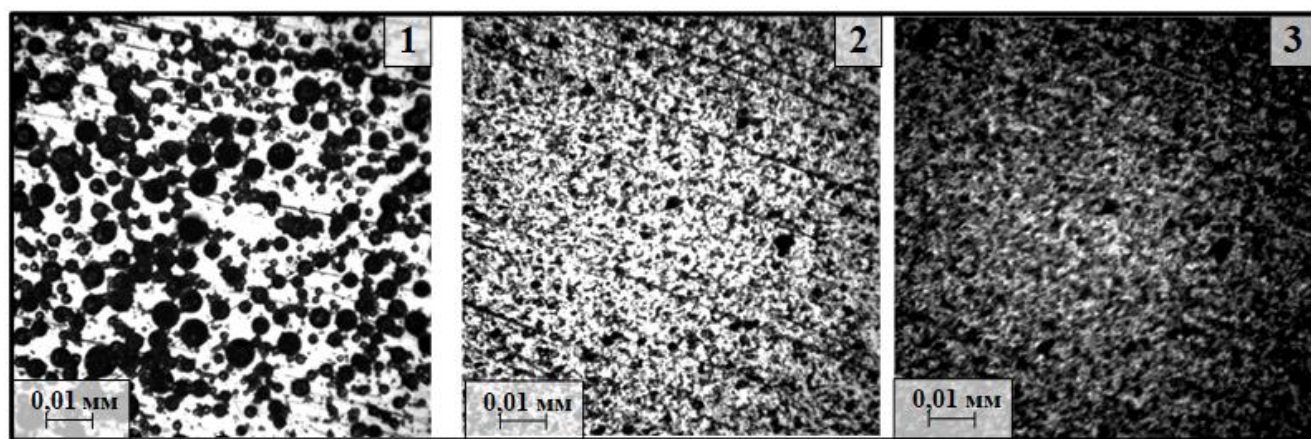
Для варьирования поверхностного натяжения применялась прямая эмульсия (горючая жидкость в воде). К воде добавлялись поверхностно-активные вещества (ПАВ) Tween 20 и Tween 80 [149,150]. Для измерения поверхностного натяжения применялся тензиометр К6 (KRUSS, Германия). Измерения проводились методом отрыва кольца при температуре 293 К.

Характеристики исследуемых эмульсий приведены в таблице 2.3.3. Следует отметить, что теплофизические характеристики эмульгаторов и полимеров, использованных в настоящей работе, несущественно (в пределах 4–7%) отличались от дизельного топлива. К тому же объемные концентрации добавок были достаточно малыми.

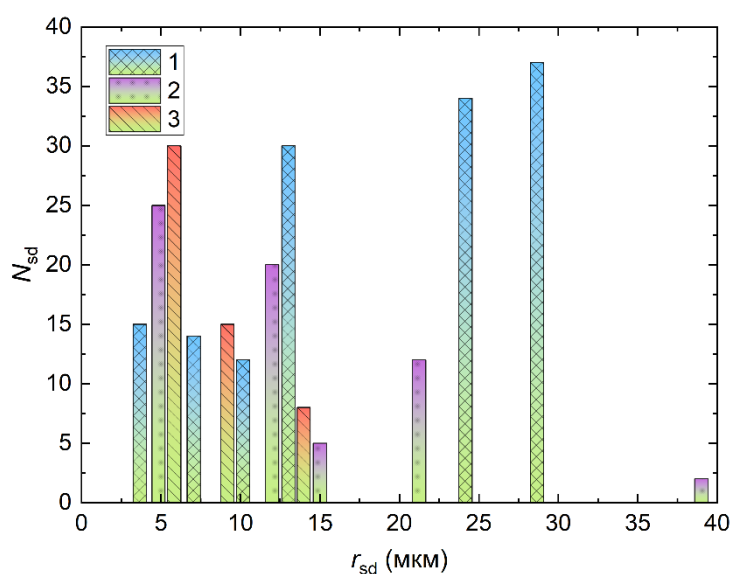
Типичные кадры, полученные при использовании микроскопа, для иллюстрации отличий структуры и состава капель эмульсий при различных добавках, приведены на рисунке 2.3.3. При анализе кадров с использованием методов Interferometric Particle Imaging (IPI) и программного обеспечения Actual Flow [151] вычислены распределения капелек дисперсной фазы (воды) в эмульсии. Типичные распределения последних для трех составов также показаны на рисунке 2.3.3. Данные распределения важны при выполнении последующего сравнительного анализа размеров и скоростей движения вторичных фрагментов, как функций от температуры, размеров капель, вязкости, поверхностного и межфазного натяжения. В процессе анализа кадров регистрации с применением микроскопа установлено, что чем больше концентрация эмульгаторов и стабилизаторов (загустителей) топлив, тем меньше полидисперсность капелек воды. Мелко- и квазимонодисперсные композиции крайне сложно перевести в неустойчивое состояние, в частности, в режим частичной и тем более полной фрагментации. Поэтому концентрации эмульгаторов и стабилизаторов были ограничены тем, чтобы обеспечивались условия фрагментации капель топлив.

Таблица 2.3.3 – Свойства эмульсий при 293 К.

Наименование состава	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м	Динамическая вязкость μ , Па·с	Межфазное натяжение σ_0 , Н/м
Составы для варьирования вязкости				
ДТ 90 об%, Вода 10 об%	828	0,0275	0,00259	0,04257
ДТ 80 об%, ДТ с полимером 10 об%, Вода 10 об%	828	0,0275	0,00377	-
ДТ 45 об%, ДТ с полимером 45 об%, Вода 10 об%	828	0,0275	0,01668	-
Составы для варьирования поверхностного натяжения				
ДТ (1,6 г/л D _c D) 40 об%, Вода 60 об%	952	0,07269	0,0014	-
ДТ (1,6 г/л D _c D) 40 об%, Вода 59,5 об%, 0,5 об% Tween-80	952	0,0474	0,0014	-
ДТ (1,6 г/л D _c D) 40 об%, Вода 59,5 об%, 0,5 об% Tween-20	952	0,0401	0,0014	-
Составы для варьирования межфазного натяжения				
ДТ 90 об%, Вода 10 об%	828	0,0275	0,00259	0,04257
ДТ (0,08 г/л D _c D) 90 об%, Вода 10 об%	828	0,0275	0,00252	0,02249
ДТ (1,6 г/л D _c D) 90 об%, Вода 10 об%	828	0,0275	0,00243	0,00341



а



б

Рисунок 2.3.3 - Видеокадры структуры капли дизельной эмульсии (а) и распределения размеров капелек воды в капле дизельной эмульсии (б): 1 – 10 об% вода, 90 об% дизельное топливо; 2 – 10 об% вода, 90 об% дизельное топливо, 0,08 г/л эмульгатор D_cD; 3 – 10 об% вода, 90 об% дизельное топливо, 1,6 г/л эмульгатор.

Также для изучения влияния вязкости исходных двухжидкостных перемешанных капель на характеристики вторичных фрагментов приготавливались смеси дизельного топлива с талловым маслом. Дизельное топливо хорошо смешивается с маслами растительного происхождения, благодаря чему можно варьировать вязкость полученного состава и управлять характеристиками его распыла [152,153]. Для варьирования вязкости горючей жидкости дизельное топливо и талловое масло смешивались в различных пропорциях. Перемешивание растворов проводилось с использованием магнитной

мешалки AIBOTE ZNCLBS-2500 (температура при перемешивании 298 ± 2 К, скорость вращения магнитного якоря 1500 об/мин, время перемешивания 7 мин). В таблице 2.3.4 представлены основные свойства топливных смесей, использованных в экспериментах по варьированию вязкости при 300 К. Для генерации двухжидкостных неперемешанных капель применялась схема, представленная на рисунке 2.3.1.

Таблица 2.3.4 – Основные свойства составов для варьирования вязкости при 300 К.

Наименование состава	Плотность ρ , кг/м ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м	Динамическая вязкость μ , мПа·с
Дизельное топливо 90 об%, Талловое масло 10 об%	817	0,0244	4,828
Дизельное топливо 50 об%, Талловое масло 50 об%	861	0,0266	14,612
Дизельное топливо 10 об%, Талловое масло 90 об%	885	0,0304	49,569

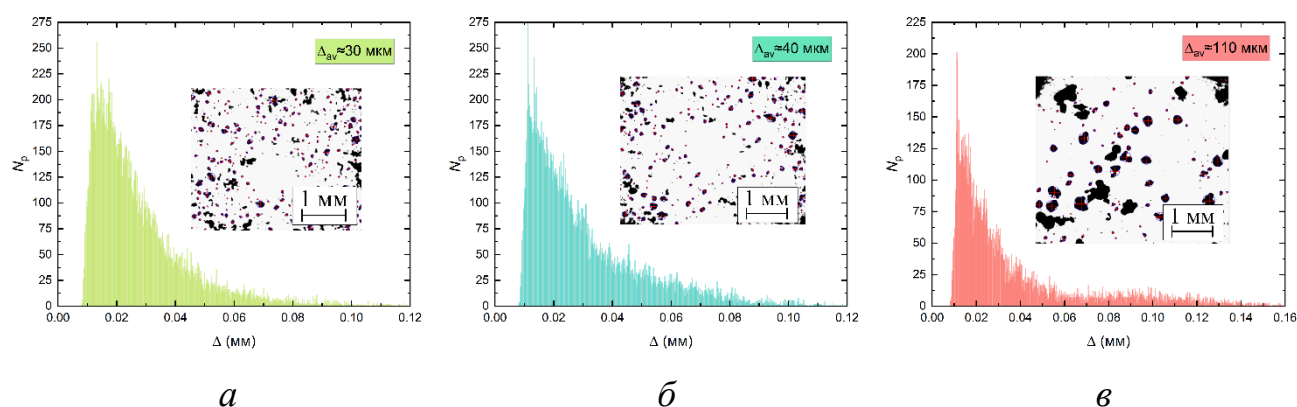


Рисунок 2.3.4 – Распределения угольных частиц по размерам с различной тониной помола: *а* – $\Delta_{av} \approx 30$ мкм; *б* – $\Delta_{av} \approx 40$ мкм; *в* – $\Delta_{av} \approx 110$ мкм.

Твердые компоненты также могут быть использованы в качестве дополнительных при реализации различных режимов микро-взрывного распада [12]. В качестве твердых компонентов капель суспензий были использованы

частицы каменного угля марки Д. В таблице 2.3.5 приведены основные свойства твердого компонентов суспензий. Варьировались концентрации компонентов и размеры твердых частиц в составе суспензий в следующих диапазонах: твердый компонент – 0–60 мас%; жидкий горючий компонент – 0–15 об%; жидкий негорючий компонент – 30–60 об%; размеры твердых частиц – 30–110 мкм. Выбор данных диапазонов обусловлен наиболее высокими интегральными показателями горения суспензионных топлив [154,155] при таких диапазонах.

Таблица 2.3.5 – Основные свойства твердых частиц [156] (T в °C).

Твердые частицы	Физические свойства
Каменный уголь (марка Д – длиннопламенный)	$\rho(T) = 0,003 \cdot T^2 - 1,4065 \cdot T + 1402,9 \text{ кг/м}^3$; $C(T) = 1154 \cdot T^{0,0346} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $k(T) = 0,0000009 \cdot T^2 - 0,0006 \cdot T + 0,2707 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$.

Для изучения влияния размеров твердых частиц в составе топливных композиций на процессы микро-взрывного распада приготавливалась угольная пыль с различной тониной помола ($\Delta_{av} \approx 30$ мкм; $\Delta_{av} \approx 40$ мкм; $\Delta_{av} \approx 110$ мкм) [157]. Использовались роторная мельница (Pulverisette 14 Fritsch), сита (для выделения необходимой фракции) и устройство рассева. Диапазон 40–140 мкм является наиболее часто используемым в промышленных технологиях (например, при высокотемпературном сжигании угольной пыли на тепловых станциях). Существующие энергетические установки оснащены оборудованием, необходимым для получения угольной пыли с таким гранулометрическим составом. Методика измельчения исходного угля аналогична использованной в [158]. Навеска твердого компонента добавлялась в объем рапсового масла. Суспензии перемешивались до однородной массы в течении 15 минут с помощью магнитной мешалки AIBOTE ZNCLBS-2500 (температура при перемешивании 298 ± 2 К, скорость вращения магнитного якоря 1500 об/мин). Контроль однородности приготовления суспензии производился с помощью световой системы и высокоскоростной видеокамеры. На рисунке 2.3.4 представлены

распределения размеров угольных частиц по размерам с различной тониной помола ($\Delta_{av} \approx 30$ мкм; $\Delta_{av} \approx 40$ мкм; $\Delta_{av} \approx 110$ мкм).

2.4 Методы экспериментальных исследований характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде

Характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде регистрировались с применением высокоскоростной видеосъемки. Обработка полученных изображений проводилась с использованием алгоритмов, заложенных в коммерческие программные комплексы (Actual Flow, DaVis, Phantom Camera Control), а также с использованием собственных программных кодов в Matlab. При обработке изображений регистрировался режим распада исходной капли, количество N_{cd} , радиусы r_{cd} и скорости движения u_{cd} вторичных фрагментов (рисунок 2.4.1).

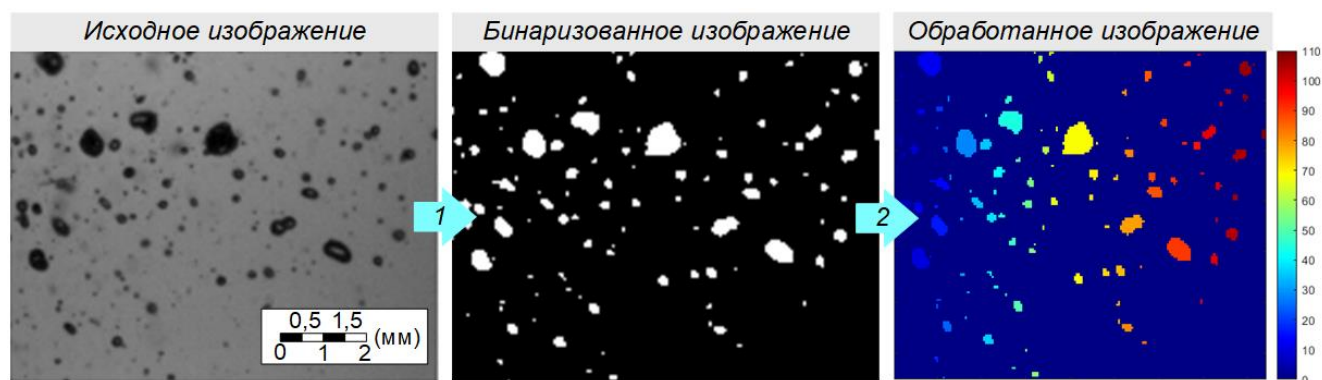


Рисунок 2.4.1 – Схема обработки видеокadres процесса микро-взрывного распада [135].

Для подсчета количества (N_{cd}) и размеров (r_{cd}) вторичных фрагментов применялся авторский код, написанный в программном комплексе Matlab. В основе алгоритма обработки изображений заложен метод Shadow Photography (SP). На исходных видеокadres, полученных в ходе экспериментов, определялись моменты, когда исходные капли распадались с образованием вторичных фрагментов, полученные изображения сохранялись в формате tiff и загружались в

программный комплекс Matlab. В процессе обработки совершался поиск односвязных областей по бинаризованному изображению. В итоге для каждого изображения создавалось нерегулярное поле данных, содержащее координаты центров капель и их размеры (радиусы) [135]. Не менее 3 пикселей соответствовало самым мелким вторичным фрагментам, образующимся при микро-взрывном распаде исходных капель. Учет глубины резкости объектива осуществлялся с применением многофункциональной калибровочной мишени. Полученные данные сравнивались с результатами, полученными в программном комплексе Actual Flow. Расхождения результатов обработки не превышали 3 %.

Эффективность вторичного измельчения оценивалась с помощью критерия, характеризующего отношение площадей свободной поверхности жидкости до (S_0) и после (S_1) микро-взрывного распада [135]. Поскольку съемка процессов микро-взрывного распада производилась в плоскости регистрации видеокамеры, не все вторичные фрагменты попадали в область регистрации. Полученное количество вторичных фрагментов умножалось на поправочный коэффициент для выполнения условия $V_0 = V_{cd}$ [159]. Итоговое выражение для вычисления отношения площадей свободной поверхности жидкости до и после распада имело вид:

$$S_1 / S_0 = (N_{cd} \cdot 4\pi r_{cd_av}^2) / (4\pi R_{d0}^2) = \frac{N_{cd} \cdot r_{cd_av}^2}{R_{d0}^2} = \frac{4 / 3\pi R_{d0}^3 r_{cd_av}^2}{4 / 3\pi r_{cd_av}^3 R_{d0}^2} = \frac{R_{d0}}{r_{cd_av}}. \quad (2.4.1)$$

Для слежения за перемещением межкомпонентной границы двухжидкостных капель, а также определения компонентного состава вторичных фрагментов использовалась методика на основе Laser Induced Fluorescence. При создании плоскости регистрации в капле использовался непрерывный лазер DPSS 2 “KLM-V532/h-10000” (длина волны – 532 нм; ширина спектральной линии – 0,1 нм; максимальная мощность – 10 Вт; нестабильность мощности излучения – 5%; диаметр пучка в апертуре – 3 мм). 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 воде составляла 500 мкг/л. Ранние исследования [160,161] показали, что такой концентрации достаточно для возникновения явления флуоресценции в

капле и последующего измерения интенсивности эмитированного красителем (флуорофором) излучения, а также не оказывает влияние на характеристики микро-взрывной фрагментации [162].

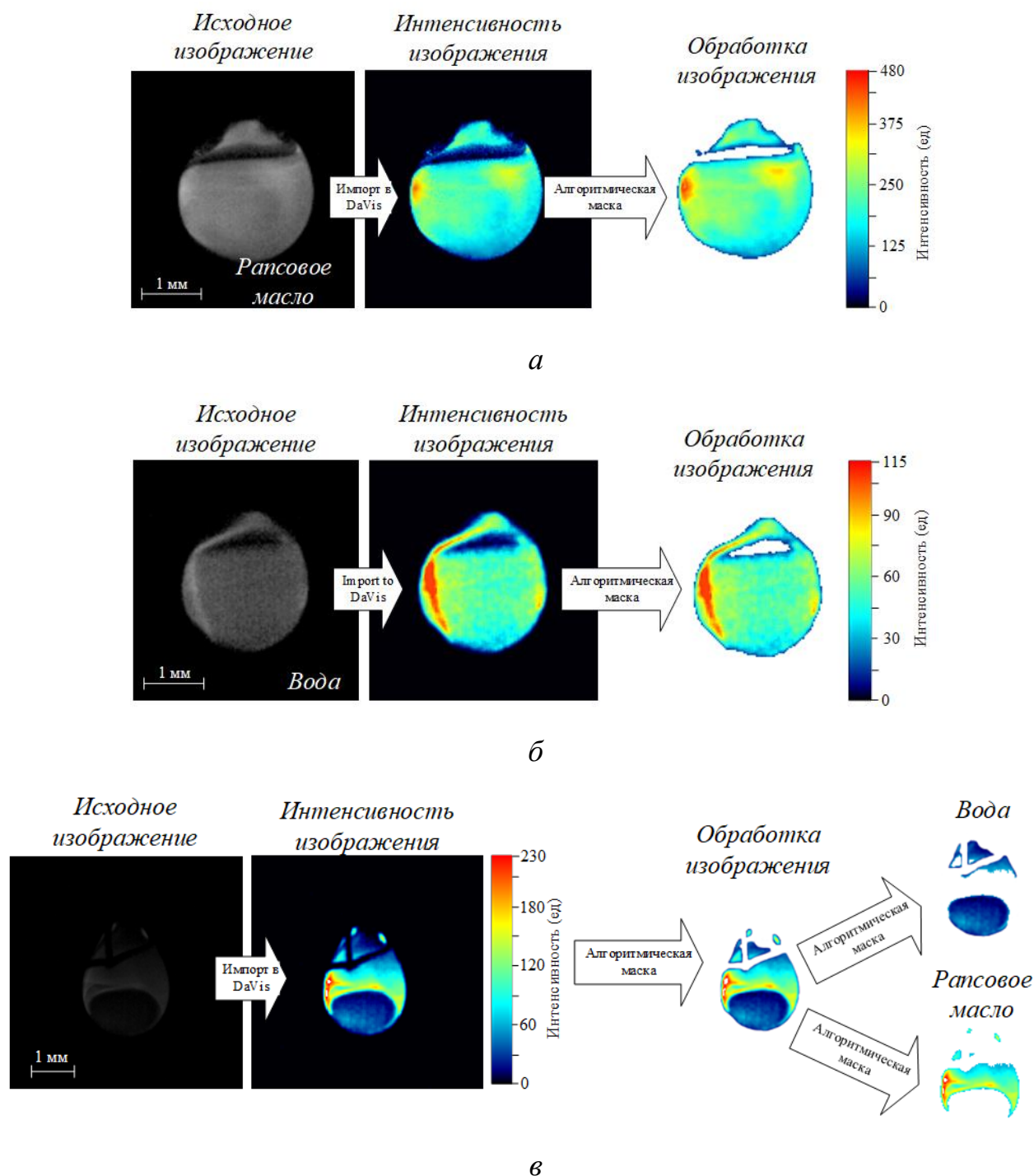


Рисунок 2.4.2 – Процедура обработки изображений для идентификации компонентов капель в ПО DaVis: *а* – светимость капель рапсового масла ($R_{d0}=1.061$ мм); *б* – светимость капель воды ($R_{d0}=1.061$ мм); *в* – разделение компонентов в двухкомпонентной капле ($R_{d0}=1.061$ мм).

Rhodamine В широко используется в качестве флуоресцентного красителя во многих приложениях из-за его высокой растворимости в воде и низкой стоимости. Спектры поглощения и испускания Rhodamine В, расположенные в видимой области (с полосами при 542 нм и 590 нм соответственно), легко возбуждаются коммерческими лазерами и позволяют регистрировать его флуоресценцию [46,47]. Эксперименты [48,49] ясно показывают, что рапсовое масло обладает флуоресцентными свойствами. Как и многие другие растительные масла, спектр флуоресценции рапсового масла имеет две основные полосы с центрами 580 нм и 675 нм при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм [49]. При исследовании компонентного состава использовался интерференционный фильтр с полосой пропускания 10 нм с центром около 600 нм, который был установлен перед камерой для визуализации флуоресценции капель.

Регистрация характеристик вторичных фрагментов проводилась с помощью высокоскоростной видеокамеры (при разрешении 1280×720 пикс и частоте регистрации 5400 кадров в секунду). Первичная обработка полученных видеogramм (определение характеристик вторичных фрагментов) проводилась с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Использование данного ПО позволило определить размеры и скорости движения капель. Систематическая погрешность при измерении размеров капель определялась величиной масштабного коэффициента, и составила 0,0052 мм/пикс.

Идентификация компонентного состава вторичных фрагментов проводилась на основании разницы светимости компонентов капель под действием лазерного излучения. 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 в состав двухжидкостных капель входила вода с Rhodamine В и рапсовое масло, которые имели разные диапазоны изменения светимостей, то накладывались две маски. Использовалась маска для отделения фона от капель рапсового масла. Вторая маска позволяла отделять капли воды с Rhodamine В от фона. Определение средней

интенсивности свечения проводилось в выделенной области регистрации за 50–1000 кадров, в зависимости от скорости процесса. Интенсивность свечения капель воды с Rhodamine B варьировалась от 4 до 140 ед, в то время как интенсивность свечения капель рапсового масла изменялась от 160 до 400 ед, в зависимости от температуры и размеров капель жидкостей. Светимость фона составляла не более 3 ед. Области с неравномерной подсветкой фона удалялись также с помощью наложения маски. Процедура обработки исходных видеок кадров с применением данной методики приведена на рисунке 2.4.2. При идентичных условиях проводилась серия из 5–10 экспериментов. Регистрировались светимости двухжидкостных капель, а также светимости образованных вторичных фрагментов.

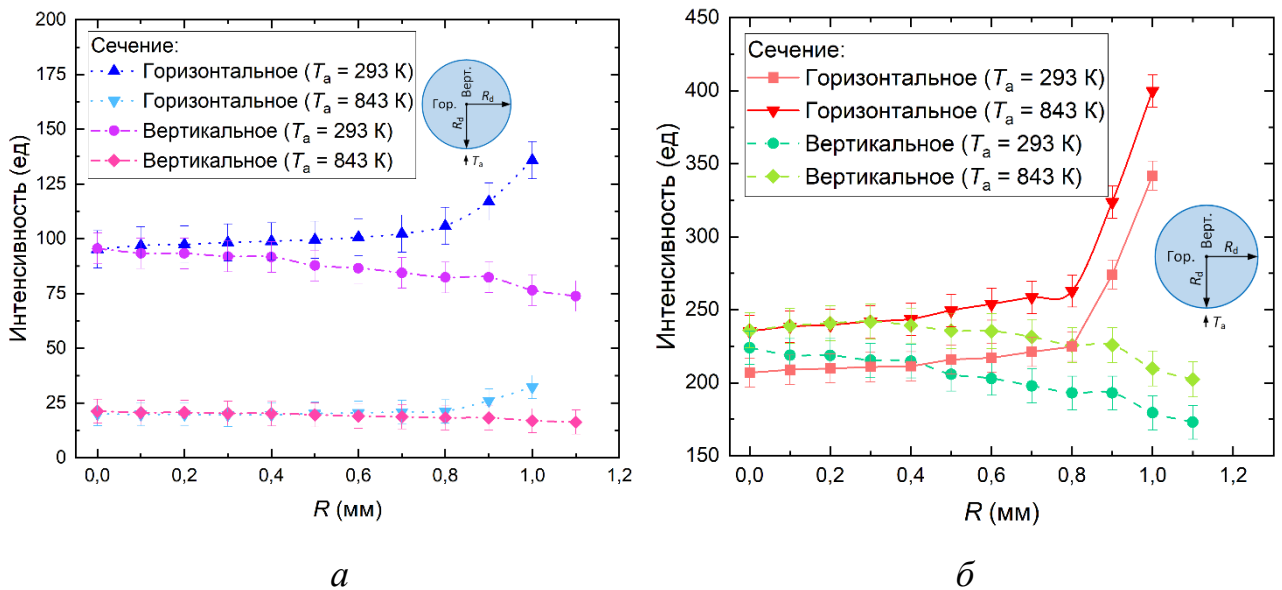


Рисунок 2.4.3 – Распределение светимости внутри однородной капли воды с растворенным Rhodamine B (а) и рапсового масла (б).

Для обработки видеок кадров фрагментации многокомпонентных капель использовалось ПО Davis. Применялась процедура сглаживания (Smoothing 3x3). Далее для удаления фона с изображений применялась алгоритмическая маска, с помощью которой с изображений удалялись пиксели со светимостью менее 3 ед. В результате применения данного фильтра на полученных изображениях регистрировались только двухжидкостные капли. На следующем этапе обработки

для разделения компонентов вода/рапсовое масло также применялась алгоритмическая маска. Изображение, полученное на предыдущем этапе, обрабатывалось с условиями, установленными на этапе калибровки. Пиксели с интенсивностью свечения менее 140 ед. характеризовали воду, а с интенсивностью свечения более 160 ед. – рапсовое масло. Используемые при обработке изображений диапазоны светимостей получены при обработке изображений одиночных и двухжидкостных капель. Распределения светимости жидкостей внутри однородных капель в горизонтальном и вертикальном сечениях приведены на рисунке 2.4.3.

2.5 Неопределенности измерений

Неопределенность измеряемых величин рассчитывалась в соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011 и включали систематические и случайные погрешности.

Для измерения радиусов исходных капель (R_{d0}) радиусов вторичных фрагментов (r_{cd}), их количества (N_{cd}), задержки между несколькими последовательными кадрами (τ), а также расстояния, пройденного каплей (l), использовалась высокоскоростная камера Phantom Miro M310 и программное обеспечение Phantom Camera Control. Систематическая погрешность определения геометрических характеристик (R_{d0} , r_{cd} , l) определяется значением масштабного коэффициента. Значения масштабного коэффициента в проведенных экспериментах варьировались от 0,0052 до 0,01 мм/пикс в зависимости от параметров съемки. При проведении экспериментов частота съемки варьировалась от 2000 до 10000 кадров в секунду. Систематическая погрешность определения временных характеристик (τ) определяется величиной межкадровой задержки, т.е. систематическая погрешность изменялась от 0,0005 до 0,0001 с в зависимости от параметров съемки. Также для обработки полученных изображений применялся собственный алгоритм, разработанный в программном комплексе Matlab, позволяющий определять размеры, количество и скорости вторичных фрагментов. Полученные данные сравнивались с результатами, полученными в программных

комплексах Actual Flow и Tema Automotive. Расхождения результатов обработки с применением различных алгоритмов не превышали 5 %.

Измерение температуры газовой среды и температуры поверхности подложки осуществлялось с применением комплекса сбора данных National Instruments 9219 и малоинерционных термопар типа К (ТХА). Систематическая погрешность измерения температуры не превышала ± 3 К в соответствии с паспортом завода изготовителя и сертификатом поверки средства измерения.

Измерение скорости газового потока осуществлялось с применением метода Particle Image Velocimetry. На погрешность измерения скорости может оказывать влиянием размер и концентрация трассеров в элементарной области, а также выбор алгоритма обработки. Погрешности измерения скоростей газового потока в проведенных экспериментах не превысили 3 % [163,164].

Для оценки случайных погрешностей рассчитывались доверительные интервалы. Для каждой экспериментальной точки проводилось не менее 5–10 экспериментов при идентичных условиях.

2.6 Результаты экспериментов и их обсуждение

2.6.1 Влияние температуры внешней газовой среды

Распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании температуры газовой среды представлены на рисунке 2.6.1.1. Эксперименты проводились при нагреве исходных капель в потоке разогретых газов (рисунок 2.2.2).

Установлено, что капле на основе исходного талового масла количество вторичных фрагментов в несколько раз выше, чем для других топливных композиций (рисунок 2.6.6.16). Установленные по результатам серии экспериментов распределения показывают, что за счет применения исходного талового масла в качестве высококипящего компонента можно получить в 2–3 раза больше вторичных фрагментов с минимальными размерами, чем при

отфильтрованном таловом масле или керосине. Результаты демонстрируют, что чем выше вязкость горючего компонента, тем больше вторичных фрагментов с меньшими размерами формируется в результате микро-взрывного распада [134].

При повышении температуры газовой среды в диапазоне температур от 673 до 783 К для всех исследуемых составов можно наблюдать значительный прирост площади свободной поверхности жидкости, распределения вторичных фрагментов смещаются в сторону меньших значений (смещаются пики распределений), а также возрастает их количество. С ростом температуры газовой среды увеличиваются скорости прогрева границы раздела воды/горючая жидкость, благодаря чему достигаются большие значения степени перегрева воды вблизи границы раздела, увеличивается энергия, запасенная в капле перед распадом. При цепной активации центров парообразования в капле давление паров становится выше атмосферного, что приводит к ее разрушению. Давление насыщенных паров воды увеличивается с ростом степени перегрева, это повышает интенсивность микро-взрывного распада. Соответствующие эффекты приводят к уменьшению размеров вторичных фрагментов [6,127].

Число Лапласа ($La = \sigma R_{d0} / \mu^2$), характеризующее отношение силы поверхностного натяжения и диссипативных сил для данных жидкостей отличаются на несколько порядков. Чем выше вязкость и поверхностное натяжение горючего компонента, тем меньше данная характеристика. Чем более вязкая жидкость, тем больше энергии, затрачиваемой на рост пузыря и необходимой для разрушения капли, переходит в теплоту. Накопление этой энергии в капле способствует повышению температуры жидкости и накоплению дополнительной энергии, выход которой интенсифицирует процесс фрагментации [134]. Сравнение отношения площадей после и до распада также демонстрирует, что наибольшего увеличения площади поверхности жидкости можно добиться при использовании сырого таллового масла. Зарегистрирован рост площади свободной поверхности жидкости более чем в 70 раз при температуре газовой среды 783 К. Данный показатель для керосина не превысил 45, а для отфильтрованного таллового масла – 60.

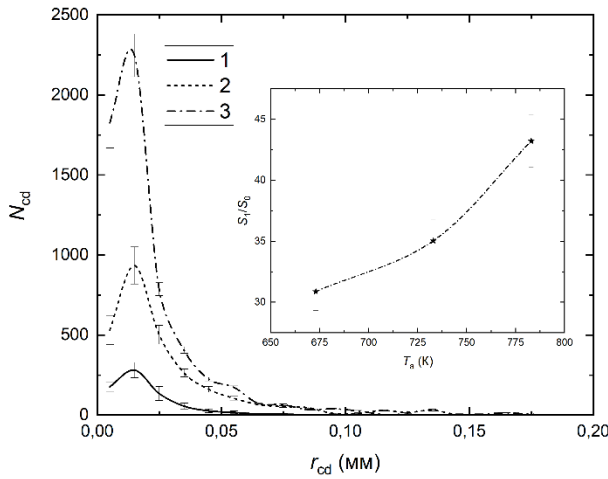
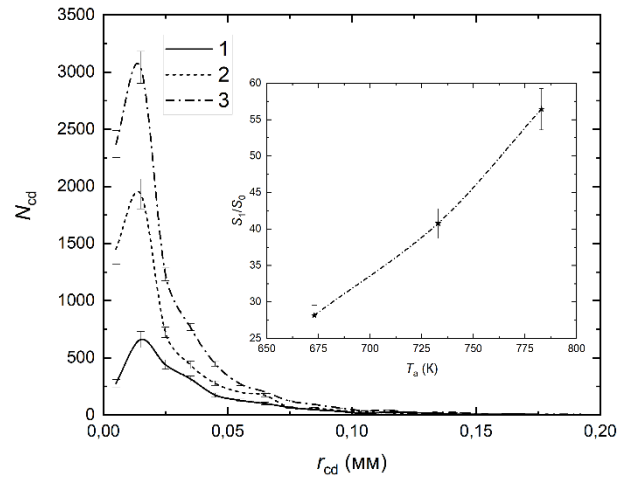
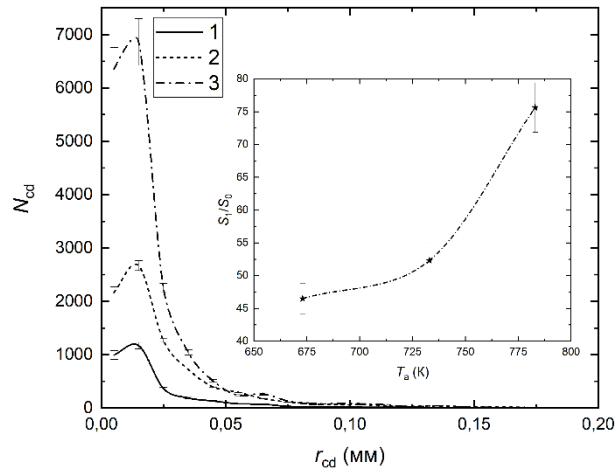
*a**б**в*

Рисунок 2.6.1.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам при микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель ($R_{d0} \approx 1,05$ мм) и отношения площадей свободной поверхности жидкости после и до распада (S_1/S_0) при варьировании температуры газовой среды: *a* – керосин 80 об.%, вода 20 об.%; *б* – отфильтрованное талловое масло 80 об.%, вода 20 об.%; *в* – сырое талловое масло 80 об.%, вода 20 об.% (1 – $T_a \approx 673$ К, 2 – $T_a \approx 733$ К, 3 – $T_a \approx 783$ К) [134].

2.6.2 Влияние схемы нагрева

На рисунке 2.6.2.1 показаны распределения размеров вторичных фрагментов для различных схем нагрева родительских капель: *a* – на разогретой поверхности (доминирует кондуктивный теплообмен); *б* – в потоке разогретых газов (доминирует конвективный теплообмен); *в* – в муфельной печи (доминирует

радиационный теплообмен). Схема экспериментального стенда с нагревом исходных двухжидкостных капель на разогретой поверхности представлена на рисунке 2.2.5, в потоке разогретых газов – на рисунке 2.2.1, в муфельной печи – на рисунке 2.2.4. Рассмотрены 4 композиции родительских капель: 1 – вода 90 об.%, дизельное топливо 10 об.%; 2 – вода 10 об.%, дизельное топливо 90 об.%; 3 – вода 90 об.%, рапсовое масло 10 об.%; 4 – вода 10 об.%, рапсовое масло 90 об.%. Начальный объем капель составлял 10 мкл.

Из рисунка 2.6.2.1 видно, что максимальное количество вторичных фрагментов образуется при кондуктивном нагреве, а минимальное – при радиационном. Также по рисунку 2.6.2.1 сформулирован вывод о том, что для капель с большим содержанием горючей жидкости размеры вторичных фрагментов на порядок меньше. Так, например, для композиций на основе дизельного топлива при радиационном нагреве отличия составляли в 3–4 раза. Очевидно, это связано с тем, что поверхностное натяжение жидкого горючего компонента существенно (в 2–3 раза) ниже, чем воды. С ростом температуры нагрева эта разница становится еще больше.

При анализе схем нагрева на рисунке 2.6.2.1 отмечено, что наиболее перспективной, с точки зрения минимальных времен прогрева и максимального количества вторичных фрагментов, выглядит схема с кондуктивным (на разогретой поверхности) нагревом. Проведенный анализ показал, что это связано со спецификой взаимодействия двухкомпонентной капли и подложки. Так как вода и горючий компонент в капле не перемешивались, то обеспечивался контакт воды с твердой нагретой стенкой. Это приводило к ее вскипанию практически по всему периметру, соответствующему границе раздела компонентов и взаимодействия со стенкой. Как следствие, она прогревалась до состояния кипения не локально, как в опытах с конвективной и радиационной схемой нагрева [133].

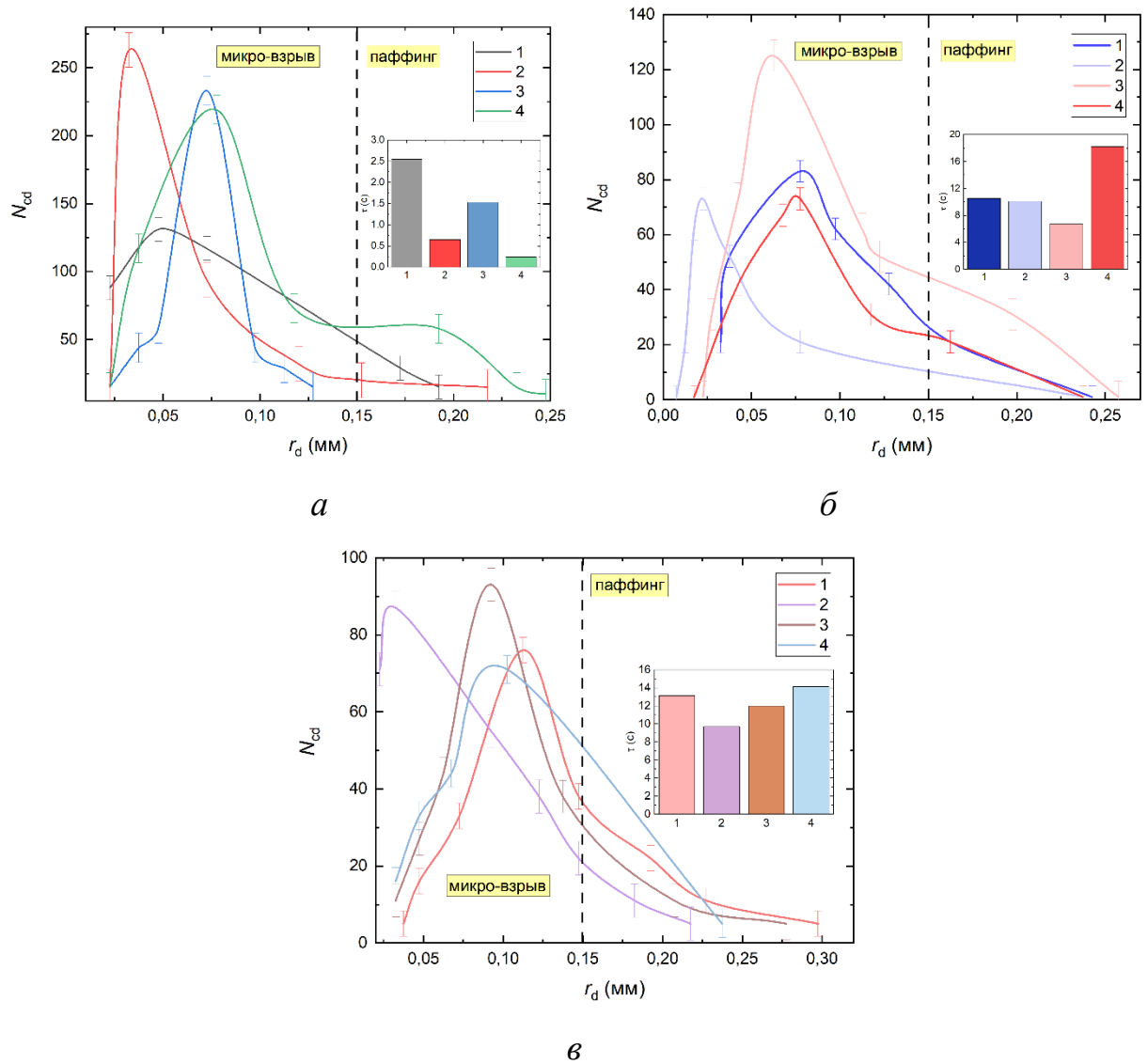


Рисунок 2.6.2.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам для различных схем нагрева ($R_{d0} \approx 1,34$ мм): *а* – на разогретой твердой поверхности ($T_s \approx 623$ К); *б* – в потоке разогретых газов ($T_a \approx 623$ К); *в* – в муфельной печи ($T_a \approx 623$ К): 1 – вода 90 об.%, дизельное топливо 10 об.%; 2 – вода 10 об.%, дизельное топливо 90 об.%; 3 – вода 90 об.%, рапсовое масло 10 об.%; 4 – вода 10 об.%, рапсовое масло 90 об.% [133].

Количество вторичных фрагментов на рисунке 2.6.2.1*а* ожидаемо превышало аналогичные значения параметра на рисунке 2.6.2.1*б* и рисунке 2.6.2.1*в*. Так как объем воды прогревался до состояния кипения за короткий интервал времени, то создались градиенты скорости конвекции и температуры в капле, которые способствовали значительной трансформации поверхности последней. Но важно отметить, что схема с кондуктивным нагревом имеет ограниченное применение в реальных технологиях вследствие значимого эффекта. Последний состоял в том,

что интенсивную фрагментацию капель при нагреве на стенке можно обеспечить лишь в условиях тонких пленок жидкости на поверхности последней. Если капли будут соударяться и налипать на поверхности, то образующийся слой жидкости будет существенно снижать подводимый тепловой поток к каждой последующей капле. Как следствие, вероятность достижения условий вскипания воды и фрагментации капель будет снижаться. Это будет приводить к реализации режима паффинг вместо микро-взрыва. При таких условиях можно интенсифицировать отвода тепла от нагретых поверхностей, но сложно обеспечить формирование мелкодисперсного аэрозольного облака из вторичных фрагментов.

Температура и тепловой поток влияют на характеристики вторичных фрагментов, образующихся при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель. При варьировании данных параметров можно добиться различных режимов распада исходных капель (паффинг, микро-взрыв или их последовательная реализация [6]).

2.6.3 Влияние начальной температуры негорючего компонента

На рисунке 2.6.3.1 представлены распределения вторичных фрагментов по размерам для трех начальных температур воды. Эксперименты выполнены с использованием экспериментального стенда, представленного на рисунке 2.2.1. В таблице 2.6.3.1 представлены значения минимальных, максимальных и средних размеров вторичных фрагментов для трех начальных температур воды.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что наименьший средний размер вторичных фрагментов наблюдался в экспериментах без предварительного нагрева водяного ядра. Несколько большие средние размеры были зафиксированы в опытах с начальной температурой водяного ядра 273 К. При предварительном нагреве водяного ядра отделяющиеся фрагменты имели переменный размер. Это приводило к увеличению среднего размера вторичных фрагментов и уменьшению их общего количества. С ростом температуры воды снижается ее вязкость и поверхностное натяжение, что способствует образованию

большого количества вторичных фрагментов с меньшими размерами. Из рисунка 2.6.3.1 видно, что при $T_{w0} \approx 300$ К образуется максимальное количество вторичных фрагментов с минимальными размерами, однако при $T_{w0} \approx 353$ К наблюдается укрупнение размеров вторичных фрагментов и уменьшение их количества. Как известно из [12], чем выше вязкость и поверхностное натяжение жидкости, тем больше напряжение, которое скапливается в капле перед микро-взрывом и тем больше эффективность вторичного измельчения (меньше размеры вторичных фрагментов), т.е. снижение вязкости и поверхностного натяжения воды при её нагреве приводит к тому, что внутренние напряжения в капле не успевают достичь критического значения для разрыва капли на мелкие фрагменты. В данном случае правомерен вывод о том, что существует оптимальное значение вязкости и поверхностного натяжения жидкости для достижения максимальной эффективности вторичного измельчения.

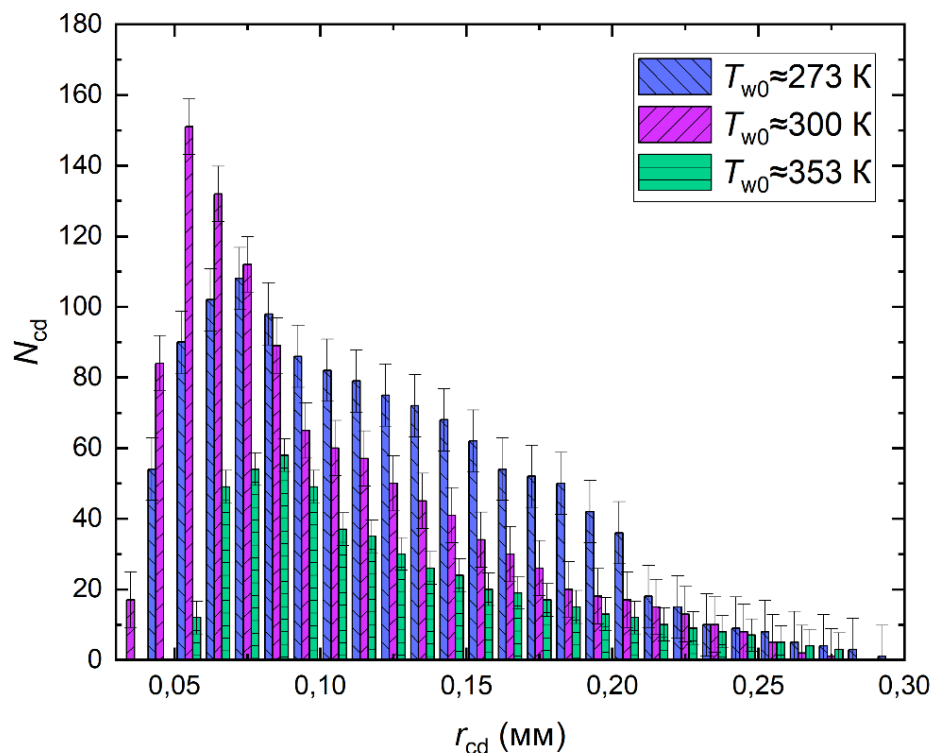


Рисунок 2.6.3.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании начальной температуры воды в составе двухжидкостных капель ($U_a \approx 3$ м/с, $T_a \approx 673$ К, $R_{d0} \approx 1,33$ мм, $\eta \approx 30$ об%).

Для оценки эффективности микро-взрывного распада на рисунке 2.6.3.2 приведены отношения площадей свободной поверхности жидкости после и до распада для трех начальных температур водяного ядра. Установлено, что максимальные отношения площадей свободной поверхности жидкости S_1/S_0 могут быть достигнуты, когда водяное ядро имеет минимальную температуру. При взаимодействии тонкой пленки воды с горючим компонентом интенсифицируется испарение горючей жидкости вокруг холодного ядра капли. Это указывает на то, что небольшое количество воды наиболее эффективно подходит для распыления горючего компонента. Чем ниже температура воды, тем меньше она диффундирует в горючий компонент и влияет на размеры вторичных фрагментов.

При сравнительном анализе количества и размеров вторичных фрагментов, образующихся в экспериментах при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, установлено, что для интенсивной фрагментации капли с меньшей температурой нагрева необходимо меньше времени и энергии. При этом даже площади поверхности вторичных фрагментов могут быть выше, как показано на 2.6.3.2. Для объяснения соответствующего результата сформулирована гипотеза о том, что компонентный состав вторичных капель при разных значениях T_{w0} (2.6.3.2) достаточно существенно отличается. Соответствующий вывод сформулирован при анализе светимости (интенсивности пропускания излучения) капель. Чем меньше температура воды в начальный момент времени, тем меньше капель в составе аэрозольного облака содержат частички льда или микрокапельки воды. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, при микро-взрыве достаточно много подведенной энергии расходуется на распад капли и, соответственно, меньше энергии остается на ее объемный прогрев. Во-вторых, даже сформировавшиеся (оторвавшиеся от основного агломерата) мелкие частички льда медленно перемешиваются с горючим компонентом. В-третьих, при пониженных температурах негорючий компонент имеет высокую вязкость и поверхностное натяжение, а горючий, наоборот, прогревается, и аналогичные характеристики снижаются. Поэтому размеры капелек горючего компонента существенно уменьшаются. В-четвертых, анализ кадров видеограмм показал, что

частишки льда и микрокапельки воды имели форму, существенно отличающуюся от сферической. Это способствовало дополнительной фрагментации, т.е. интенсифицировало нестабильность формы капель в составе облака. При нагреве же негорючего компонента его поверхностное натяжение и вязкость снижаются. Это приводит к перемешиванию горючего и негорючего компонентов. Эффективное (т.е. среднее с учетом объемных долей) значение поверхностного натяжения будет выше, чем для горючего компонента без воды. Соответственно, процесс распада капель будет протекать несколько медленнее и не так масштабно, как в случае с холодным горючим компонентом (рисунок 2.6.3.2). Поэтому при регистрации вторичных капель рост температуры нагрева воды приводил к тому, что практически для всех вторичных фрагментов интенсивность пропускания излучения повышалась (эти капельки содержали воду). На рисунке 2.6.3.2 видно, что чем больше температура нагрева, тем больше вклад выделенных факторов.

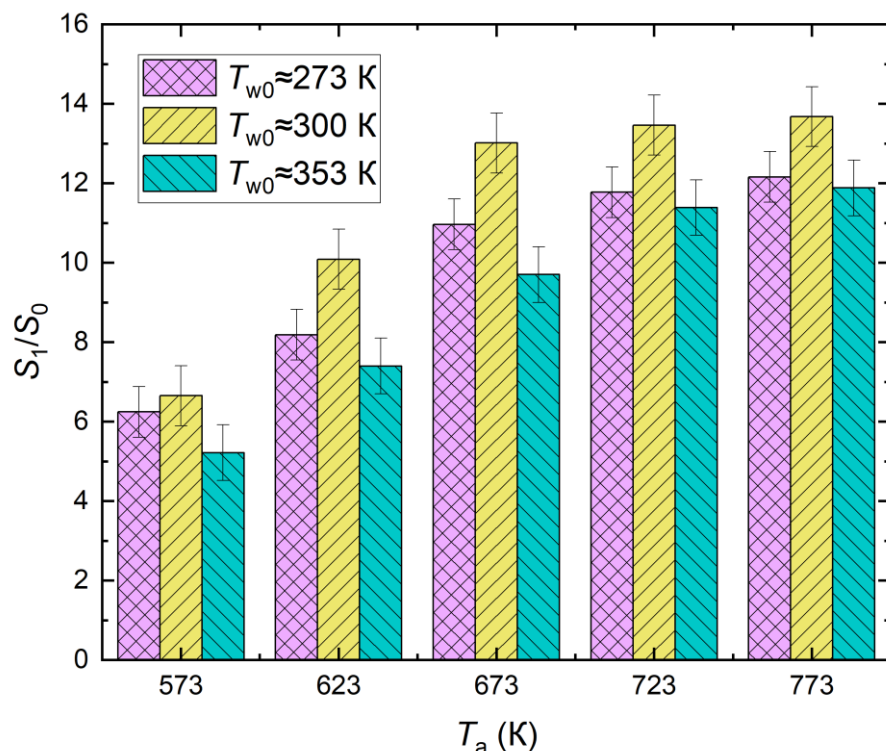


Рисунок 2.6.3.2 – Отношения площадей свободной поверхности после и до распада для трёх начальных температур воды при варьировании температуры газового потока ($U_a \approx 3$ м/с, $R_{d0} \approx 1,33$ мм, $\eta \approx 30$ об%).

Таблица 2.6.3.1 – Значения минимального, максимального и среднего размеров вторичных фрагментов для трех начальных температур водяного ядра. Параметры эксперимента: $R_{d0} \approx 1,33$ мм, $T_a = 673$ К.

T_{w0} , К	r_{cd_max} , мм	r_{cd_av} , мм	r_{cd_min} , мм
273	0,295	0,1209	0,045
300	0,275	0,1021	0,035
353	0,275	0,1241	0,055

В тоже время при анализе рисунка 2.6.3.2 выделены существенно отличающиеся по виду зависимости $S_1/S_0(T_a)$ при варьировании T_{w0} . Общим для трех кривых является явно выраженный асимптотический характер, т.е. при достижении определенных значений T_a отношение S_1/S_0 уже не растет. Это обусловлено влиянием нескольких факторов. Во-первых, чем выше температура нагрева, тем мельче вторичные фрагменты. Соответственно, при достижении определенных температур вторичные фрагменты настолько малы, что они практически сразу испаряются и выгорают после образования. Даже с применением высокоскоростной видеокамеры сложно зарегистрировать отличия по S_1/S_0 в таких условиях. Данные отличия не превышают погрешностей регистрации размеров вторичных фрагментов и, соответственно, отношения S_1/S_0 . Во-вторых, рост T_a приводит к существенному увеличению радиуса разлета вторичных фрагментов, т.е. последние движутся относительно друг друга на довольно больших расстояниях. Это также ускоряет процесс их уменьшения размеров вследствие испарения и влияния трансформирующих поверхность аэродинамических сил. В-третьих, капли воды и горючего компонента могут прогреться до определенной температуры, которая ограничена температурой кипения, т.е. выше нее нельзя нагреть жидкость. Даже в метастабильно состоянии температура жидкости может превышать значение температуры кипения на 5–10% (например, для капель воды максимальные температуры 393–398 К). Этот момент

также сдерживает рост функции $S_1/S_0(T_a)$. Главные отличия зависимостей $S_1/S_0(T_a)$ при варьировании T_{w0} связаны не только с диапазоном изменения S_1/S_0 , но и темпом роста, как функции T_a . Например, при T_{w0} около 293 К значения функции $S_1/S_0(T_a)$ растут медленно. Это связано с тем, что капля перегревается до состояния кипения воды локально, т.е. не во всем объеме. Вода имеет высокую теплоемкость и без предварительного нагрева ее температуру сложно довести до состояния кипения. Для локального нагрева тонкого приповерхностного слоя достаточно T_a от 573 до 773 К. При этом установлено, что паровые пузырьки объединяются и растут с малыми отличиями скоростей в этом диапазоне температур T_a . Если же предварительно нагревать воду, то темп роста значений функции $S_1/S_0(T_a)$ более высокий (рисунок 2.6.3.2). Это связано с тем, что в данном случае капля перегревается до состояния кипения воды практически по всему объему. Это приводит к существенно трансформации поверхности капли перед распадом, но так как протекает очень интенсивное испарение жидкости в течение этого периода времени, то значение отношения S_1/S_0 не может быть выше, чем в опытах с T_d около 293 К, т.е. общее количество жидкостных фрагментов ниже в парогазовой среде. Максимальный рост значений функции $S_1/S_0(T_a)$ в опытах с T_{w0} около 273 К обусловлено тем, что существенно больший объем воды переходит из состояния льда в жидкость и непосредственно фрагментирует. Это приводит к синергетическому эффекту, связанному с тем, что капельки негорючего компонента дополнительно измельчают капельки горючего компонента и придают им дополнительный импульс. Вследствие высокой относительной концентрации жидкостных фрагментов в аэрозольном облаке интенсифицируется их взаимодействие в режиме дробления. Таким образом, растет количество вторичных фрагментов горючего и негорючего компонентов. Соответственно, значение отношения S_1/S_0 становится максимальным (рисунок 2.6.3.2).

2.6.4 Влияние начального размера родительских капель

Эксперименты по изучению влияния начального размера исходных капель на характеристики вторичных фрагментов выполнены с использованием экспериментального стенда, представленного на рисунке 2.2.1. Рисунок 2.6.4.1 иллюстрирует распределения размеров вторичных фрагментов, полученные при использовании в экспериментах различных начальных объемов (соответственно, и размеров) двухжидкостных капель. Установлено, что для каждого из исследованных составов есть критический начальный размер исходной двухкомпонентной капли, при котором формируется максимальное количество вторичных фрагментов (соответственно, с минимальными размерами). Так, например, для двухжидкостной капли с объёмной концентрацией дизельного топлива 90 об% и начальным объемом капли 10 мкл количество вторичных фрагментов максимально, а для капель с начальными объемами 15 мкл и 5 мкл ниже и сопоставимо между собой. В случае двухжидкостной капли на основе рапсового масла на рисунке 2.6.4.1 показано, что чем больше начальный объем исходной капли, тем больше количество вторичных фрагментов и выше значения отношения S_1/S_0 . В опытах с бензином, керосином и маслом установлены тенденции, близкие к представленным на рисунке 2.6.4.1 для дизельного топлива. Рациональный (с позиции получения максимального количества вторичных фрагментов) начальный размер капли существенно зависит не только от концентрации компонентов, но и свойств последних. Чем выше поверхностное натяжение горючего компонента (на примере рапсового масла в сравнении с дизельным топливом на рисунке 2.6.4.1), тем больше размеры исходной капли требуются для распада. Данный эффект обусловлен тем, что капли с высоким поверхностным натяжением можно измельчить при повышенных значениях чисел Вебера и большей степени трансформации (часто называют неустойчивостью) поверхности. Оба этих критерия выполняются при повышенных начальных размерах капель. Если же жидкости в составе капли имеют небольшое поверхностное натяжение, то их измельчение с получением аэрозольного облака

вторичных фрагментов возможно и при некоторых средних начальных размерах, как показано для капли дизель / вода на рисунке 2.6.4.1. Очевидно, что при проведении широкомасштабных экспериментов в дальнейшем можно определить зависимости оптимальных (достаточных для получения вторичных фрагментов с требуемым количеством или размерами) начальных размеров двух- и многокомпонентных капель, как функций от температуры или теплового потока, а также концентрации горючей жидкости (или воды) с соответствующими свойствами. Влияние последних обобщается с применением чисел Онезорге, Лапласа или капиллярности (учитывают вклад плотности, вязкости, поверхностного натяжения). По результатам проведенных исследований сделан вывод о наличии экстремума функций $N(r_d)$ от начального объема (размера) исходной капли. Установление таких экстремумов важно для адекватного прогнозирования условий получения облака из вторичных фрагментов с требуемыми размерами [133].

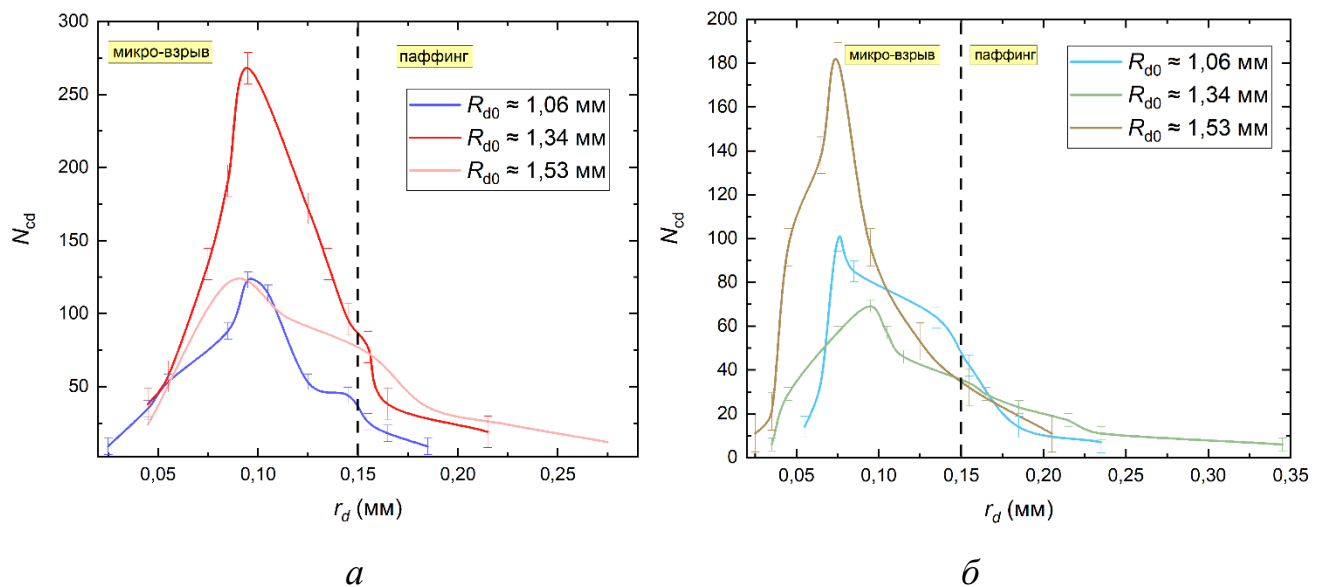


Рисунок 2.6.4.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам для различных начальных объемов двухжидкостных капель при $T_a \approx 673$ К: *а* – дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%; *б* – дизельное топливо 10 об%, вода 90 об% [133].

Полученный результат свидетельствует о том, что необходимо рационально выполнять первичное измельчение капель, чтобы достичь максимальные эффекты

по увеличению площади поверхности испарения в режиме вторичного измельчения. При первом рассмотрении проблемы можно было предположить, что чем выше значение размера исходной капли, тем больше будет количество образующихся вторичных фрагментов. Но проведенные эксперименты позволили выделить наличие определенного оптимума (экстремума). Это обусловлено тем, что слишком мелкие исходные капли интенсивно прогреваются и испаряются. Это приводит к тому, что в процессе микро-взрывной фрагментации образуется меньше вторичных фрагментов. Слишком большие исходные капли прогреваются существенно неравномерно и фрагментируют с образованием ярко выраженных крупных элементов в аэрозоле. В частности, в экспериментах [141] с применением метода PLIF регистрировались поля температуры, которые показали локальные области с достижением значений, соответствующих вскипанию воды. Как следствие, вязкости и межфазные натяжения, скорости конвекции в разных слоях такой капли могут отличаться в несколько раз. Это приводит к формированию полидисперсного аэрозоля при фрагментации исследованных капель как в режиме паффинга, так и микро-взрыва.

2.6.5 Исследование компонентного состава вторичных фрагментов

На рисунке 2.6.5.1 приведены установленные распределения вторичных фрагментов по размерам для двухжидкостных родительских капель при варьировании концентрации горючей жидкости от 10 об% до 90 об% с начальным размером $R_{d0}=1.061$ мм при нагреве на разогретой поверхности с температурой $T_s \approx 573$ К. Показано, что с ростом концентрации рапсового масла в двухжидкостной капле увеличивается диапазон изменения размеров вторичных фрагментов, а также их количество. Наименьшие размеры вторичных фрагментов рапсового масла зарегистрированы при его минимальной концентрации (минимальной толщине топливной пленки). Справедлив вывод о том, что чем меньше толщина топливной пленки вокруг водяного ядра, тем мельче образующиеся вторичные фрагменты рапсового масла. Также стоит отметить укрупнение вторичных фрагментов с водой

и рапсовым маслом, а также снижение их количества при равном соотношении концентраций компонентов (рисунок 2.6.5.1б). При таких условиях вторичное измельчение протекало малоэффективно.

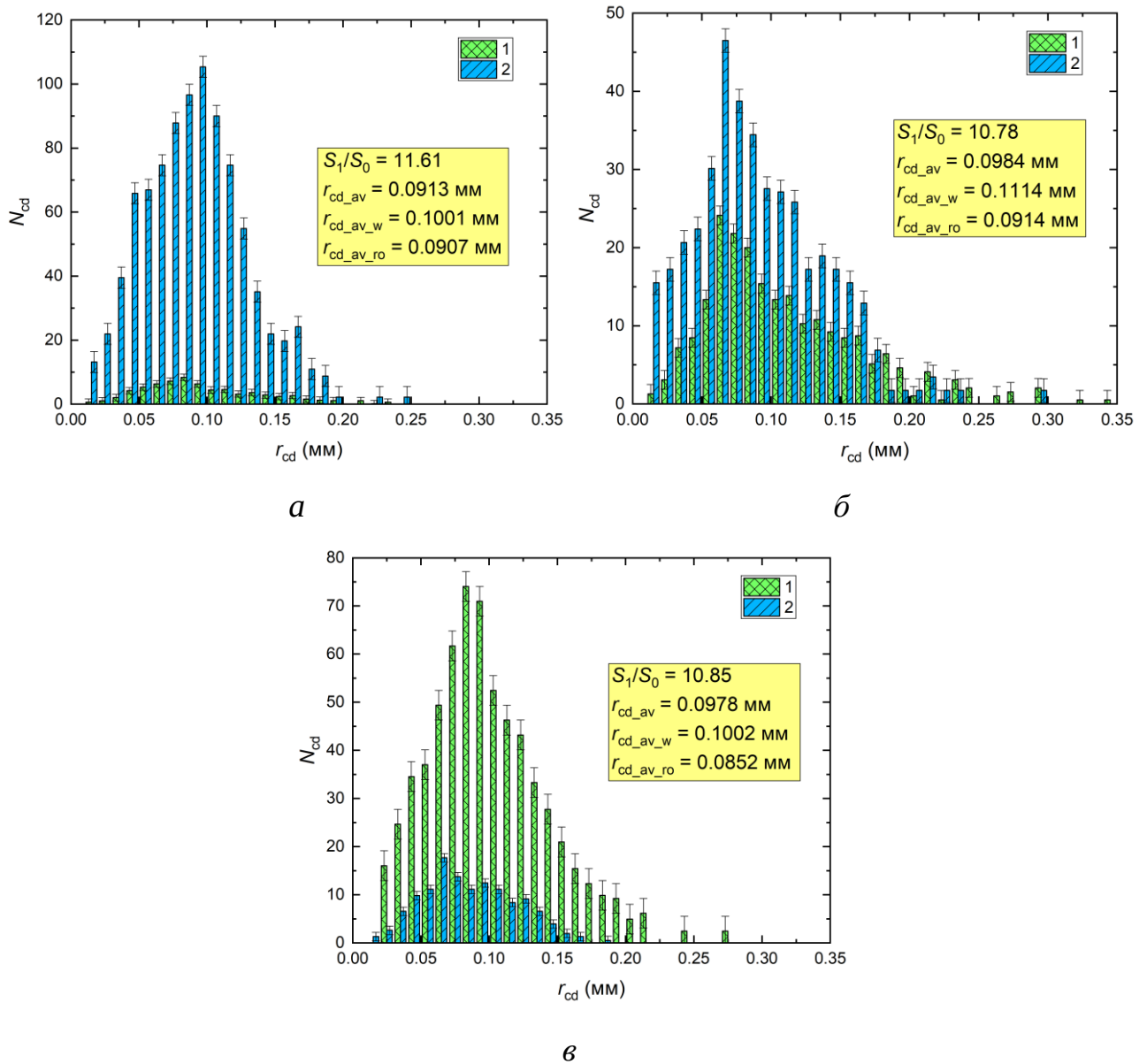


Рисунок 2.6.5.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам (концентрация рапсового масла: а – 90 об.%, б – 50 об.%, в – 10 об.%; $T_s \approx 573$ К; $R_{d0} \approx 1,06$ мм) на разогретой подложке для режимов фрагментации паффинг/микровзрыв: 1 – вторичные фрагменты воды; 2 – вторичные фрагменты рапсового масла.

Аналогичные закономерности обсуждены в [6,133]. Они обусловлены одновременным протеканием совокупности взаимосвязанных процессов (росту

прочности приповерхностного слоя капли и снижению ее теплоемкости) [6]. В данном случае достаточно сложно организовать быстрый и эффективный локальный перегрев межкомпонентной границы. В случае, когда концентрация воды в капле мала (не более 10 об.%), масло быстро прогревается выше температуры кипения воды. Это приводит к более равномерному прогреву межкомпонентной границы по всей ее площади. Достигается наибольшая степень перегрева. В данном случае возможна быстрая активация совокупности центров парообразования вблизи межкомпонентной границы. Вероятность реализации режима микро-взрыв значительно повышается. Более высокая вязкость топливной композиции позволяет накопить большее количество энергии, которое будет высвобождено при возникновении микро-взрыва. В тоже время, когда концентрация воды в капле высокая (более 90 об.%), рапсовое масло образует тонкую топливную оболочку. Последняя быстро прогревается до высоких температур, что приводит к локальному перегреву воды вблизи межкомпонентной границы (по направлению нагрева капли). Типичные температурные поля внутренних водяных капель для описанных случаев представлены в [118]. Когда объемные концентрации воды и рапсового масла равны (50 об.%), то замедляется прогрев межкомпонентной границы до состояния кипения воды.

Рисунок 2.6.5.1 демонстрирует, что во всех экспериментах вторичные фрагменты рапсового масла имеют меньшие размеры и, как следствие, большее количество. В первую очередь, это обусловлено тем, что поверхностное натяжение рапсового масла ниже, чем поверхностное натяжение воды. При нагреве данная разница существенно увеличивается. Это приводит к тому, что пленку рапсового масла, окружающую водяное ядро, проще раздробить на более мелкие фрагменты, чем водяное ядро. Образование более крупных фрагментов воды является нежелательной тенденцией для технологий сжигания жидких топлив, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей. Крупные вторичные фрагменты воды сложно быстро испарить из-за высокой теплоемкости, что приводит к снижению эффективности смешивания паров воды с парами топлива, уменьшению топливной эффективности, повышению вероятности налипания

таких капель на стенки теплообменных аппаратов. Сформулировано заключение о том, что оптимальным, с точки зрения достижения минимальных размеров вторичных фрагментов, является состав с минимальной концентрацией негорючего компонента (объемная доля воды не более 10 об.%).

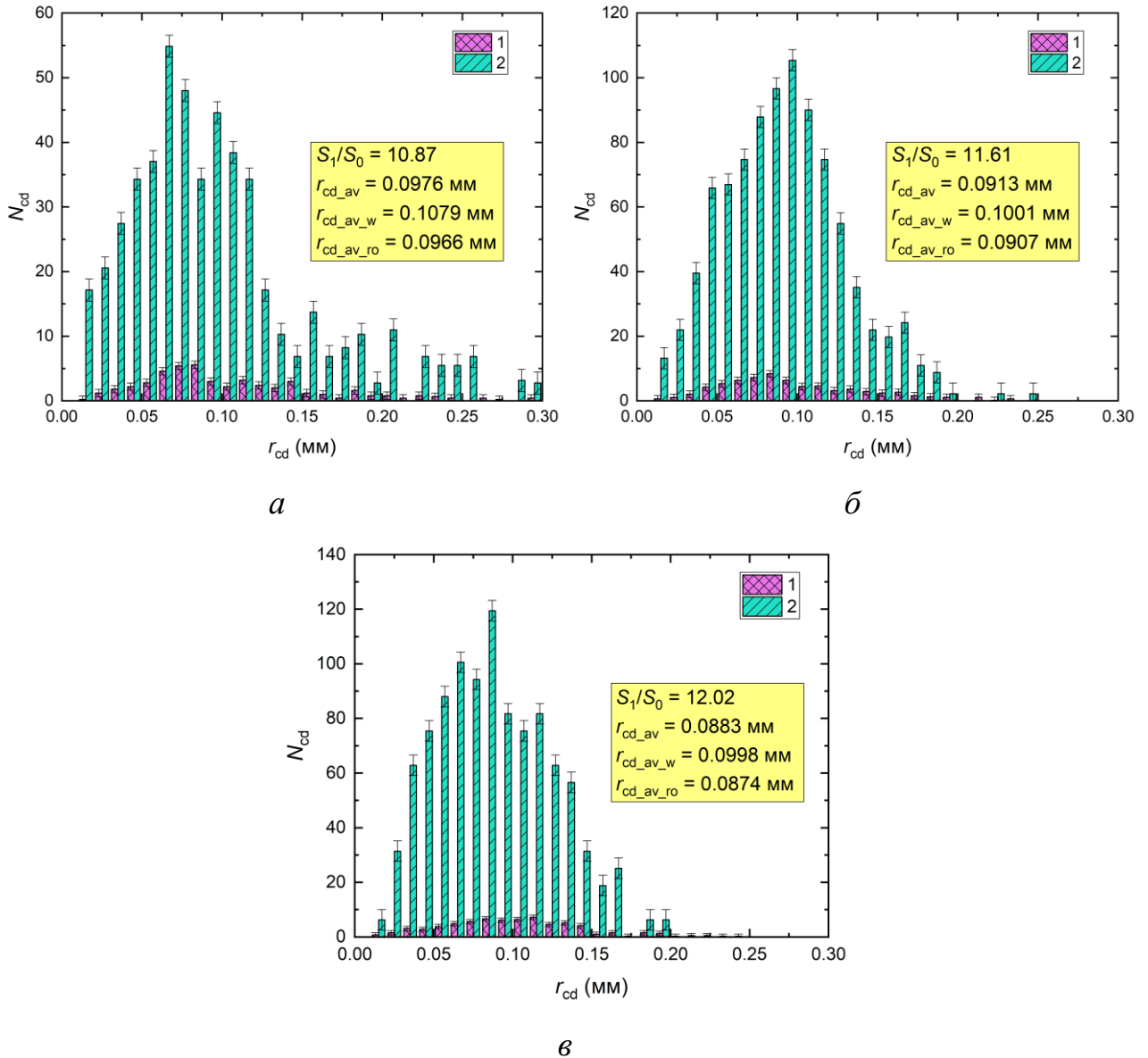


Рисунок 2.6.5.2 – Распределения вторичных фрагментов по размерам ($\eta \approx 90$ об.%; $R_{d0} \approx 1,06$ мм; *а* – $T_s \approx 473$ К, *б* – $T_s \approx 573$ К, *в* – $T_s \approx 673$ К) на разогретой подложке для режимов фрагментации паффинг/микро-взрыв: 1 – вторичные фрагменты воды; 2 – вторичные фрагменты рапсового масла.

На рисунке 2.6.5.2 приведены распределения вторичных фрагментов по размерам для двухжидкостных капель при нагреве на разогретой подложке для режимов паффинг/микро-взрыв при варьировании температуры поверхности от 473 до 673 К. С ростом температуры поверхности подложки распределения вторичных фрагментов по размерам смещаются в сторону меньших значений. С ростом температуры интенсивность фрагментации увеличивается, достигаются большие значения степени перегрева, увеличивается энергия, запасенная в капле перед фрагментацией, происходит смена режимов от паффинга к микро-взрыву. Соответствующие эффекты приводят к уменьшению размеров вторичных фрагментов [6,133].

При анализе влияния температуры подложки на компонентный состав вторичных фрагментов сформулирован вывод о том, что с увеличением температуры поверхности подложки, как для вторичных фрагментов рапсового масла, так и для вторичных фрагментов воды, имеются общие тенденции, которые схожи с описанными нами ранее результатами. Поверхностное натяжение жидкостей значительно снижается с увеличением температуры, что, в свою очередь, приводит к разрушению исходной капли на более мелкие фрагменты [6,133]. Рисунок 2.6.5.2 показывает, что температура подложки оказывает ограниченное влияние на изменение компонентного состава вторичных фрагментов. С ростом температуры подложки происходит снижение размеров вторичных фрагментов. В этом направлении возможна оптимизация режимов работы технологического оборудования.

На рисунке 2.6.5.3 приведены распределения вторичных фрагментов по размерам для двухжидкостных капель при нагреве на разогретой подложке для режимов паффинг/микро-взрыв при варьировании начальных размеров родительских капель от 0,984 до 1,127 мм. Выбор диапазона изменения начальных размеров родительских капель обусловлен тем, что капли меньших размеров не срываются с держателя, а капли больших размеров самопроизвольно срываются с держателя. Установлено, что с увеличением начальных размеров капель распределения вторичных фрагментов смещаются в сторону больших размеров.

Это обусловлено тем, что для капель большего объема требуется больше времени для достижения условий микро-взрывной фрагментации. Капли больших размеров прогреваются более неравномерно из-за чего фрагментация происходит локально, что приводит к образованию более крупных вторичных фрагментов. С ростом начального размера родительских капель укрупняются размеры вторичных фрагментов. Данная тенденция объясняется тем, что снижаются скорости нагрева воды в двухжидкостной капле. Следовательно, снижается степень перегрева воды перед микро-взрывным распадом. Укрупнение начальных размеров капель также, как и снижение температуры нагрева, приводит к смене режима распада (микро-взрыв изменяется на паффинг), который характеризуется более крупными вторичными фрагментами.

Анализ изменения компонентного состава (рисунок 2.6.5.3) показывает, что при варьировании начального размера двухжидкостных капель в исследуемом диапазоне размеры вторичных фрагментов воды меняются слабее, чем рапсового масла. При увеличении начального размера родительских капель от 1,061 мм до 1,127 мм размеры вторичных фрагментов воды практически не изменяются. Сформулирован вывод о том, что наибольшее влияние на изменение характеристик фрагментации оказывает именно изменение размеров вторичных фрагментов рапсового масла.

Поскольку основным условием инициирования паффинга/микро-взрыва является достижение на межкомпонентной границе температуры нуклеации воды [126], то справедливо предположение о том, что достигаемая степень перегрева межкомпонентной границы снижается. Это приводит к снижению скорости фазового перехода из жидкости в пар. Давление паров в объеме капли растет медленнее, чем для капель меньших размеров. Увеличение толщины пленки рапсового масла вокруг внутренней водяной капли ведет к тому, что парам воды сложнее преодолеть вязкую топливную оболочку. Совокупность этих эффектов приводит к тому, что в момент фрагментации разница силы давления паров, разрывающая каплю изнутри, и поверхностного натяжения, удерживающая жидкость в объеме капли, ниже, чем в случае с каплями меньшего размера.

Укрупнение исходных капель при первичном распылении жидкости снижает эффективность их вторичного измельчения.

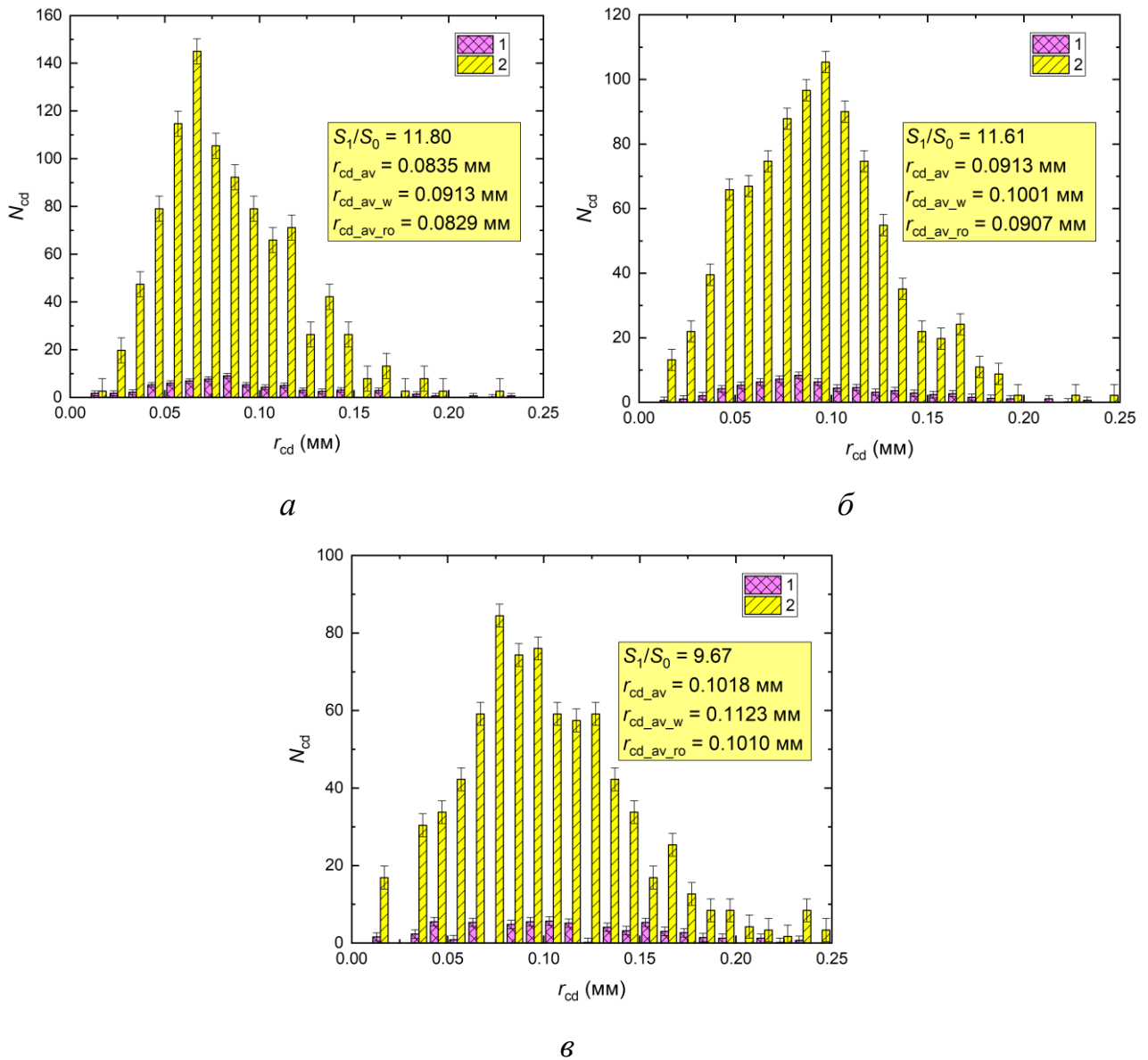


Рисунок 2.6.5.3 – Распределения вторичных фрагментов по размерам ($\eta \approx 90$ об.%; $T_s \approx 573$ K; а – $R_{d0} \approx 0,98$ мм, б – $R_{d0} \approx 1,06$ мм, в – $R_{d0} \approx 1,13$ мм) на разогретой подложке для режимов фрагментации паффинг/микро-взрыв при: 1 – вторичные фрагменты воды; 2 – вторичные фрагменты рапсового масла.

На рисунке 2.6.5.4 приведены установленные распределения вторичных фрагментов по размерам для состава рапсовое масло 50 об.%, вода 50 об.% с начальным размером $R_{d0} = 1,061$ мм при разных схемах нагрева: в пламени (при $T_a \approx 1120$ K) – а, в муфельной печи (при $T_a \approx 573$ K) – б, на разогретой подложке (при

$T_s \approx 573$ K) – в. При всех использованных схемах нагрева вторичные фрагменты рапсового масла имеют меньшие размеры, которые меняются в более узком диапазоне, чем вторичные фрагменты воды. Из всех исследованных схем нагрева наибольшую эффективность показала схема с нагревом исходных капель в пламени горелки (рисунок 2.6.5.4а). В данном случае регистрировалось наибольшее соотношение площади поверхности жидкости после и до микро-взрывного распада, а также минимальные размеры вторичных фрагментов воды и рапсового масла. Эксперименты в пламени проводились при более высоких температурах ($T_a \approx 1120$ K), чем в муфельной печи (рисунок 2.6.5.4б) и на разогретой подложке (рисунок 2.6.3.4в). Это способствовало достаточно быстрому достижению условий микро-взрывного распада на межкомпонентной границе и более эффективному вторичному измельчению. Количество вторичных фрагментов при нагреве в пламени существенно выше, чем при нагреве в муфельной печи и на разогретой подложке, а их размеры варьировались в узком диапазоне. При более высоких температурах размеры вторичных фрагментов значительно уменьшаются вследствие их испарения. Сравнение схем нагрева в муфельной печи (рисунок 2.6.5.4б) и на разогретой подложке (рисунок 2.6.5.4в) показывает, что последняя более эффективна, с точки зрения вторичного измельчения – получения капель меньших размеров.

В опытах с муфельной печью установлено, что средние размеры воды и рапсового масла достаточно близки, в то время как при нагреве на разогретой подложке размеры вторичных фрагментов отличаются более существенно (размеры вторичных фрагментов рапсового масла практически в 1,5 раза меньше, чем воды). Правомерен вывод о том, что при нагреве двухжидкостной капли в муфельной печи распыление компонентов исходной капли в результате микро-взрывного распада происходит более равномерно, чем при нагреве на разогретой подложке.

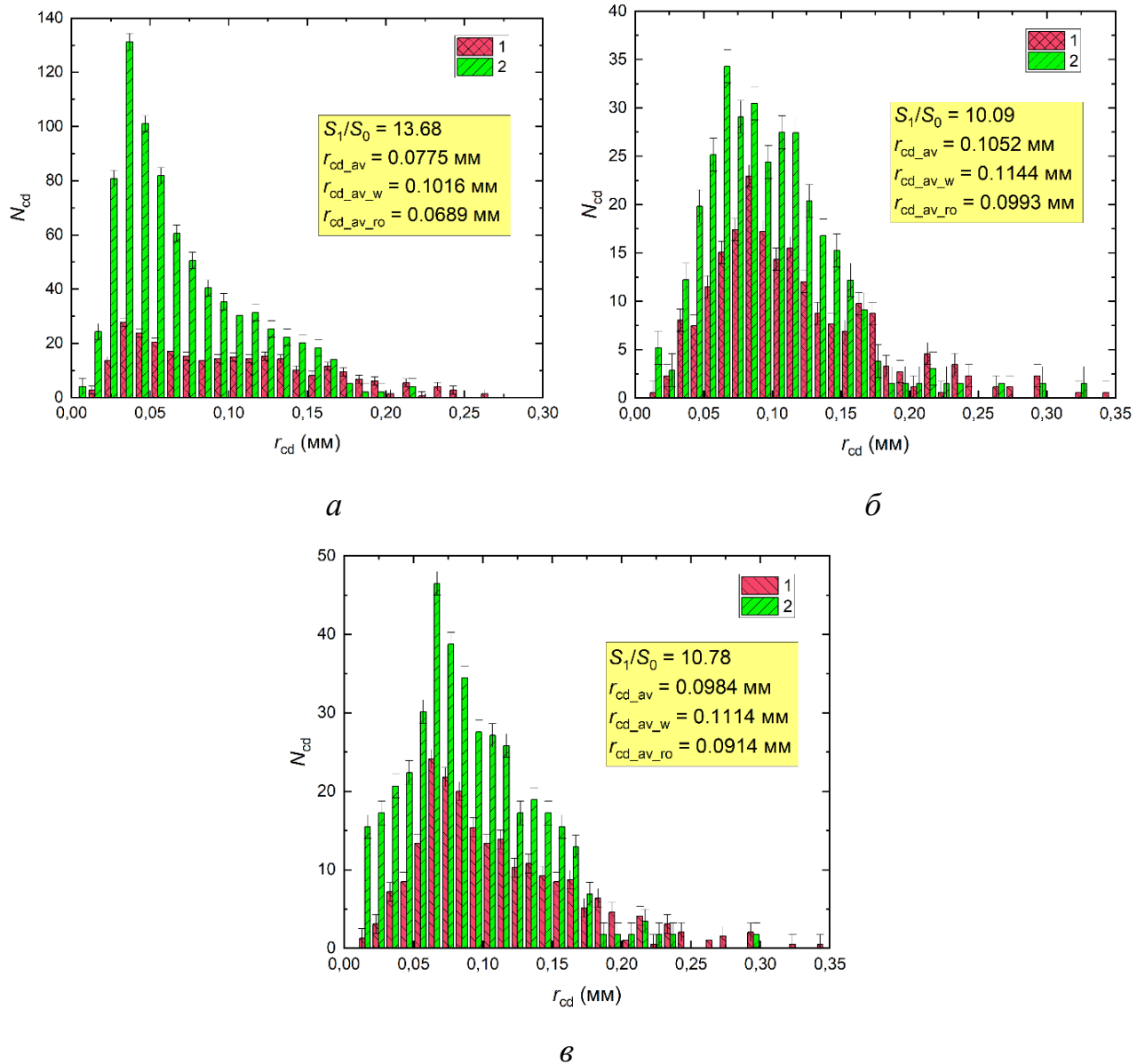


Рисунок 2.6.5.4 – Распределения вторичных фрагментов по размерам ($\eta \approx 50$ об.%, $R_{d0} \approx 1,06$ мм) при разных схемах нагрева для режимов фрагментации паффинг/микро-взрыв (*а* – при нагреве в пламени, $T_a \approx 1120$ К; *б* – при нагреве в муфельной печи, $T_a \approx 573$ К; *в* – при нагреве на разогретой подложке, $T_s \approx 573$ К): 1 – вторичные фрагменты воды; 2 – вторичные фрагменты рапсового масла.

2.6.6 Влияние вязкости и поверхностного натяжения жидкостей

Эксперименты по изучению влияния вязкости, поверхностного и межфазного натяжения капель эмульсий на характеристики вторичный фрагментов при микро-взрывном распаде были выполнены с использованием экспериментального стенда, представленного на рисунке 2.2.1. На рисунке 2.6.6.1 представлены типичные

диаграммы с иллюстрацией количества и размеров вторичных фрагментов для различных составов при варьировании вязкости. Увеличение вязкости эмульсии ведет к росту времени задержки распада, вследствие чего растут градиенты температуры и давления в капле. Это приводит к ее более интенсивному разрушению, сопровождающемуся ростом количества вторичных фрагментов в целом, а иногда и снижению их среднего размера, соответственно. Однако согласно полученным распределениям максимальное число образовавшихся вторичных фрагментов зарегистрировано для состава дизельное топливо 80 об%, дизельное топливо с полимером 10 об%, вода 10 об%. Сформулирован вывод о том, что увеличение вязкости способствует повышению интенсивности дробления лишь до определенного предела. Повышение вязкости капли эмульсии способствует не только увеличению энергии внутреннего трения капли, но также увеличению размеров вторичных фрагментов, что является нежелательным эффектом при реализации вторичного измельчения. Добавление эмульгатора в состав исследуемой эмульсии увеличивает средний размер образующихся вторичных фрагментов, так как капля эмульсии с меньшим размером капелек дисперсной фазы является более стабильной композицией. Как следствие, её сложнее измельчить с применением микро-взрывного распада.

С ростом вязкости исходных топливных композиций форма вторичных фрагментов приближалась к сферической. Для композиций с низкой вязкостью форма вторичных фрагментов чаще соответствовала эллипсоидам и телам вращения с более сложной конфигурацией. Чем больше размер таких вторичных капель, тем выше вероятность дополнительного измельчения, т.е. можно организовать несколько последовательных этапов измельчения за счет микро-взрывного распада или разрушения при движении в газовой среде. При этом видеодиаграммы проведенных опытов показали, что чем меньше доля негорючего компонента остается в капельках, тем быстрее они прогреваются и диспергируют. При анализе рисунка 2.6.6.1 целесообразно добавить, что добавление полимера в состав дизельного топлива с целью его загущения (повышения вязкости) способствовало появлению явно выраженных пиков (экстремумов) на

распределениях. Чем выше концентрация добавки полимера, тем в сторону большего среднего размера вторичных фрагментов смещался экстремум. Наиболее эффективные условия вторичного измельчения могут быть достигнуты при добавлении полимера, как загустителя, но с минимальной концентрацией (не выше 5 об%). В таком случае (второе распределение на рисунке 2.6.6.1) возможно получение повышенного количества мелких вторичных фрагментов при минимальных временах прогрева.

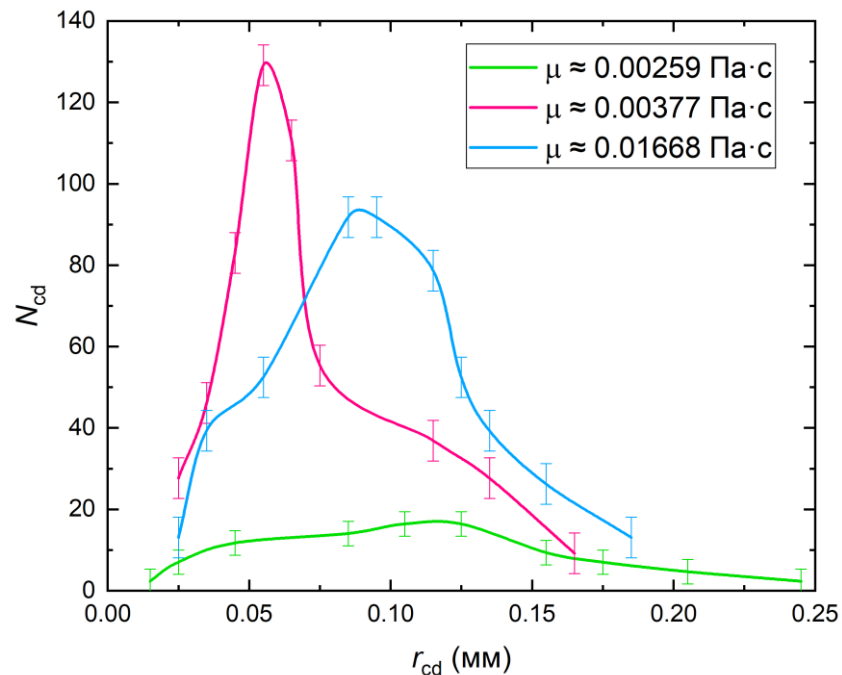


Рисунок 2.6.6.1 – Распределения размеров вторичных фрагментов для составов при варьировании вязкости ($R_{d0} \approx 1,06$ мм; $T_a \approx 623$ К): 1 – дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%; 2 – дизельное топливо 80 об%, дизельное топливо с полимером 10 об%, вода 10 об%; 3 – дизельное топливо 45 об%, дизельное топливо с полимером 45 об%, вода 10 об%.

Распределения размеров вторичных фрагментов для различных составов при варьировании межфазного натяжения представлены на рисунке 2.6.6.2. Полученные распределения свидетельствуют о том, что добиться наибольшего количества вторичных фрагментов можно при наименьшем межфазном натяжении, поскольку размер капелек воды дисперсной фазы в данном случае будет наименьшим. Соответственно, размеры образующихся фрагментов меньше. Это

еще и связано с тем, что чем меньше межфазное натяжение, тем дольше требуется время прогрева. Поэтому капля успевает прогреться на большую глубину. Соответственно, большой объем жидкости имел высокую температуру. Это приводило к снижению поверхностного натяжения и вязкости относительно исходного состояния жидкости, т.е. без нагрева. Количество вторичных фрагментов возрастало.

На рисунке 2.6.6.3 представлены распределения размеров вторичных фрагментов для различных составов при варьировании поверхностного натяжения. Как можно было ожидать, снижение поверхностного натяжения должно способствовать росту количества вторичных фрагментов с малыми размерами и в целом росту их числа. Однако проведенные эксперименты показали, что при добавлении Tween в состав эмульсий не только снижает значение поверхностного натяжения, но и изменяет режима распада в связи с тем, что Tween стабилизирует эмульсию [149,150]. В случае без Tween характерным режимом распада был микро-взрыв, с Tween – паффинг. Этим объясняется меньший размер капель и большое количество фрагментов без Tween при максимальном поверхностном натяжении по сравнению с составами с Tween, где идет закономерное укрупнение размеров вторичных фрагментов и снижение их количества.

При исследовании влияния вязкости двухжидкостных неперемешанных капель на характеристики вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде были проведены экспериментальные исследования со смесями дизельного топлива и таллового масла (свойства составов представлены в таблице 2.3.4). Эксперименты были выполнены при нагреве двухжидкостных в высокотемпературной пламенной зоне с использованием экспериментального стенда, представленного на рисунке 2.2.8. В исследованиях [150,151] продемонстрировано, что дизельное топливо хорошо смешивается с маслами растительного происхождения, с помощью чего можно варьировать вязкость топливной композиции. За счет варьирования вязкости можно управлять характеристиками распыла топливных композиций в различных энергетических установках [150,151].

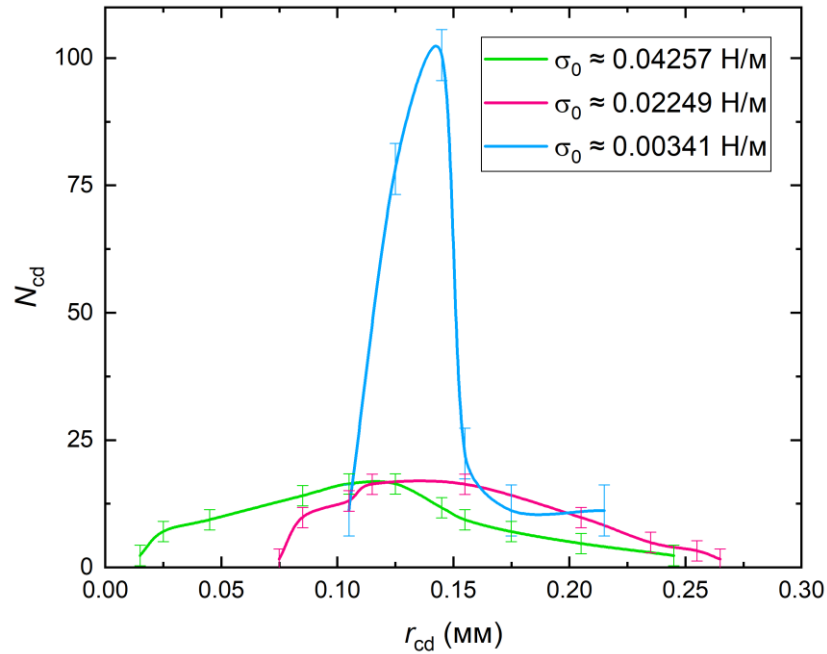


Рисунок 2.6.6.2 – Распределения размеров вторичных фрагментов для составов при варьировании межфазного натяжения ($R_{d0} \approx 1,06$ мм; $T_a \approx 623$ К): 1 – дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%; 2 – дизельное топливо (0,08 г/л эмульгатора) 90 об%, вода 10 об%; 3 – дизельное топливо (1,6 г/л эмульгатора) 90 об%, вода 10 об%.

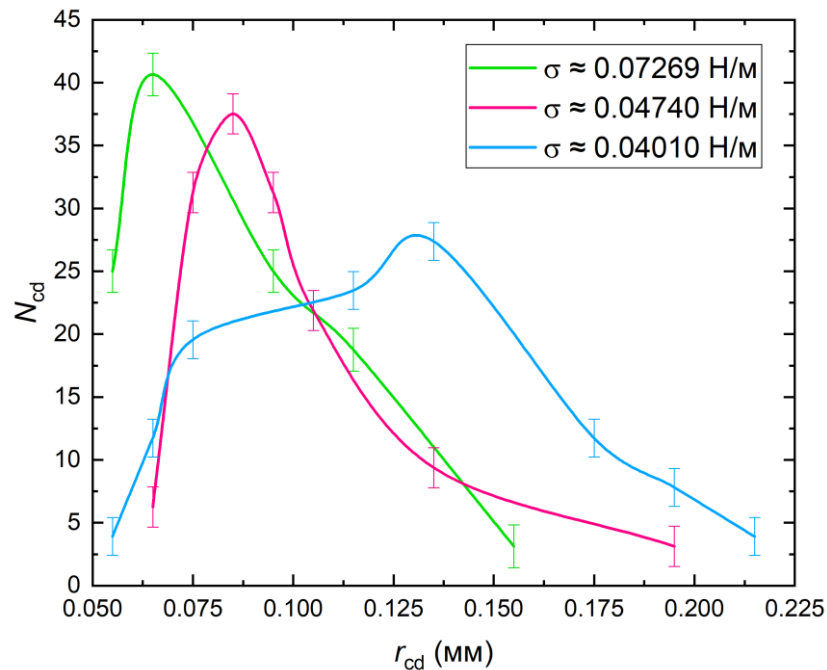


Рисунок 2.6.6.3 – Распределения размеров вторичных фрагментов для составов при варьировании поверхностного натяжения ($R_{d0} \approx 1,06$ мм; $T_a \approx 623$ К): 1 – дизельное топливо (1,6 г/л эмульгатора) 40 об%, вода 60 об%; 2 – дизельное топливо (1,6 г/л эмульгатора) 40 об%, вода 59,5 об%, 0,5 об% Tween-20; 3 – дизельное топливо (1,6 г/л эмульгатора) 40 об%, вода 59,5 об%, 0,5 об% Tween-80.

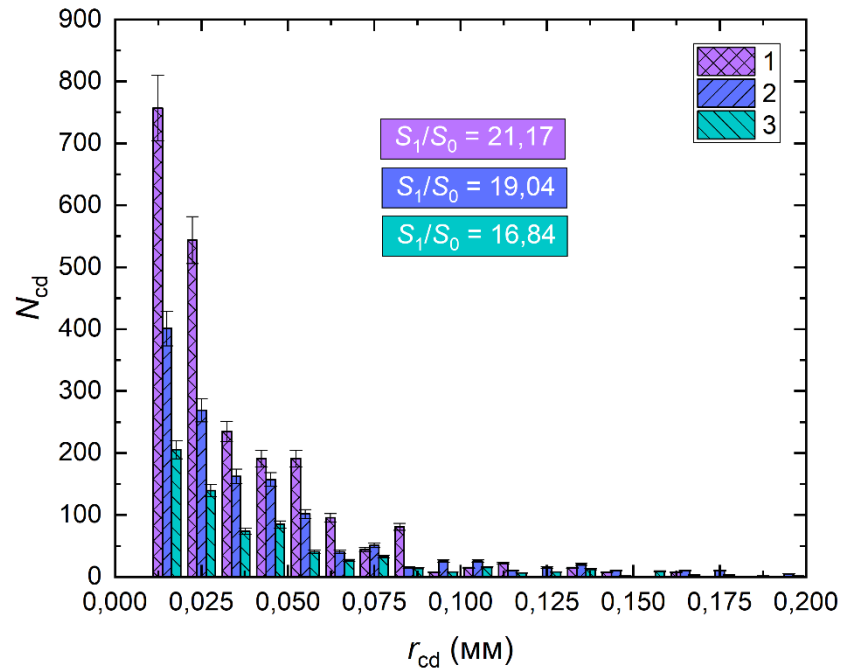


Рисунок 2.6.6.4 – Распределения вторичных фрагментов по размерам для исходных двухжидкостных капель на основе смесей дизельного топлива и таллового масла ($R_{d0} \approx 1,06$ мм; $T_a \approx 800$ К; $\eta \approx 90$ об%): 1 – Дизельное топливо 90 об%, Талловое масло 10 об%; 2 – Дизельное топливо 50 об%, Талловое масло 50 об%; 3 – Дизельное топливо 10 об%, Талловое масло 90 об%.

На рисунке 2.6.6.4 представлены типичные распределения размеров вторичных фрагментов для исходных двухжидкостных капель на основе смесей дизельного топлива и таллового масла. Концентрация воды в исходных двухжидкостных каплях составляла 10 об%. Характерным является то, что с увеличением доли таллового масла в составе горючей жидкости значительно увеличивается вязкость топливной композиции (4,8...49,6 мПа·с), вместе с этим снижается общее количество вторичных фрагментов и укрупняется их средний размер. Максимальное количество вторичных фрагментов с минимальными размерами было зарегистрировано для состава с минимальной вязкостью (Дизельное топливо 90 об%, Талловое масло 10 об%). Чем выше вязкость и поверхностное натяжение горючего компонента, тем сложнее разорвать исходную двухжидкостную каплю. Более вязкой жидкости требуется больше энергии для роста пузыря с последующим разрушением исходной капли.

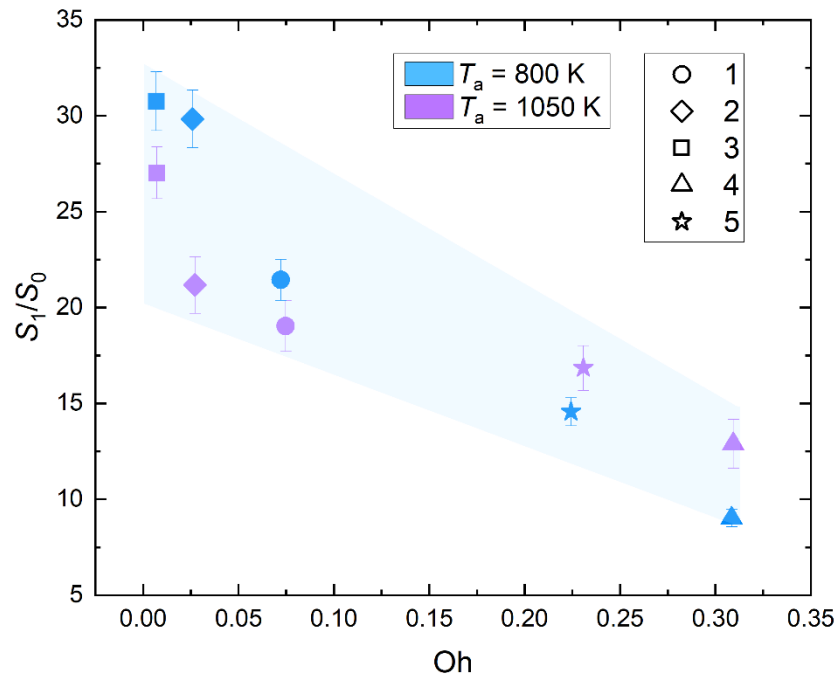


Рисунок 2.6.6.5 – Влияние числа Онезорге (Oh) на отношение площадей свободной поверхности жидкости после и до распада (S_1/S_0): 1 – Дизельное топливо 90 об%, Талловое масло 10 об%; 2 – Дизельное топливо 50 об%, Талловое масло 50 об%; 3 – Дизельное топливо 10 об%, Талловое масло 90 об%. Параметры эксперимента: $R_{d0} \approx 1,06$ мм; $\eta \approx 90$ об%.

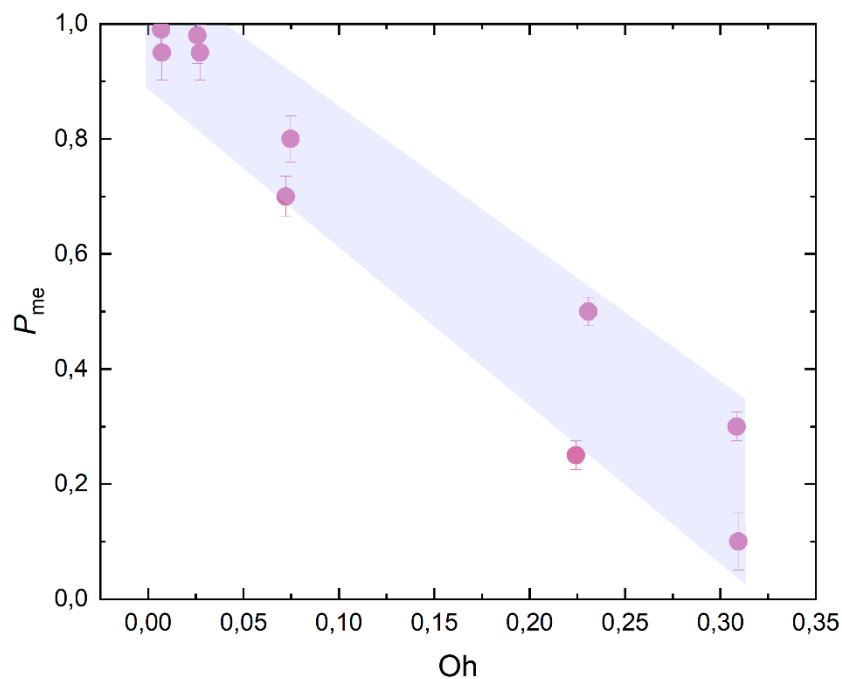


Рисунок 2.6.6.6 – Влияние числа Онезорге (Oh) на вероятность возникновения микро-взрыва (на основе обобщения данных рисунка 2.6.6.5).

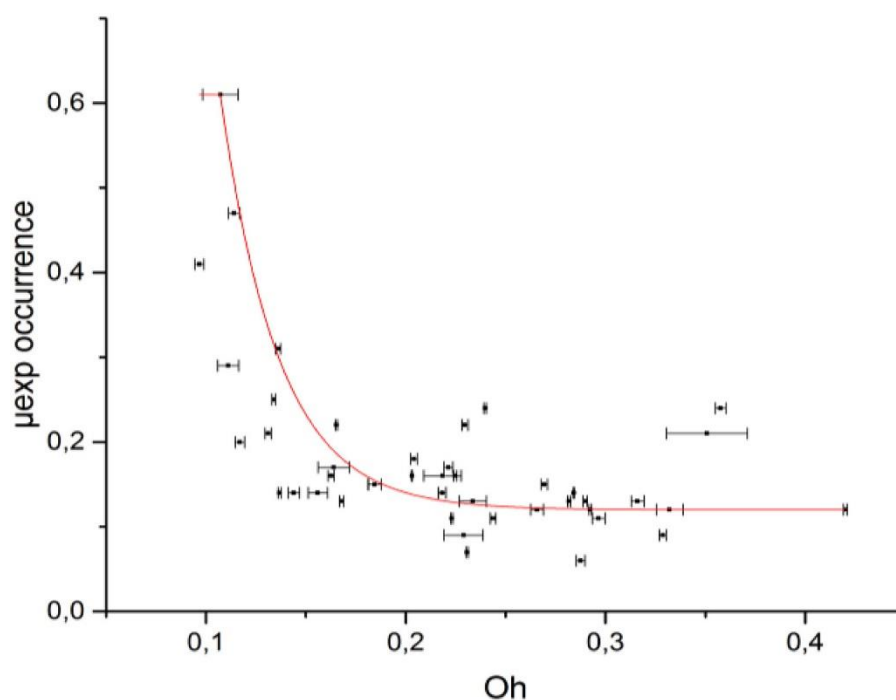


Рисунок 2.6.6.7 – Влияние числа Онезорге (Oh) на вероятность возникновения микро-взрыва (данные Mousa et al. [165]).

Ключевые отличия характеристик микро-взрывного распада для двухжидкостных капель на основе смесей дизельного топлива и таллового масла объясняются изменением режима фрагментации исходной капли, т.е. с повышением вязкости горючего компонента происходил переход от микро-взрыва к паффингу, что соотносится с данными [166]. Вероятность возникновения микро-взрыва возрастает для двухжидкостных капель с низким числом Онезорге (Oh), т.е. низкая вязкость, высокое поверхностное натяжение и размер. Рисунок 2.6.6.5 демонстрирует обобщенные результаты настоящей работы в виде зависимости отношения площадей свободной поверхности жидкости после и до микро-взрывного распада (S_1/S_0) от числа Онезорге (Oh) при двух температурах газовой среды (800 К и 1050 К). Как можно видеть из рисунка 2.6.6.5 при снижении числа Онезорге возрастает отношение S_1/S_0 , что объясняется сменой режима от паффинга к микро-взрыву. Для демонстрации смены режимов была вычислена вероятность возникновения микро-взрыва (P_{me}). Вероятность возникновения микро-взрыва вычислялась как отношение количества зарегистрированных распадов двухжидкостной капли в режиме микро-взрыва к общему числу проведенных

экспериментов. На рисунке 2.6.6.6 представлено влияние числа Онезорге на вероятность возникновения микро-взрыва, что хорошо коррелирует с данными [166] (рисунок 2.6.6.7). Данный характер зависимости обусловлен тем, что чем ниже число Онезорге, тем легче перемещаться капле воды внутри топливной оболочки. Движение водяного ядра вследствие конвекции внутри капли ускоряет ее прогрев до условий микро-взрывного распада.

2.6.7 Влияние технологии формирования исходных двухжидкостных капель

На рисунке 2.6.7.1 показаны распределения размеров вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада двухжидкостных капель и эмульсий с начальным объемом исходной капли 10 мкл. Для капель эмульсий основным режимом распада является паффинг. Это связано с тем, что при нагреве капель эмульсий пузырьки пара не образуются по всему объему капли, а лишь в её локальных областях, в свою очередь взрывной распад капли эмульсии зависит от интенсивности локального подвода энергии [28]. При разрушении объединенного пузырька (в результате коагуляции более мелких пузырьков) наблюдается паффинг, который сопровождается отделением крупных фрагментов жидкости. Поэтому размеры образующихся капель для этих эмульсий выше, чем для two-component капель. Причины существенных отличий количества и размеров вторичных фрагментов для перемешанных и неперемешанных жидкостей связаны с группой факторов и эффектов. В частности, при приготовлении эмульсий применяются стабилизирующие добавки и примеси, которые повышают межфазное натяжение и упрочняют межмолекулярные связи (как следствие, препятствуют разделению компонентов – горючего и негорючего, т.е. расслаиванию). Установленные отличия интегральных характеристик вторичных фрагментов для двухкомпонентных капель в случае предварительного перемешивания и без последнего представляют основную научную новизну и практическую значимость результатов выполненных экспериментов. Они дают основания для вывода о том, что и в случае трех- и многокомпонентных капель

тенденции сохранятся. Полученные результаты показывают, что большие перспективы интенсивного микро-диспергирования могут быть обеспечены в случае применения простых систем перемешивания струй с горючим и негорючим компонентов, т.е. нет необходимости предварительно смешивать последние и стабилизировать для длительного хранения и транспортирования. К тому же, в процессе полета капли эмульсий и суспензий расслаиваются за счет сдвиговых напряжений и через определенное время полета они, по сути, представляют неперемешанные (двух-, трех- и многокомпонентные) жидкости. Поэтому результаты исследований для неперемешанных капель чрезвычайно важны для развития многих перспективных аэрозольных технологий вторичного измельчения.

В экспериментах с двухжидкостными неперемешанными каплями граница раздела компонентов прогревалась существенно быстрее, чем при использовании эмульсий. Это обусловлено тем, что микрокапельки воды распределены по объему капли дизельного топлива. При нагреве эти микрокапельки объединялись, образуя более крупные центры парообразования. В случае неперемешанных составов рост пузырьков происходит существенно быстрее, так как нет стадии объединения микрокапелек воды. Как следствие, при нагреве неперемешанной двухжидкостной капли формируется достаточно большой паровой пузырь (размеры в 3–5 раз выше начального размера капли). В этом случае ядро капли представляет вода и пар, а оболочка – тонкая пленка горючего компонента. Разрушение последней приводит к формированию облака мелких капель по причине малой толщины пленки, низкого поверхностного натяжения оболочки и высокой вязкости по сравнению с жидкостью в ядре. Вследствие низкого поверхностного натяжения пленка разрушалась при меньших приложенных силах, а за счет высокой вязкости образующиеся фрагменты жидкости принимали сферическую форму и создавали аэрозольное облако.

При видеорегистрации процессов распада капель эмульсий достаточно хорошо были видны стадии локального и распределенного по их объему схлопывания пузырьков и отрыва фрагментов жидкости в режиме паффинга. Это

обусловлено локальным вскипанием небольших объемов воды вблизи свободной поверхности капли. При этом, чем больше концентрация горючего компонента, тем меньше микрокапелек воды в объеме, и они быстрее прогревались. Но их вскипание и разбрызгивание не могло приводить к распаду капли с образованием аэрозольного облака, так как слишком мала площадь поверхности межкомпонентной границы.

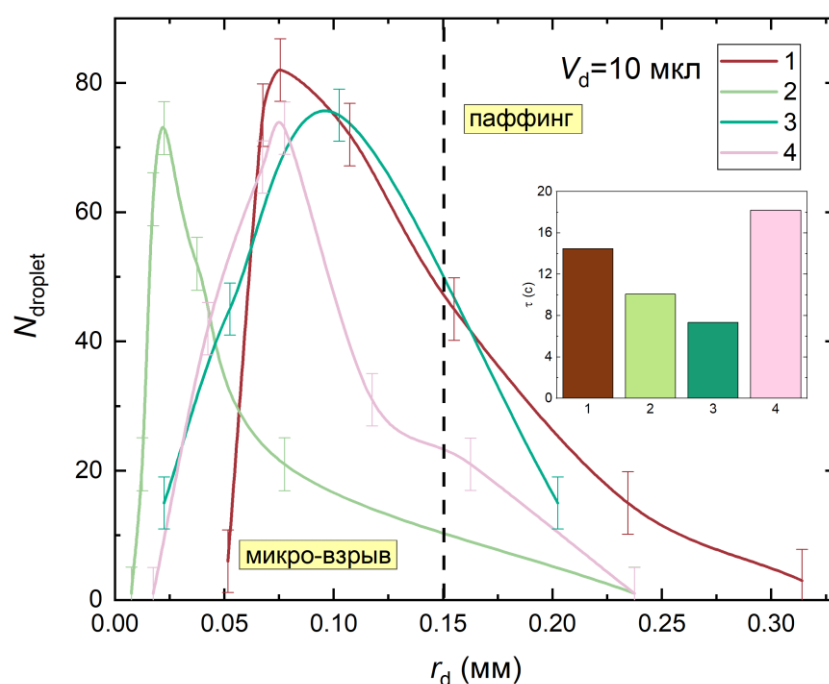


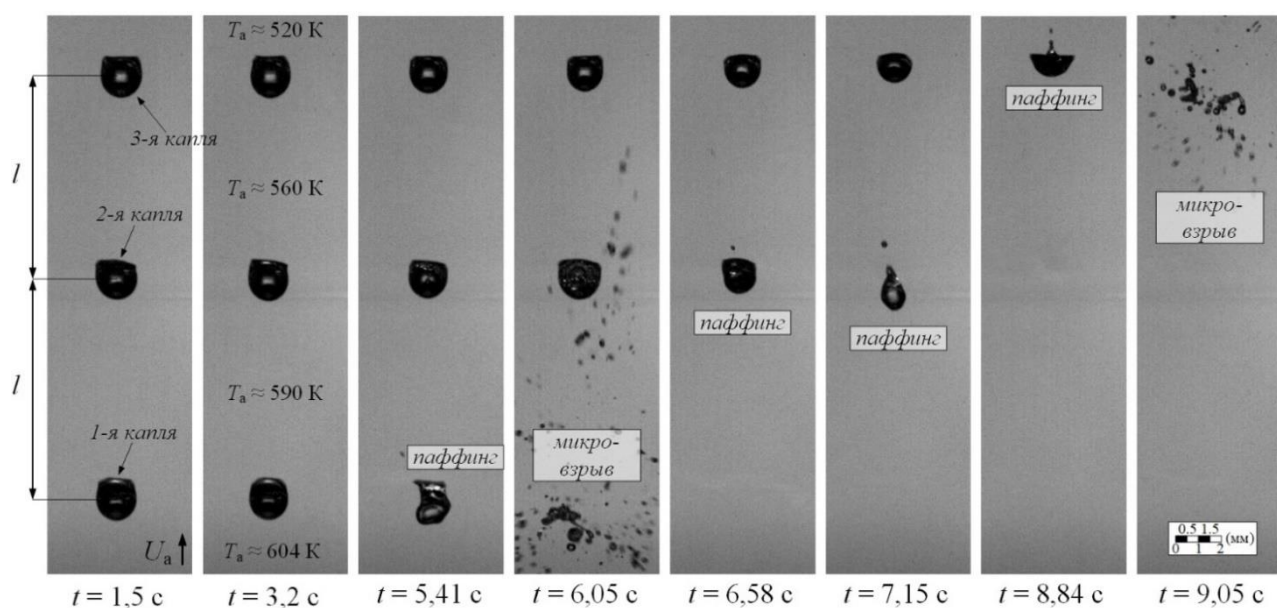
Рисунок 2.6.7.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам для двух жидкостных капель и эмульсий ($T_a \approx 623$ К, $R_{d0} \approx 1,33$ мм): 1 – эмульсия: дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%; 2 – двухжидкостная капля: дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%; 3 – эмульсия: рапсовое масло 90 об%, вода 10 об%; 4 – двухжидкостная капля: рапсовое масло 90 об%, вода 10 об%.

2.6.8 Влияние коллективных эффектов

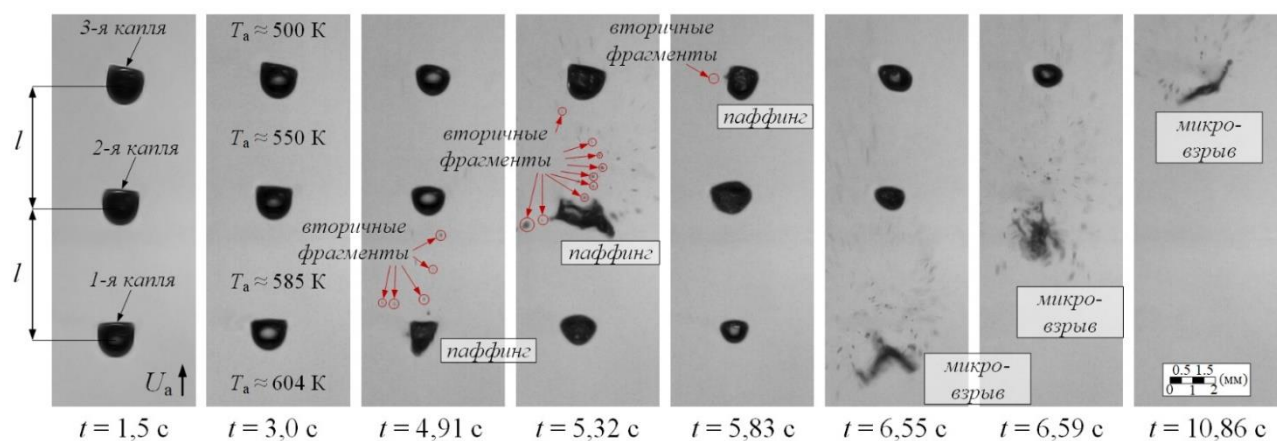
На рисунке 2.6.8.1 показаны типичные видеокadres распада двухжидкостных капель в режимах паффинга и микро-взрыва для трех значений расстояний между ними ($l \approx 3,5-9,8$ мм). При обработке видеogramм установлено, что расположенные ниже (т.е. во фронте) по потоку капли могут оказывать различное влияние на прогрев, испарение и микро-взрывной распад соседних капель. При этом

типичными режимами существования первой по потоку капли могут быть паффинг или микро-взрыв в зависимости от условий нагрева. Для второй и третьей по потоку капель наряду с режимами паффинга и микро-взрыва может реализовываться режим монотонного испарения при существенном снижении температуры вблизи их поверхности за счет влияния впереди идущих капель. Это обусловлено различными скоростями прогрева границы раздела вода/горючая жидкость, т.е. граница раздела вода/горючая жидкость первой капли практически всегда прогревается быстрее, чем для второй и третьей [118]. Натекающий на первую каплю разогретый газовый поток сдувает образующиеся пары с ее поверхности и уносит их в область, расположенную за каплей. Эта область также называется температурным следом. Результаты экспериментов [167] показали, что характерные размеры температурного следа, расположенного за каплей составляют $(5-7)R_d$. Таким образом, за счёт варьирования температуры и расстояния между каплями можно обеспечить реализацию разных режимов фрагментации [168].

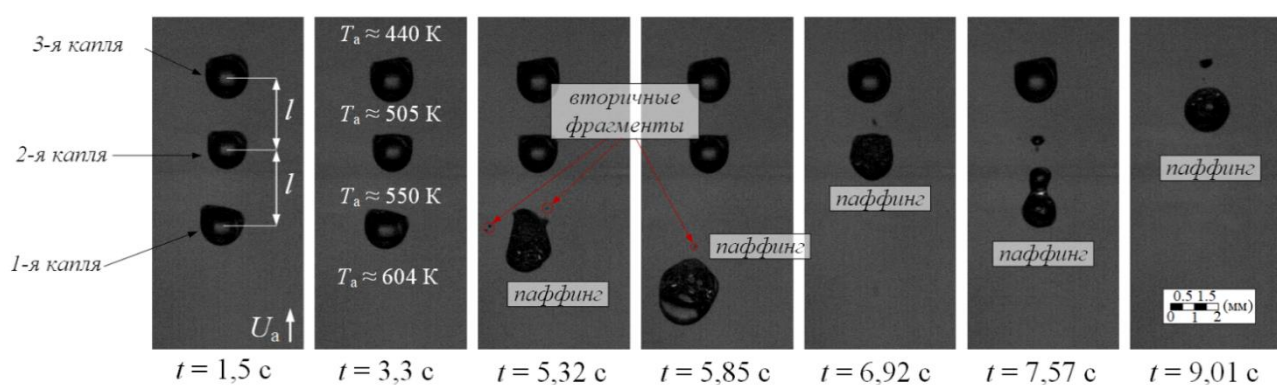
Также при проведении экспериментов установлено, что образующиеся при микро-взрывном распаде вторичные фрагменты за счет столкновений с рядом расположенными каплями могут инициировать их фрагментацию. Данные эффекты становятся заметными при уменьшении расстояния между каплями. Чем ближе друг к другу расположены капли, тем выше вероятность (частота реализации в серии опытов при идентичных условиях) того, что в результате соударений вторичных фрагментов с исходными каплями произойдет микро-взрыв последних. В основном выделенный эффект зарегистрирован для капель, в которых происходит интенсивное парообразование, т.е. процесс фрагментации инициировался за счет разрушения жидкостной оболочки пузыря. Поверхность исходных капель в результате соударений заметно трансформировалась, а также регистрировалось интенсивное перемешивание жидкости в каплях. Для интенсификации этих эффектов достаточно касание даже мелких вторичных фрагментов. Подобные эффекты наблюдались в опытах [117] с группой капель при их свободном падении в высокотемпературной газовой среде.



а



б



в

Рисунок 2.6.8.1 – Типичные видеокадры распада (фрагментации) двухжидкостных капель в группе из трех капель: а – дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%, $T_a \approx 604,3 \text{ K}$, $l \approx 9,86 \text{ мм}$, $R_{d0} \approx 0,88 \text{ мм}$, б – дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%, $T_a \approx 604,3 \text{ K}$, $l \approx 6,14 \text{ мм}$, $R_{d0} \approx 0,84 \text{ мм}$, в – дизельное топливо 10 об%, вода 90 об%, $T_a \approx 604,4 \text{ K}$, $l \approx 3,55 \text{ мм}$, $R_{d0} \approx 0,81 \text{ мм}$).

Анализ полученных в проведенных опытах видеокадров позволил выделить некоторые закономерности взаимодействия вторичных фрагментов от первой капли (во фронте натекающего потока) с двумя последующими. В частности, выделены условия взаимодействия вторичных фрагментов с жидкостными слоями и пузырями в составе второй и третьей капли. Установлено, что соударения капель реализовывались в рамках четырех известных режимов: коагуляция (слияние), разлет (взаимодействие с деформацией слоев жидкости в обеих каплях и восстановлением их изначальных размеров и траекторий движения), отскок (упругое соударение без перемешивания жидкостей) и дробление (интенсивное измельчение исходных капель с формированием облака мелких). Реализация того или иного режима зависела от результирующих скоростей движения вторичных капель, образованных при распаде первой, а также от угла атаки. В основном скорости движения вторичных капелек при фрагментации первой соответствовали диапазону 1-15 м/с и зависели от их размеров, скорости и температуры натекающего потока воздуха. Углы атаки варьировались в диапазоне от 15° до 90° . При малых скоростях движения и углах атаки доминировали режимы коагуляции и отскока. Несоосные соударения при малых скоростях сопровождались отскоками, т.е. упругими взаимодействиями без смещения капель. Видеокадры показали, что в этих условиях важную роль играли фазовые превращения на поверхности капель. В частности, интенсивное испарение приводило к оттоку паров с поверхности капель в противоположном направлении результирующего вектора движения вторичных фрагментов ко второй и третьей родительской каплям. Это вызывало определенное торможение капель перед взаимодействием. Как следствие, отталкивающие силы и поверхностное натяжение способствовали отскоку капель. При центричных соударениях чаще всего регистрировались условия коагуляции капель. Мелкие вторичные фрагменты тормозились в жидкостных слоях второй и третьей капли и смешивались с ними. При больших значениях результирующих скоростей движения вторичных фрагментов от первой капли в направлении второй и третьей регистрировались условия разлета и дробления [168].

При анализе видеокадров установлено, что важное значение имела структура второй и третьей капли до соударения. Если в их объеме уже были центры парообразования в виде пузырьков, то попадание вторичных фрагментов от первой капли приводило к разрушению данных пузырьков и отрыву с поверхности второй и третьей капель совокупности вторичных фрагментов, т.е. дроблению. Если же вторая и третья капли имели достаточно монолитную жидкостную структуру, то движущиеся с высокой скоростью вторичные фрагменты от первой капли пробивали слои жидкости и выходили из объема второй и третьей капли, т.е. доминировал режим разлета. Важное значение играл баланс сил инерции и поверхностного натяжения в зоне соударения. В [169,170] приведены карты режимов соударений капель жидкостей в газовой среде. Приведенные в настоящей работе результаты развивают эти представления. С учетом анализа результатов опытов с соударениями двухфазных капель между собой в газовой среде [171] объяснены некоторые установленные в настоящей работе особенности. В частности, в проведенных экспериментах с разными расстояниями между исходными каплями регистрировались достаточно существенно отличающиеся последствия соударений вторичных фрагментов от первой капли с второй и третьей. Это связано с тем, что, с одной стороны, рост температуры газовой среды способствует снижению поверхностного натяжения и вязкости жидкостей, интенсификации трансформации поверхности капель в потоке, формированию центров парообразования, способствующих разрушению приповерхностных слоев и распаду капель в целом. С другой стороны, интенсивное испарение жидкости приводит к формированию вокруг капель буферных паровых слоев, которые выступают определенной тепловой защитой. В этих слоях температура газов снижается вследствие высоких скоростей протекания эндотермических фазовых превращений относительно температуры натекающего газового потока. Интенсивный приток паров способствует росту давления в приповерхностном слое парогазовой смеси. В таких условиях сближение капель перед взаимодействием замедляется. Соответственно, их поверхность трансформируется менее интенсивно. Сформулирован вывод о том, что тепловой фактор оказывает

существенное влияние на условия взаимодействия вторичных фрагментов от первой капли со второй и третьей.

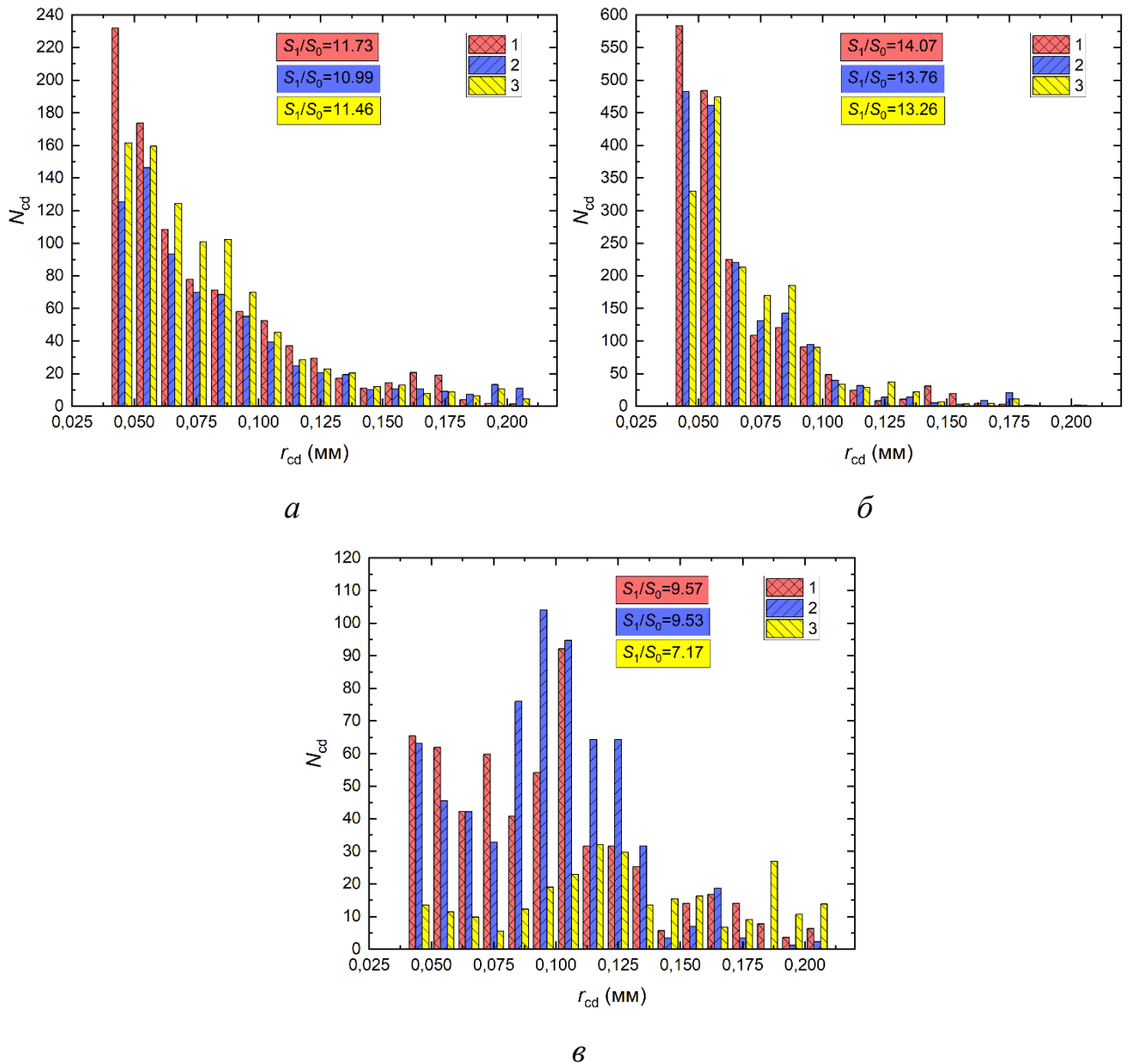


Рисунок 2.6.8.2 – Распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании расстояния между каплями в группе: 1 – первая капля, 2 – вторая капля, 3 – третья капля. Параметры эксперимента: дизельное топливо 10 об%, вода 90 об%, $T_a = 604 \pm 10$ К, $R_{d0} = 0,91 \pm 0,02$ мм, $L = 9,86 \pm 0,05$ мм (а), $L = 6,48 \pm 0,04$ мм (б), $L = 3,55 \pm 0,05$ мм (в).

В целом при анализе видеок кадров установлено, что совокупность вторичных фрагментов от первой распавшейся капли движется в газовом потоке (по направлению его движения вверх) в виде осколочных снарядов, т.е. достаточно

прямолинейно. Исключение составляют немногочисленные крупные вторичные фрагменты (их размеры в 2-4 раза выше средних), которые под действием противоположных сил инерции и гравитации отклоняются от линейных траекторий, закручиваются в потоке, в ряде случаев даже некоторое время зависают, но вследствие высоких скоростей испарения теряют определенный объем жидкости и уносятся вверх по потоку. Регистрировались цепные механизмы распада таких фрагментов в области видеосъемки. Как правило, последовательная фрагментация дочерних капелек происходила в режиме микро-взрыва, так как их температура была достаточно высокой, и поверхностные слои довольно существенно трансформировались после формирования. В таких каплях регистрировались готовые центры парообразования в виде границы раздела воды и жидкого горючего компонента, пузырьки практически отсутствовали (они успевали выйти из объема капли при первичном распаде). Эти условия способствовали локальному перегреву межкомпонентной границы до распада в режиме микро-взрыва.

На рисунках 2.6.8.2 и 2.6.8.3 приведены установленные распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании расстояния между родительскими каплями от 9,86 мм до 3,55 мм для двух составов (дизельное топливо 10 об%, вода 90 об% и дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%) при $T_a = 604$ К. На рисунках 2.6.8.1 и 2.6.8.2 видно, что наибольшее количество вторичных фрагментов с минимальными размерами, а также максимальные соотношения площадей поверхности соответствуют первой капли при всех условиях экспериментов. Если расстояние между каплями максимально, то разница в соотношении площадей после и до распада для первой, второй и третьей капель минимальна, т.е. взаимное влияние капель минимально. Наиболее сильно данный эффект проявляется при минимальном расстоянии между соседними каплями.

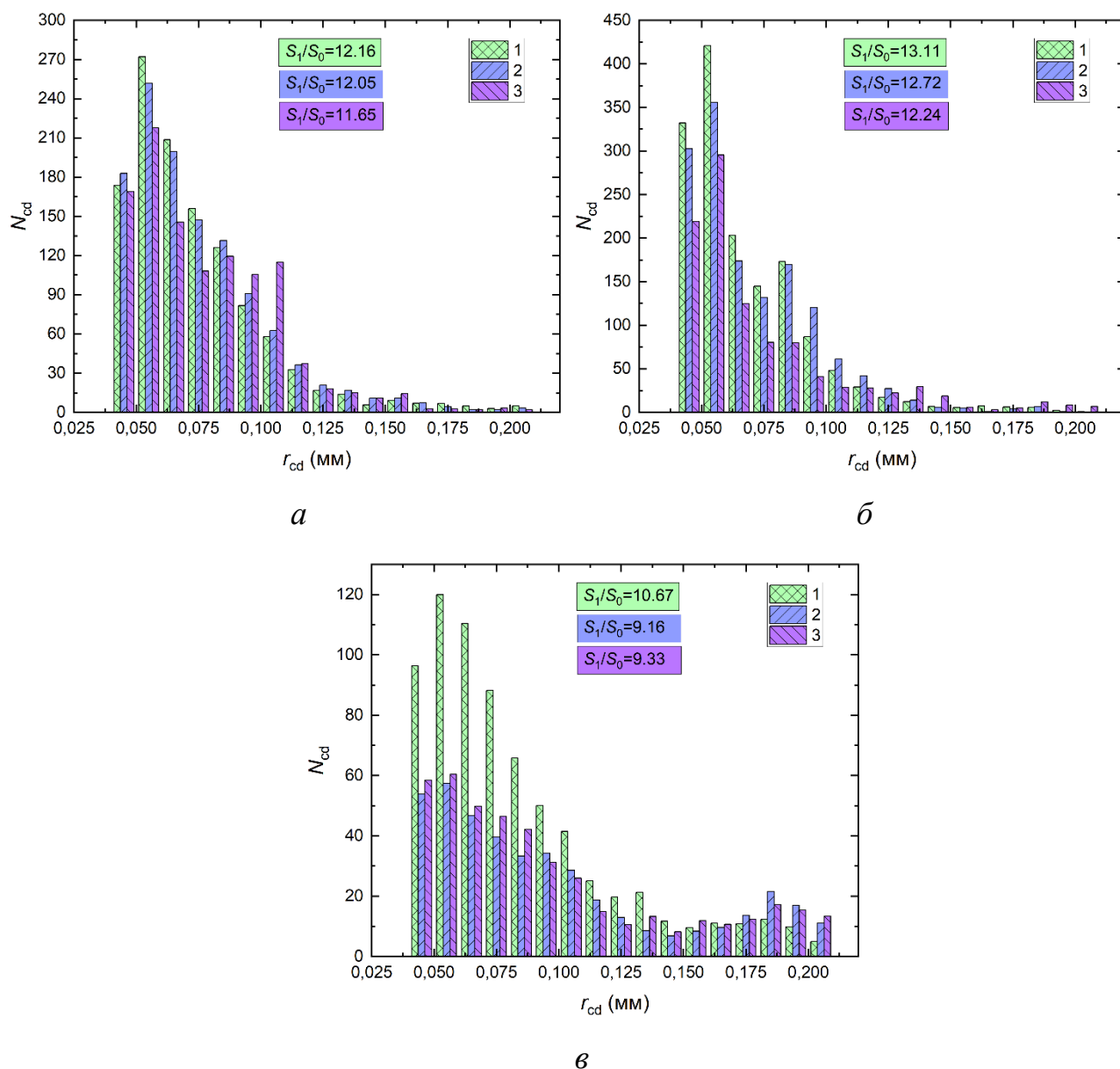


Рисунок 2.6.8.3 – Распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании расстояния между каплями в группе: 1 – первая капля, 2 – вторая капля, 3 – третья капля. Параметры эксперимента: дизельное топливо 90 об%, вода 10 об%, $T_a = 604 \pm 10$ К, $R_{d0} = 0,9 \pm 0,02$ мм, $L = 9,86 \pm 0,06$ мм (а), $L = 6,48 \pm 0,04$ мм (б), $L = 3,55 \pm 0,04$ мм (в).

Полученные распределения по размерам вторичных капель позволяют сделать вывод о том, что чем больше расстояние между родительскими каплями, тем больше вторичных фрагментов образуется при распаде каждой из них и тем меньше средний размер вторичных фрагментов. Эта тенденция соответствовала всем проведенным экспериментам с разным расположением воды и горючей жидкости в исходных каплях. Она обусловлена двумя основными причинами. Во-

первых, чем больше расстояние между последовательно расположенными в потоке родительскими каплями, тем выше температура парогазовой смеси в малой окрестности каждой из них, слабо проявляется влияние соседних капель на температурное поле в системе в целом, соответственно, скорости их прогрева и испарения высоки. В таких условиях формирующиеся вторичные фрагменты имеют малый размер на этапе образования, и он быстро уменьшается за счет нагрева в потоке. Во-вторых, с поверхности каждой из капель срывались маленькие парожидкостные фрагменты в процессе нагрева и взаимодействовали с соседними каплями. Выделенные небольшие фрагменты представляли пузырьки пара с тонкой жидкостной оболочкой. При их контакте с соседними родительскими каплями в последних формировались дополнительные центры парообразования, что и интенсифицировало их последующую фрагментацию.

На рисунках 2.6.8.2 и 2.6.8.3 показано, что за счет изменения расстояния между родительскими каплями при температуре газового потока около 604 К отношение площадей поверхности жидкости варьируется в диапазоне от 7 до 14. Проведенные эксперименты показали, что чем выше температура натекающего газового потока, тем выше S_1/S_0 . При этом максимальные значения S_1/S_0 могут превышать 100. Поэтому за счет комплексной системы варьирования температуры газовой среды и расстояния между родительскими каплями (характеризует дисперсность аэрозоля) обеспечиваются требуемые значения S_1/S_0 . Ограничивающим фактором выступает соотношение концентраций компонентов в родительских каплях. В частности, при сравнении рисунков 2.6.8.2 и 2.6.8.3 целесообразно выделить существенно меньшие значения S_1/S_0 и количества вторичных фрагментов в опытах с каплями, в которых доля воды доминировала над горючей жидкостью. Это обусловлено группой причин. Во-первых, вода имеет существенно большую теплоемкость и теплоту парообразования по сравнению с горючей жидкостью. Соответственно, капля с большей концентрацией воды прогревается до меньших температур в течение идентичного периода времени по сравнению с каплей, в которой доминировала доля горючей жидкости. Во-вторых, основную долю образующихся вторичных капель представляют фрагменты с

доминирующим объемом воды. Соответственно, они после формирования не так быстро испарялись по сравнению с вторичными фрагментами, содержащими горючую жидкость. В-третьих, доля средних по размерам вторичных фрагментов существенно выше в опытах с родительскими каплями, содержащими большую концентрацию воды. Это обусловлено зарегистрированным смещением перехода от режима микро-взрыва к паффингу с ростом концентрации воды в составе двухжидкостных исходных капель.

Следует отметить, что на рисунках 2.6.8.2 и 2.6.8.3 минимальные значения радиусов вторичных фрагментов были идентичными и соответствовали 0,05 мм. Это связано с разрешением применяемой системы видеорегистрации (камера, объектив, прожекторы подсветки), в частности при использованных настройках фрагменты размерами менее 0,05 мм детектировались, но они соответствовали ограниченному количеству пикселей на кадре, которое принималось за границы идентификации, т.е. в пределах погрешности. При наличии системы регистрации с большей глубиной резкости и разрешением обеспечивается возможность установления более точных границ по минимальным размерам вторичных фрагментов. Но важную роль будет играть скорость их движения, прогрева и испарения. В частности, в проведенных опытах регистрировались условия, при которых вторичные фрагменты после формирования быстро перемещались за счет взрывной волны и их размеры быстро уменьшались вследствие испарения, при этом вся капля еще не успела разрушиться. В таких условиях важно применять алгоритм автоматического слежения за всеми фрагментами, образующимися при распаде капли и их суммирования с целью проверки баланса объемов исходной капли и совокупности вторичных. Такой алгоритм применялся в настоящей работе. Именно благодаря применению этого алгоритма удавалось отслеживать совокупность вторичных фрагментов разного размера, формирующиеся и движущиеся с разной скоростью в области регистрации. Следящий алгоритм позволил сделать вывод о том, что практически все вторичные фрагменты имели форму сферы, несмотря на высокие скорости перемещения после формирования аэрозольного облака. Лишь малая доля крупных по размерам вторичных

фрагментов имела форму эллипсоидов. Для них средний размер определялся по результатам измерения нескольких максимальных и минимальных диаметров в разных сечениях. Чем выше вязкость жидкости в составе исходной капли, тем меньше таких деформированных относительно сферической формы капель образовывалось. Такой вывод сделан при сравнении результатов опытов с каплями, в которых доминировала горючая жидкость по сравнению с водой.

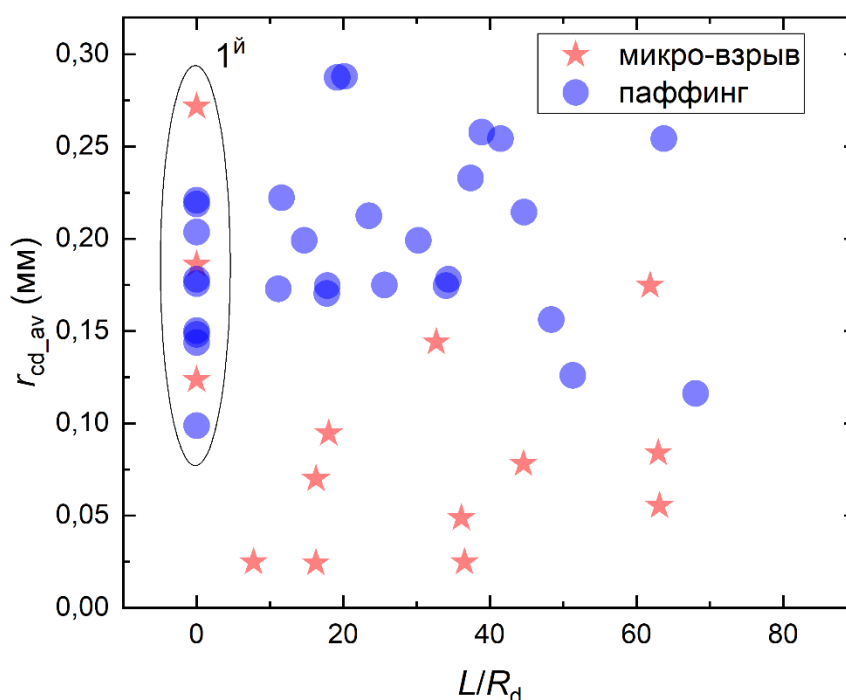


Рисунок 2.6.8.4 – Средние размеры вторичных фрагментов, образующихся при разных режимах микро-взрывного распада двухжидкостных капель, для различных соотношений L/R_d и разницы времен задержки распада первой и последующих капель Δt (построена на основе обобщения данных для двухжидкостных капель (рапсовое масло 90 об%, вода 10 об%) при температуре в муфельной печи около 1223 К, размеры капель перед распадом $R_d=0,145\dots0,802$ мм. 1st – микро-взрывной распад первой капли в эксперименте.

Результаты экспериментальных данных по влиянию коллективных эффектов при проведении экспериментов с группой двухжидкостных капель в свободном падении представлены на рисунках 2.6.8.4 и 2.6.8.5. На рисунке 2.6.8.4 представлена карта режимов измельчения двухжидкостных капель (рапсовое масло 90 об%, вода 10 об%) в зависимости от среднего размера вторичных фрагментов r_{cd_av} и отношения L/R_d . На рисунке 2.6.8.4 показано, что вторичные фрагменты со

средними размерами выше 0,15 мм характерны только режиму паффинг. Экспериментальные данные, представленные на рисунках 2.6.8.4 и 2.6.8.5 получены с использованием экспериментального стенда, приведенного на рисунке 2.2.8.

На рисунке 2.6.8.5 представлена диаграмма средних размеров вторичных фрагментов R_{cd_av} для пяти групп L/R_d для двухжидкостных капель (рапсовое масло 90 об%, вода 10 об%). На рисунке 2.6.8.5 показано, что средний размер вторичных капель для всех групп L/R_d меняется незначительно. В целом средний размер вторичных капель во многом зависит от режима распада и размера капель перед распадом.

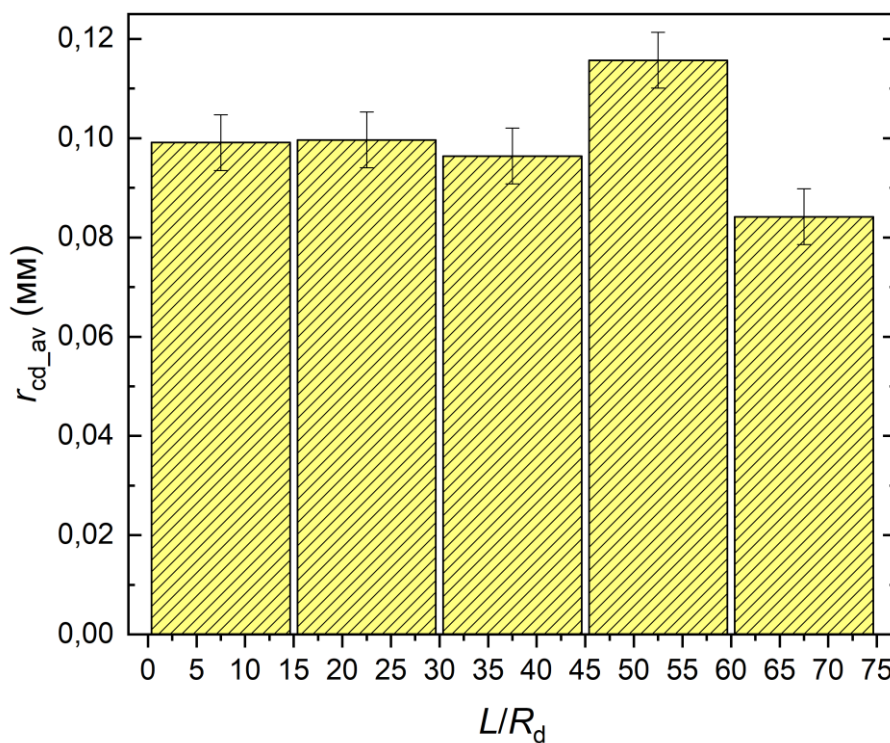


Рисунок 2.6.8.5 – Диаграмма средних размеров вторичных фрагментов для пяти групп отношений L/R_d (построена на основе обобщения данных для двухжидкостных капель (рапсовое масло 90 об%, вода 10 об%) при температуре в муфельной печи около 1223 К, размеры капель перед распадом $R_d=0,145\dots0,802$ мм.

Эксперименты с группой капель в свободном падении позволили установить некоторые закономерности и эффекты:

1. При движении группы капель в потоке разогретых газов реализуются различные режимы их микро-взрывного распада (микро-взрыв, паффинг и их последовательная реализация), а также каскадные эффекты. Помимо эффектов микро-взрывного распада наблюдаются эффекты соударений капель в аэрозольном потоке с реализацией различных исходов (отскок, коагуляция, дробление) [172].

2. Анализ видеogramм показал, что вторичные фрагменты за счет соударений с соседними двухжидкостными каплями могут инициировать их микро-взрывной распад. Такие эффекты наблюдались даже для вторичных фрагментов, имеющих малые размеры. С использованием высокоскоростной видеорегистрации и системы фильтрации интенсивности свечения каждой из капель можно было проследить наличие или отсутствие капелек воды в составе неоднородной капли топлива. Это позволяло объяснить разные условия трансформации поверхности и фрагментации капель. Благодаря применению такой системы видеорегистрации обосновано, что при взрывной фрагментации распределенные по объему исходной капли мелкие капельки воды практически мгновенно испаряются именно в режиме микро-взрыва. При паффинге достаточно много мелких капелек воды оставалось как в исходной капле, так и отрывающихся от ее поверхности вторичных фрагментах.

3. При микро-взрыве двухжидкостной капли двигающиеся с высокой скоростью пары и вторичные фрагменты практически не оказывают влияние на траекторию движения соседних капель. Кинетической энергии (соответственно, импульса) вторичных фрагментов недостаточно для того, чтобы существенно отклонить соседние капли от их траектории движения. Однако в некоторых случаях регистрировалась трансформация поверхности капель с той стороны, с которой на нее воздействовали вторичные фрагменты и пары от распавшейся капли. Следует отметить, что траектории движения вторичных фрагментов жидкости в камере способствуют существенно нелинейному росту количества их столкновений между собой и со стенками камер. Это приводит к тому, что топливный аэрозоль заполняет практически весь объем камеры. На видеogramмах опытов

зарегистрировано, что даже при движении вдоль оси симметрии трубчатой печи 10–12 двухжидкостных капель размерами около 0,5 мм вследствие интенсивной фрагментации в области регистрации площадь поверхности жидкости возрастает более чем в 10 раз. Как следствие, пары воды и горючего компонента, а также продукты их реагирования с воздухом формируют достаточно сложную по составу газопарокапельную смесь.

4. Системы вторичного измельчения, принцип действия которых в том числе связан с микро-взрывной фрагментацией, ориентированы на получение определенного среднего размера вторичных фрагментов. При сравнении результатов опытов с одиночной и совокупностью капель сформулирован вывод о том, что в режиме микро-взрывной фрагментации размеры вторичных фрагментов отличаются не более чем на 5–10% (рисунки 2.6.8.4 и 2.6.8.5). В режиме же паффинга отличия более существенные (могут достигать 30–40%). Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, процессы паффинг характеризуются выбросами с поверхности капли вторичных фрагментов на протяжении всего времени ее существования. На определенных интервалах времени соседние капли могут фрагментировать одновременно, по очереди или с определенным смещением по времени. Соответственно, капли разных размеров прогреваются в течение разных интервалов времени. Соответственно, размеры вторичных фрагментов существенно отличаются. Во-вторых, взаимодействие вторичных фрагментов от одной из исходных капель с соседними приводит к изменению их компонентного состава. Этот фактор оказывает определяющее влияние на процесс фрагментации как исходных, так и вторичных капелек (соответственно, и размеры). В-третьих, выше были прокомментированы причины разной инерционности прогрева одиночных и совокупности капель до условий микро-взрывной фрагментации. Эти же эффекты, факторы и процессы влияют на распределения капелек в каждый момент времени их движения в камере.

2.6.9 Влияние тонины помола, типа и концентрации твердых частиц

Результаты экспериментов по изучению характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель позволили установить, что наиболее существенное влияние на условия и последствия микро-взрывного распада капель суспензий оказала доля твердого компонента в капле, а также размеры твердых частиц. В частности, наличие твердых частиц в капле интенсифицировало ее трансформацию (относительно сферической формы) в потоке воздуха вследствие вытягивания и сжатия. Агломерация твердых частиц способствовала увеличению продольного размера капли вследствие роста градиента плотности в последней и влияния гравитационных сил. Так как процесс испарения протекал неравномерно вследствие разной концентрации частиц в разных слоях капли, то регистрировались эффекты существенного отклонения формы капли относительно сферы. Эти процессы способствовали росту числа отрывающихся в процессе прогрева фрагментов от исходной капли. На заключительном временном отрезке перед микро-взрывным распадом регистрировались отрывающиеся крупные фрагменты с достаточно большим количеством твердых частиц. Поэтому дисперсность образующегося аэрозольного облака существенно зависела от концентрации и размеров твердых частиц. Визуально (по видеокадрам) регистрировалось, что чем выше концентрация твердого компонента (угля) а также больше размер дисперсной фазы, тем меньшее количество вторичных фрагментов и большого количества формировалось. В экспериментах также установлено, что для концентраций угольных частиц выше 60 мас% фрагментации не происходит, капли топливных композиций высыхают и растрескиваются [157].

При варьировании тонины помола в каплях суспензионных топлив установлено, что тонина помола способствовала снижению минимального детектируемого размера вторичного фрагмента. Чем меньше тонина помола, тем ниже минимальный регистрируемый размер вторичных фрагментов.

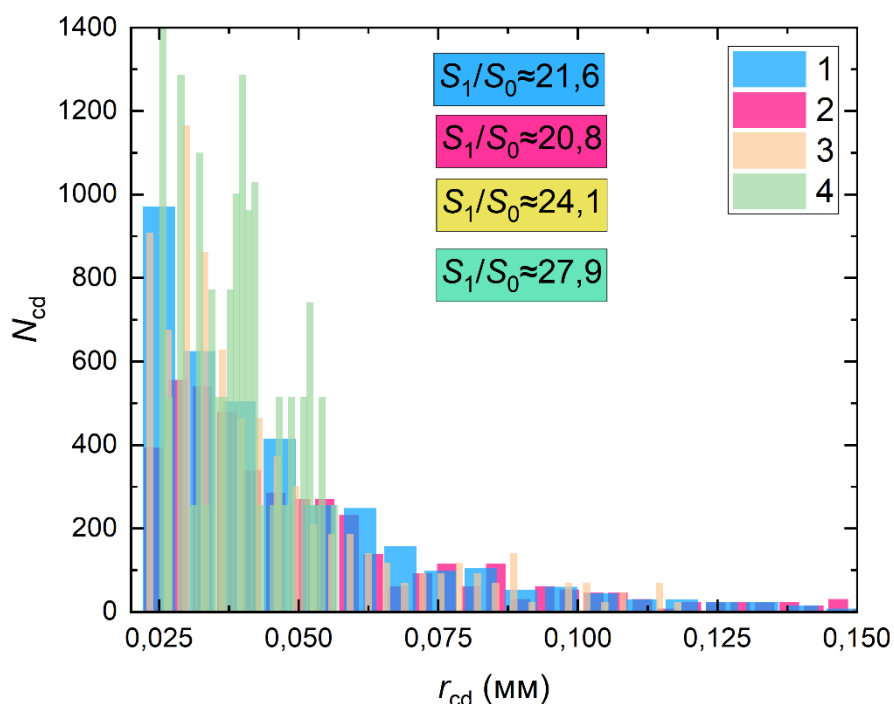


Рисунок 2.6.9.1 – Распределения вторичных фрагментов по размерам для различной тонины помола твердых частиц угля: без частиц (1), $\Delta_{av} \approx 30$ мкм (2), $\Delta_{av} \approx 40$ мкм (3) и $\Delta_{av} \approx 110$ мкм (4). Параметры эксперимента: двухжидкостные неперемешанные капли на основе воды и суспензии рапсового масла ($\eta \approx 90$ об%, $\gamma \approx 10$ мас%, $R_{d0} \approx 1,061$ мм, $T_a \approx 843$ К).

На рисунке 2.6.9.1 приведены распределения вторичных фрагментов по размерам для различной тонины помола твердых частиц угля: без частиц (1), $\Delta_{av} \approx 30$ мкм (2), $\Delta_{av} \approx 40$ мкм (3) и $\Delta_{av} \approx 110$ мкм (4). Как видно из рисунка 2.6.9.1 при уменьшении размеров твердых частиц снижается средний размер образующихся вторичных фрагментов. Минимальных размеров вторичных фрагментов можно достичь при микро-взрывном распаде состава без угольных частиц (1). С увеличением размеров твердых частиц угля размеры вторичных фрагментов увеличивались незначительно (не более чем на 10-15 %). Это связано с агломерацией твердых частиц и фрагментов жидкостей, т.е. чем крупнее твердые частицы, входящие в состав двухжидкостной капли, тем большее количество жидкости они уносят при распаде [157].

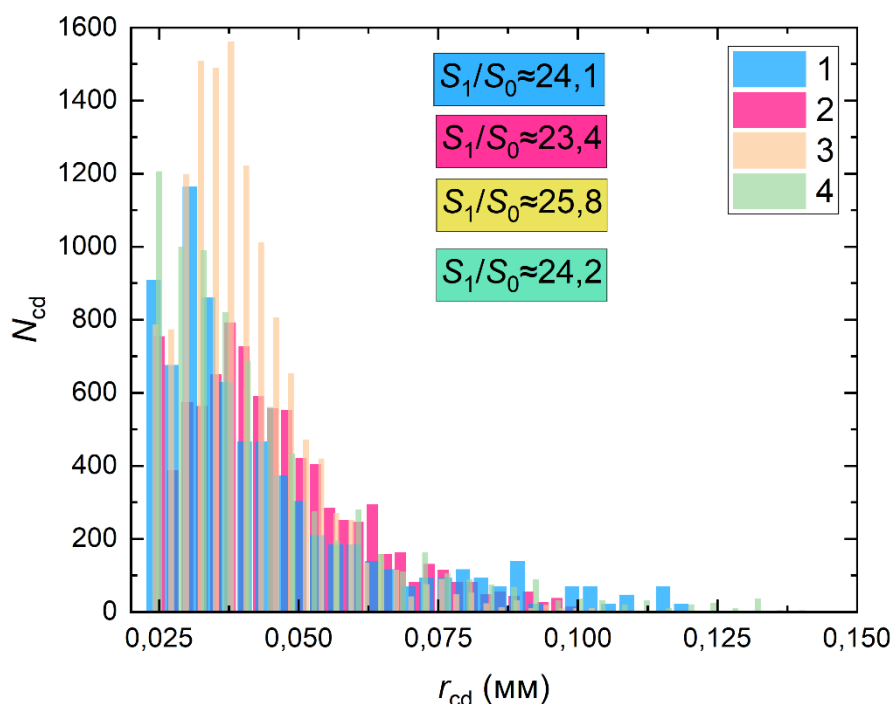


Рисунок 2.6.9.2 – Распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании концентрации твердых частиц угля в горючей жидкости: 10 мас% (1), 20 мас% (2), 40 мас% (3), 60 мас% (4). Параметры эксперимента: двухжидкостные неперемешанные капли на основе воды и суспензии рапсового масла ($\eta \approx 90$ об%, $\Delta_{av} \approx 40$ мкм, $R_{d0} \approx 1,061$ мм, $T_a \approx 843$ К).

На рисунке 2.6.9.2 приведены распределения вторичных фрагментов по размерам при варьировании концентрации твердых частиц угля в горючей жидкости: 10 мас% (1), 20 мас% (2), 40 мас% (3), 60 мас% (4). Выше $\gamma \approx 60$ мас% капли суспензионных топлив не фрагментируют. Регистрируется высыхание приповерхностного слоя и растрескивание обезвоженной частицы без образования вторичных фрагментов. Снижение концентрации твердых частиц в составе двухжидкостной капли приводит к снижению среднего размера вторичных фрагментов. Более крупные вторичные фрагменты могут образовываться из-за агломерации твердых частиц в процессе нагрева [157].

2.6.10 Обобщение результатов экспериментальных исследований

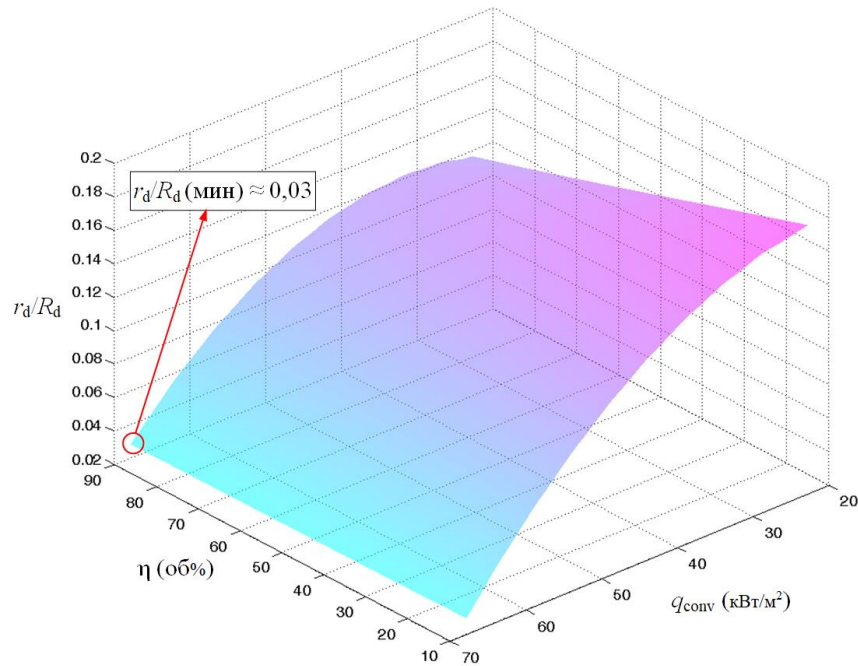
Для обобщения результатов проведенных исследований выделены зависимости, характеризующие масштабы уменьшения размеров капли от двух

наиболее значимых факторов (теплового потока и концентрации горючей жидкости) (рисунок 2.6.10.1) и отношения площадей поверхности испарения до и после распада от группы факторов (теплового потока и концентрации горючей жидкости) (рисунок 2.6.10.2). Приведенные поверхности позволяют прогнозировать оптимальные условия, необходимые для получения мелких вторичных фрагментов и максимальной площади поверхности испарения S_1/S_0 . Выбор определяющих факторов при построении 3D зависимостей обусловлен тем, что именно температура (соответственно, подводимый тепловой поток), концентрация горючего компонента и начальные размеры капель оказывают наибольшее влияние на интегральные характеристики процесса микро-взрыва. Данные зависимости важны как для развития математических моделей микро-взрывного распада, так и для практического использования. В большинстве современных моделей в качестве основных эмпирических констант принимают средний, максимальный и минимальный размеры вторичных фрагментов, а также их количество. Так, например, в двигателестроении важным является получение максимальной эффективности процесса горения топливной смеси за счет увеличения площади поверхности испарения вторичных фрагментов.

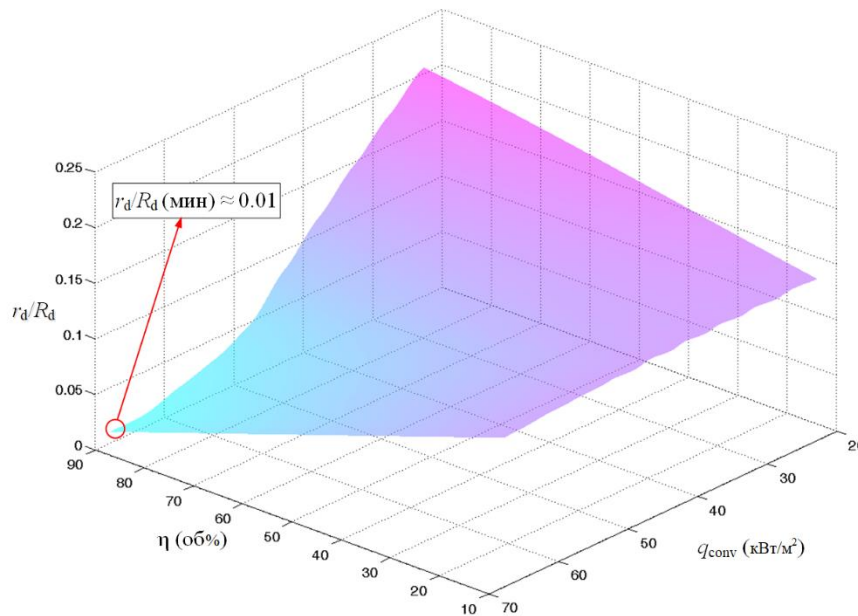
На рисунке 2.6.10.3 представлены 3D поверхности для прогнозирования условий достижения максимального количества вторичных фрагментов на основе интегральных отношений, например: a – отношение площадей поверхности испарения до и после распада; b – отношение r_{cdmin}/R_{d0} .

Максимальное увеличение площади поверхности испарения соответствует среднему поверхностному натяжению и минимальной вязкости. На рисунке 2.6.10.3 представлены средние значения r_{cdmin}/R_{d0} и S_1/S_0 , полученные в результате серии экспериментов без разделения на режимы частичной и полной фрагментации. Усреднение проводилось на основе отдельных экспериментов с получением распределений вторичных фрагментов по размерам. По распределениям определялся средний размер вторичных фрагментов, с использованием которого выполнялось вычисление отношений r_{cdmin}/R_{d0} и S_1/S_0 . 3D зависимости построены по 25 точкам, остальные точки были получены в результате

аппроксимации. Относительные погрешности определения значений $r_{\text{cdmin}}/R_{\text{d0}}$ и S_1/S_0 при использовании такого подхода соответствовали диапазону 3–5%.

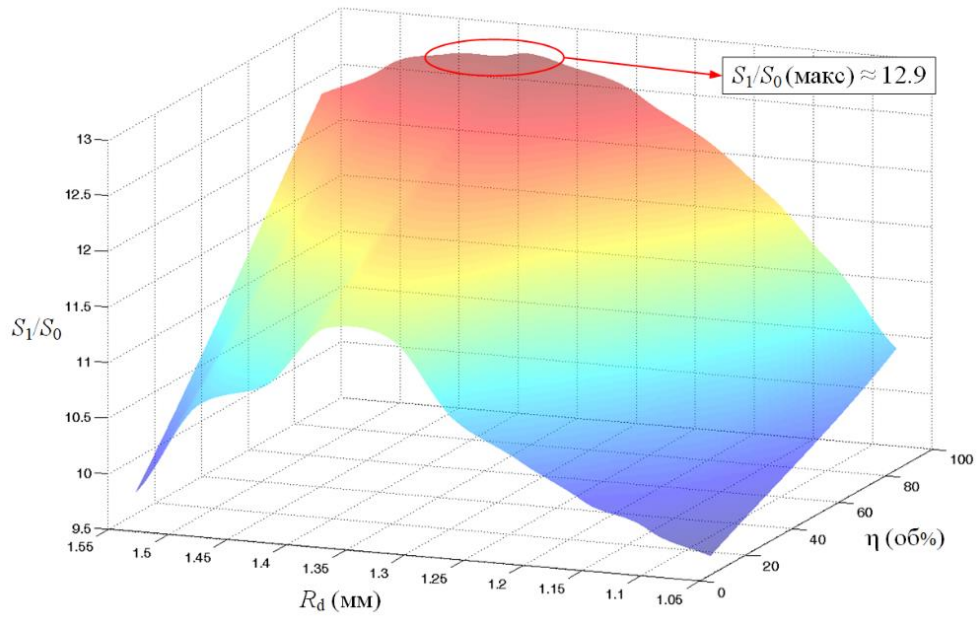


a

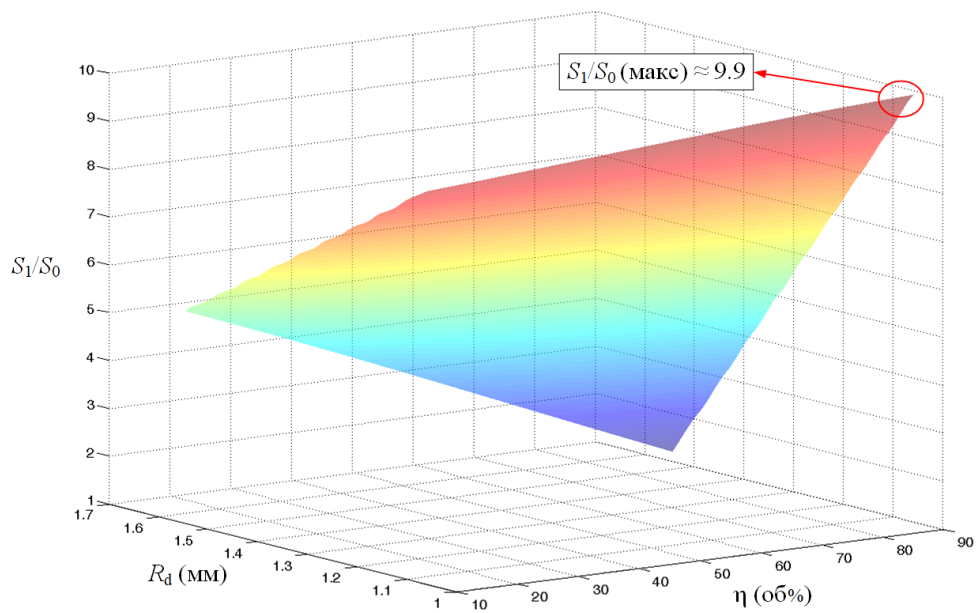


б

Рисунок 2.6.10.1 – Пространственные зависимости отношения размеров вторичных фрагментов к размеру родительской двухжидкостной капли от теплового потока при нагреве в потоке разогретого воздуха и концентрации горючего компонента: *a* – на основе дизельного топлива; *б* – на основе рапсового масла.



a



б

Рисунок 2.6.10.2 – Пространственные зависимости отношения площадей поверхности испарения после и до распада от начального размера двухжидкостной капли и концентрации горючего компонента: *a* – на основе дизельного топлива; *б* – на основе распового масла.

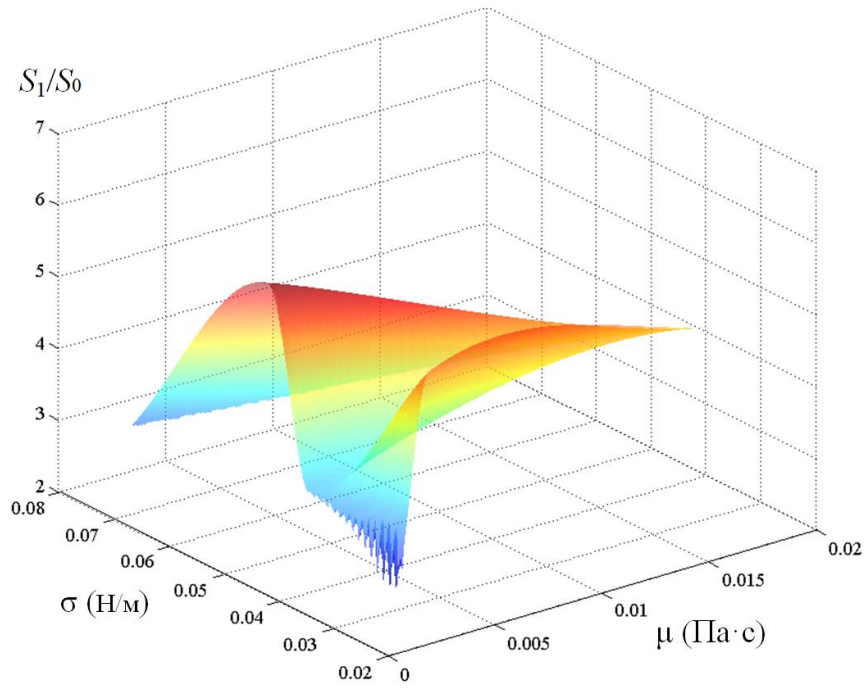
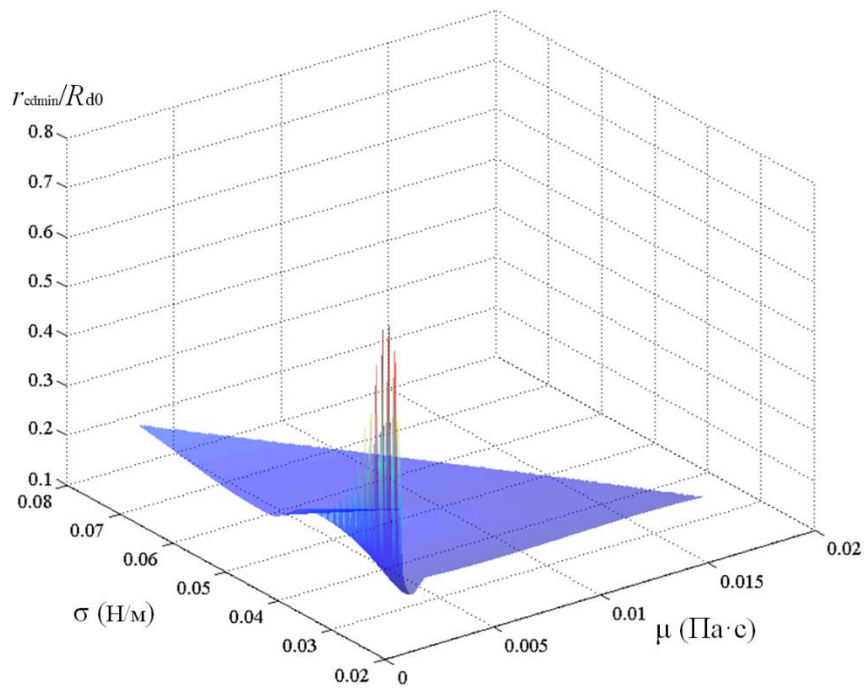
*a**б*

Рисунок 2.6.10.3 – 3D поверхности для прогнозирования условий достижения максимально возможного количества вторичных фрагментов: *a* – отношение площадей поверхности испарения до и после распада S_1/S_0 ; *б* – отношение минимальных размеров вторичных фрагментов к размеру исходной капли r_{cdmin}/R_{d0} .

Полученные пространственные зависимости значений двух ключевых отношений от вязкости и поверхностного натяжения исследованных эмульсий важны для оценки диапазонов их изменения при идентичных условиях нагрева. На рисунке 2.6.10.3 видно, что за счет выбора компонентного состава эмульсий можно менять значения S_1/S_0 и r_{cdmin}/R_{d0} в несколько раз. С учетом этих данных можно выбирать тип и концентрации компонентов, принимая во внимание другие индикаторы и факторы, например, экологические, энергетические и экономические. В данном случае целесообразно использовать MCDM (Multiple-criteria decision-making) [173].

Для более глубокого анализа физики микро-взрывного распада необходимо определить энергетический баланс вторичных фрагментов. Механическая энергия, обеспечиваемая быстрым (<1 мс [48]) испарением воды в составе двухжидкостной капли, преобразуется в кинетическую энергию движения вторичных фрагментов и увеличение поверхностной энергии за счет фрагментации исходной капли. Отношение сил инерции и поверхностного натяжения известно, как число Вебера We , которое широко используется в области распыления. Настоящие результаты представлены в виде отношения поверхностной и кинетической энергий вторичных фрагментов (2.6.1), что аналогично обратному числу Вебера [48]:

$$\frac{\sigma 4\pi r_{cd}^2}{\frac{1}{2} m_{cd} \cdot u_{cd}^2} = \frac{12}{We} = f\left(\frac{1}{r_{cd} \cdot u_{cd}^2}\right). \quad (2.6.1)$$

На рисунке 2.6.10.4 представлены соотношения кинетической и поверхностной энергии вторичных фрагментов при варьировании вязкости составов (1 – $\mu=0,00259$ Па·с; 2 – $\mu=0,00377$ Па·с; 3 – $\mu=0,01668$ Па·с). На рисунке 2.6.10.5 представлены соотношения кинетической и поверхностной энергии вторичных фрагментов для составов при варьировании межфазного натяжения (1 – $\sigma_0=0,04257$ Н/м; 2 – $\sigma_0=0,02249$ Н/м; 3 – $\sigma_0=0,00341$ Н/м). На рисунке 2.6.10.6 представлены соотношения кинетической и поверхностной энергии вторичных фрагментов для составов при варьировании поверхностного натяжения (1 – $\sigma=0,07269$ Н/м; 2 – $\sigma=0,0474$ Н/м; 3 – $\sigma=0,0401$ Н/м).

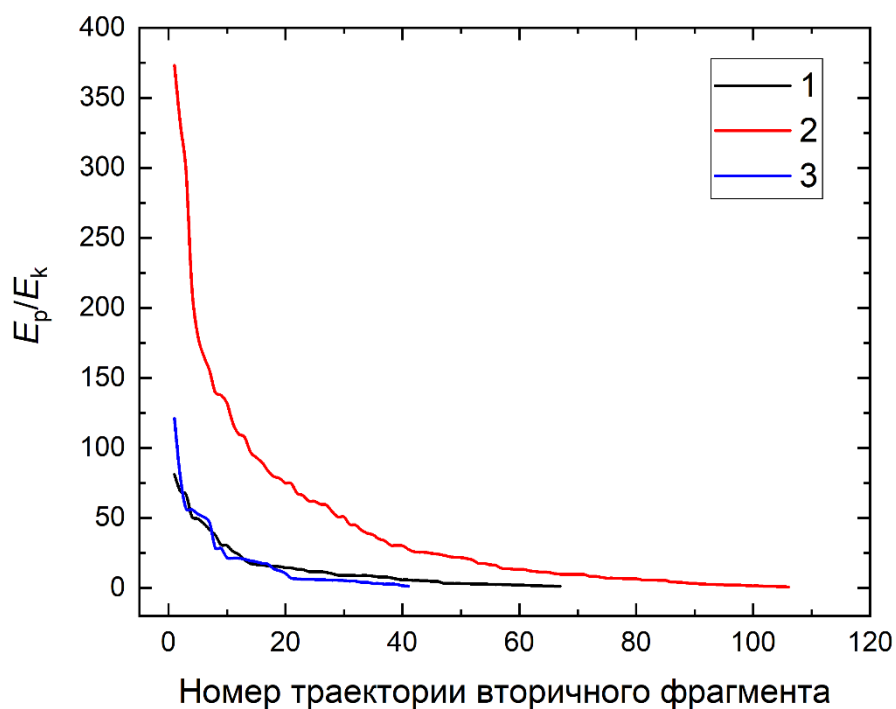


Рисунок 2.6.10.4 – Соотношения поверхностной и кинетической энергии вторичных фрагментов для составов при варьировании вязкости:
 1 – $\mu=0,00259$ Па·с; 2 – $\mu=0,00377$ Па·с; 3 – $\mu=0,01668$ Па·с.

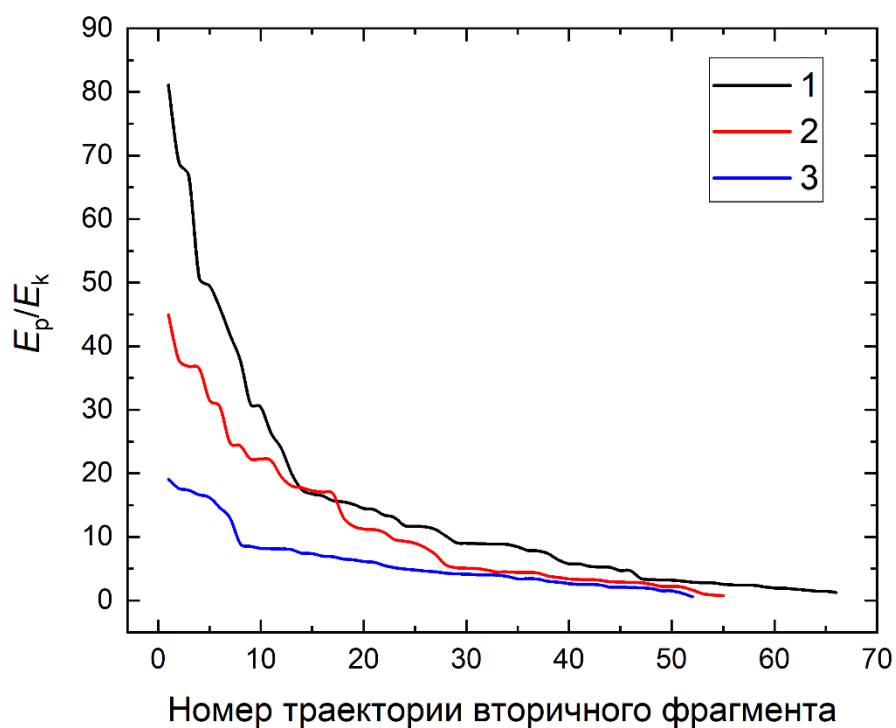


Рисунок 2.6.10.5 – Соотношения поверхностной и кинетической энергии вторичных фрагментов для составов при варьировании межфазного натяжения:
 1 – $\sigma_0=0,04257$ Н/м; 2 – $\sigma_0=0,02249$ Н/м; 3 – $\sigma_0=0,00341$ Н/м.

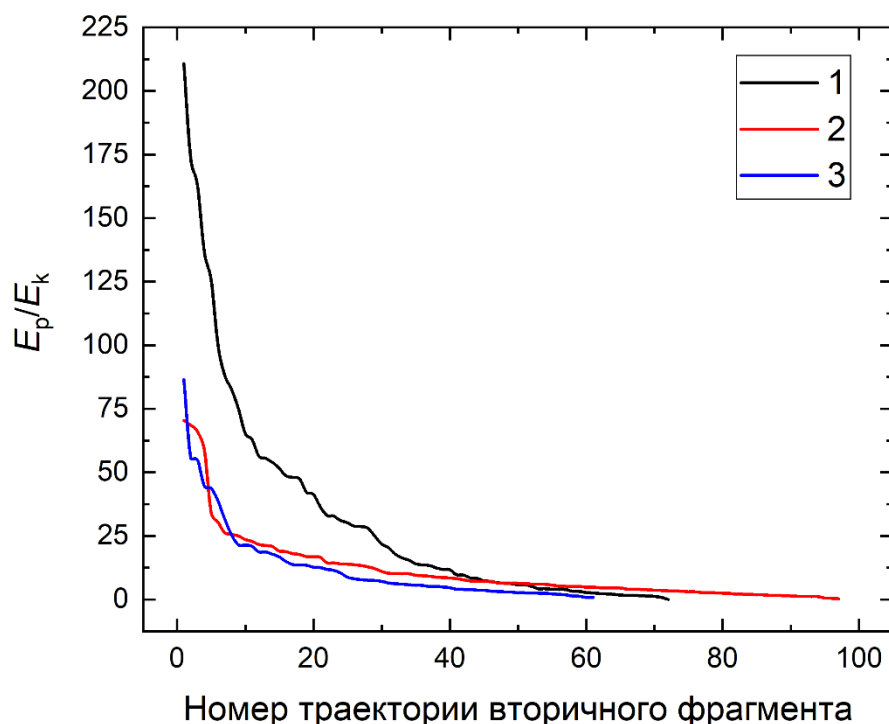


Рисунок 2.6.10.6 – Соотношения поверхностной и кинетической энергии вторичных фрагментов для составов при варьировании поверхностного натяжения: 1 – $\sigma=0,07269$ Н/м; 2 – $\sigma=0,0474$ Н/м; 3 – $\sigma=0,0401$ Н/м.

При сравнительном анализе рисунков 2.6.10.4–2.6.10.6 выделено достаточно существенное влияние трех исследованных характеристик жидкостей на соотношения поверхностной и кинетической энергий. Особенно масштабным оказывается влияние вязкости и поверхностного натяжения жидкости на количество вторичных капель и отношения исследованных энергий. Как и можно было предположить, чем выше поверхностное натяжение и вязкость, тем выше отношение поверхностной энергии к кинетической. В случае же рассмотрения межфазного натяжения влияние этой характеристики на отношение энергий при разном количестве вторичных капель сложно считать каким-то значимым, т.е. хорошо видно, что основную роль играют другие характеристики, в частности, вязкость и поверхностное натяжение. Чем выше значения этих двух характеристик для используемой жидкости, тем для большего количества вторичных капель отношение поверхностной и кинетической энергий выше. Эти закономерности целесообразно использовать при планировании применения микро-взрывного

измельчения для высоковязких жидкостей с высокими значениями поверхностного натяжения. Кроме того, приведенные на рисунках 2.6.10.4–2.6.10.6 результаты представляют интерес для развития современных моделей микро-взрывного измельчения капель жидкостей, так как достаточно часто при проведении теоретических исследований используются эмпирические выражения и константы, полученные на основе обработки экспериментальных данных.

Таблица 2.6.10.1 – Влияние основных варьируемых параметров на прирост отношения свободной поверхности жидкости после и до распада (S_1/S_0).

Варьируемый параметр	Диапазон изменения варьируемого параметра	Диапазон изменения S_1/S_0	Прирост S_1/S_0 на единицу варьируемого параметра
Температура газовой среды (T_a)	673...783 К	35,18...58,43	0,211 1/К
Начальная температура негорючего компонента (T_{w0})	273...353 К	6,04...12,57	0,082 1/К
Радиус исходной капли (R_{d0})	1,06...1,53 мм	7,74...15,27	16,021 1/мм
Концентрация горючего компонента (η)	10...90 об%	10,25...16,32	0,076 1/об%
Вязкость (μ)	2,59...16,68 мПа·с	8,05...9,72	0,119 1/(мПа·с)
Поверхностное натяжение (σ)	40,1...72,69 мН/м	7,80...12,03	0,130 1/(мН/м)
Расстояние между соседними каплями в группе (L/R_d)	4,33...12,2	9,24...11,67	0,309

В таблице 2.6.10.1 представлен удельный вклад основных факторов, оказывающих влияние на количество и размеры вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада двухжидкостных капель при

конвективном нагреве, и описанных в разделах 2.6.1 – 2.6.8 настоящей работы. Данные, представленные в таблице 2.6.10.1, получены при усреднении данных, описанных в разделах 2.6.1 – 2.6.8 настоящего исследования. Проведенный анализ показывает, что наибольший удельный вклад на прирост свободной поверхности жидкости оказывает температура газовой среды, а также размер исходной двухжидкостной капли. За счет варьирования совокупности представленных факторов, можно обеспечить оптимальные (для конкретных приложений) характеристики вторичных фрагментов. Полученные данные являются уникальными и могут послужить основой для развития существующих и создания новых газопарокапельных технологий.

Также при проведении экспериментальных исследований по изучению компонентного состава вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада двухжидкостных капель (раздел 2.6.5) была сформулирована физическая модель процесса формирования вторичных фрагментов, содержащих воду и горючую жидкость, при реализации режимов частичной (паффинг) и полной (микро-взрыв) фрагментации.

На рисунке 2.6.10.7 представлена схема с демонстрацией установленных в проведенных экспериментах закономерностей фрагментации двухжидкостных капель с последующим образованием вторичных фрагментов, содержащих воду и рапсовое масло. Выделены два принципиально отличающихся режима: паффинг и микро-взрыв. Физический механизм реализации микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель заключается в достижении на границе вода/горючая жидкость температуры нуклеации воды [118]. Жидкий горючий компонент (рапсовое масло) имеет температуру кипения значительно выше, чем вода, что позволяет воде вблизи межжидкостной границы перегреваться существенно выше температуры кипения при атмосферном давлении (373,15 K). Поскольку межжидкостная граница имеет волнообразную структуру, то зародышеобразование и дальнейший рост пузыря происходят непосредственно вблизи нее (гетерогенная нуклеация). Именно локальный перегрев воды в двухжидкостных каплях, приводящий к цепной активации низкотемпературных

центров парообразования [174], является основной причиной их разрушения. Проведенные эксперименты с добавлением флуорофора к воде позволили обосновать перегрев негорючего компонента вблизи границы раздела с горючим жидким компонентом более чем на 10-25 К относительно 373,15 К. Данной степени перегрева достаточно для зарождения пузырьков в объеме капли, ускоренного роста их размеров, разрушения пленки из горючего компонента вокруг водяного ядра.

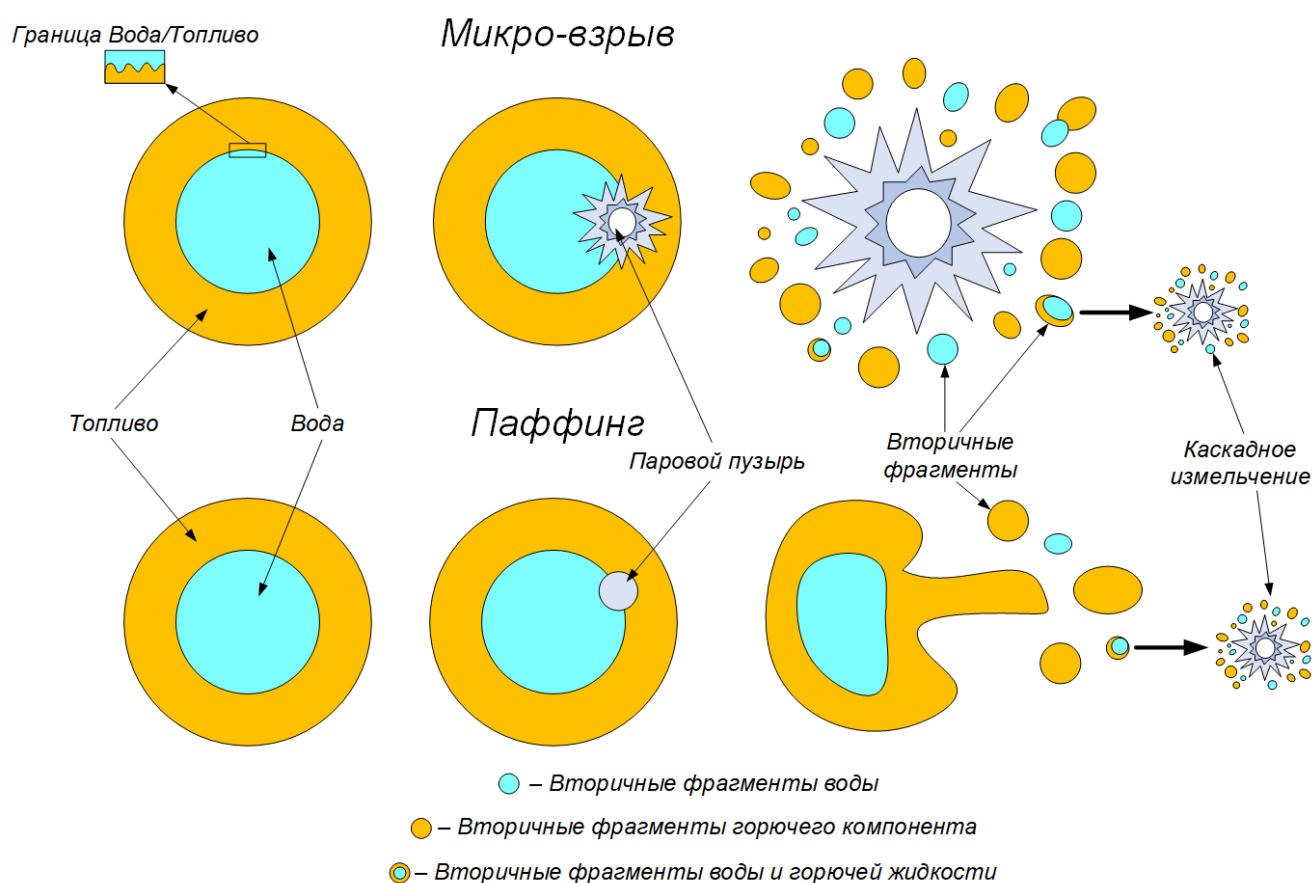


Рисунок 2.6.10.7 – Физическая модель процесса формирования вторичных фрагментов, содержащих воду и рапсовое масло, при микро-взрыве и паффинге исходных двухжидкостных капель

Сравнительный анализ видеogramм проведенных экспериментов и результатов опытов [133] позволил сформулировать вывод о том, что в зависимости от интенсивности парообразования воды в объеме капли различаются режимы микро-взрывной фрагментации и их последствия. В настоящей работе основное внимание уделялось анализу последствий фрагментации родительных

капель в двух режимах. В [133] изучено влияние степени перегрева воды относительно температуры кипения на реализацию режима распада. При реализации режима паффинг паровые пузырьки образуются локально. Их дальнейшее объединение и выход на поверхность капли сопровождается отрывом определенных объемов жидкости. Как следствие, формируется небольшое количество (как правило, от 2-3 шт до 7-12 шт) достаточно крупных вторичных фрагментов размерами от 0,05 мм до 0,15 мм [133]. Паровой пузырь, выходя и схлопываясь на поверхности капли, провоцирует отрыв небольших фрагментов с малыми объемами масляной оболочки. Вторичные фрагменты с размерами $r_{cd} < 0,05$ мм образуются в той зоне, где толщина пленки жидкости вокруг пузыря минимальна (менее 0,01 мм). В данном случае фронт ударной волны, образующийся в результате схлопывания парового пузыря, также распространяется в направлении центра капли (водяного ядра) через значительно больший по толщине слой жидкости и, соответственно, сильнее затухает, что провоцирует отрыв крупных фрагментов жидкости. Как правило, в таком режиме вторичные фрагменты имеют более однородный компонентный состав.

При микро-взрыве парообразование происходит значительно более интенсивно. Нередко рост давления паров внутри капли происходит настолько быстро, что каплю разрывает изнутри. При микро-взрыве формирующиеся вторичные фрагменты имеют более разнообразный состав по размерам и содержанию компонентов. Во-первых, это обусловлено тем, что исходная капля полностью разрушается, из-за чего все компоненты в ее составе превращаются в мелкодисперсный аэрозоль. В связи с чем для данного режима характерно образование вторичных фрагментов воды, рапсового масла, а также двухжидкостных вторичных фрагментов, имеющих в своем составе как воду, так и рапсовое масло. Во-вторых, вода в этом случае во всем объеме капли перегрета относительно температуры кипения. Существенное снижение вязкости и поверхностного натяжения воды и масла способствуют интенсификации их растекания и роста размеров межжидкостной границы в капле. Это увеличивает количество центров парообразования и, как следствие, количество пузырьков в

объеме капли. Так как размеры пузырьков существенно отличаются, то в момент распада первых пузырей остальные еще не сформировали паровое ядро в объеме масла или воды. Это приводит к формированию вторичных жидкостных фрагментов с разными размерами и компонентным составом.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных показали, что количество вторичных фрагментов, имеющих в своем составе воду и горючую жидкость, крайне незначительно. Справедливо предположить, что данные жидкостные фрагменты образуются в областях межкомпонентной границы, т.е. где есть контакт воды и горючего компонента. Также такие фрагменты формируются в результате коагуляции вторичных фрагментов, которая реализуется при соударении капель воды и рапсового масла в аэрозольном облаке. В наших ранних работах отмечены подобные эффекты, возникающие при реализации эффектов микро-взрывного измельчения в совокупности движущихся капель [118]. Подобные двухжидкостные фрагменты при попадании в высокотемпературную газовую среду, как правило, быстро измельчаются с отделением капелек, содержащих исходные компоненты. Таким образом, реализуются эффекты каскадного измельчения. Базовые закономерности соответствующих эффектов для фрагментации неоднородных капель в аэрозолях и спреях обсуждены в [5].

В качестве безразмерных критериев, применяемых для описания критических условий микро-взрывного распада, могут применяться критерии, оценивающие соответствие исходных параметров внешней среды и двухжидкостной капли. Безразмерные комплексы, характеризующие критические условия микро-взрывного распада [175], должны учитывать изменение температуры на границе раздела «вода/горючая жидкость» в капле от температуры насыщения низкокипящего компонента (воды); соотношение внутреннего давления в капле и сил, сдерживающих разрушение ее оболочки; изменение объема капли за счет парообразования.

Степень перегрева границы компонентов капли относительно температуры кипения воды правомерно оценивать с использованием безразмерного критерия в виде числа Кутателадзе (Ku). Этот критерий позволяет оценить соотношение

тепловых потоков на определенной поверхности, как границе раздела сред [176–178]. При исследовании процесса нагрева двухкомпонентной капли, с точки зрения степени перегрева зоны контакта воды и топлива, необходимо оценить, насколько энергия, фактически подведенная к исследуемой границе раздела, отличается от энергии, необходимой для полного фазового превращения (теплота испарения воды):

$$Ku = \frac{h'' - h'}{C_p(T - T_{\text{sat}})}, \quad (2.6.2)$$

где h' – удельная массовая энтальпия воды в состоянии насыщения, кДж/кг; h'' – удельная массовая энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг; T_{sat} – справочное значение температуры насыщения воды, К.

Соотношение сил давления паров воды внутри капли и внешнего давления атмосферы в совокупности с силами поверхностного натяжения, необходимое для распада двухжидкостной капли, определяется с применением выражения:

$$\Delta P = \left(\frac{P_{\text{sat}}}{2\sigma_f / R_d + P_{\text{atm}}} \right). \quad (2.6.3)$$

Для выполнения условий микро-взрывного распада это соотношение должно превышать 1. В качестве оценки нижней границы значения P_{sat} правомерно использовать давление насыщения (парообразования), соответствующее температуре воды в области ее контакта с топливом в момент перед микро-взрывом.

Оценки в безразмерном виде роста объема капли вследствие образования парового пузыря, описывающего критические размеры капли вследствие ее наполнения пузырями пара, целесообразно выполнять с использованием числа Бонда [178]:

$$Bo = \frac{gR_d^2}{\sigma\Delta v}, \quad (2.6.4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; R_d – размер (радиус) капли, м; Δv – разность удельных объемов жидкой и паровой фаз, м³/кг; σ – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м.

При вычислении значений критериев, предложенных для оценки критических условий возникновения микро-взрыва, правомерно использовать экспериментальные данные о температуре границы раздела «вода/горючая жидкость» в момент, предшествующий распаду капли. На основании данных об этой температуре можно по известным зависимостям и справочным данным определить другие физические величины, входящие в безразмерные комплексы (давление воды и водяного пара, плотность, вязкость, поверхностное натяжение). Также известны экспериментальные результаты измерения характерного размера (радиуса) двухкомпонентных капель и их объема перед микро-взрывным распадом [126,179]. С применением совокупности этих данных возможно в безразмерных системах координат определить необходимые условия для вторичного измельчения двухжидкостных капель при реализации микро-взрывного распада, однако предложенные безразмерные критерии не позволяют описывать характеристики вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада.

Основными характеристиками микро-взрывного распада двухжидкостных капель в режимах частичной и полной фрагментации выступает отношение площадей свободной поверхности жидкости после и до распада (S_1/S_0), время задержки микро-взрывного распада (τ_p), характеризующее затраты энергии и времени на прогрев границы раздела «вода/горючая жидкость» до условий микро-взрывного распада, а также время формирования аэрозоля, т.е. время полного распада исходной двухжидкостной капли на вторичные фрагменты (τ_s). Соотношение времен задержки распада и времени формирования аэрозоля наглядно демонстрирует

При разделении режимов микро-взрывного распада на микро-взрыв и паффинг, как правило используют визуальный критерий, основанный на количестве и размерах вторичных фрагментов, а также отношение площадей свободной поверхности жидкости после и до распада (S_1/S_0) [133]. Однако такое разделение не всегда дает корректное представление о режиме распада и длительности процесса формирования аэрозоля, т.е. времени за которое можно

обеспечить кратный прирост свободной поверхности жидкости. Так, при реализации режима паффинг, как и при микро-взрыве, от исходной капли могут отделяться вторичные фрагменты с маленькими ($<0,1$ мм) размерами, при этом соотношение S_1/S_0 может практически идентичным в обоих этих случаях. Ключевым отличием этих двух режимов является то, что при для режима паффинг время формирования аэрозоля (τ_s) кратно больше аналогичного времени при реализации микро-взрыва.

В качестве критерия для разделения двух данных режимов в настоящей работе предложен безразмерный критерий F_{cd} , позволяющий учесть одновременный вклад затрат времени, необходимого для прогрева двухжидкостной капли до условий микро-взрывного распада, времени необходимого на образование вторичных фрагментов (τ_s) и соотношения площадей поверхности жидкости после и до распада (S_1/S_0):

$$F_{cd} = \frac{S_1 \cdot \tau_p}{S_0 \cdot \tau_s}. \quad (2.6.5)$$

На рисунке 2.6.10.8 представлены значения безразмерного критерия F_{cd} , полученные по результатам экспериментальных данных, от соотношения средней температуры двухжидкостной капли к температуре газового потока. Эксперименты проводились с использованием экспериментального стенда, представленного на рисунке 2.2.2. В проведенных экспериментах использовались двухжидкостные капли на основе рапсового масла, дизельного топлива и керосина, концентрация горючего компонента составляла 90 об.%. Температура газового потока варьировалась от 630 до 750 К, температура капли (T_d) регистрировалась с помощью малоинерционных термопар.

Как можно видеть из рисунка 2.6.10.8, можно выделить три характерные области: область паффинга, область микро-взрыва и переходная область, где реализуется микро-взрывной распад двухжидкостных капель в смешанном режиме. Стоит отметить, что при микро-взрыве соотношение времени формирования аэрозоля и времени задержки существенно различается от аналогичного показателя при паффинге. Так для микро-взрыва соотношение τ_s/τ_p кратно меньше, чем

аналогичное соотношение при реализации паффинга, т.е. энергия, накопленная в капле, за счет резкого (< 1 мс [108]) вскипания воды высвобождается гораздо быстрее, чем время за которое эта энергия накапливается.

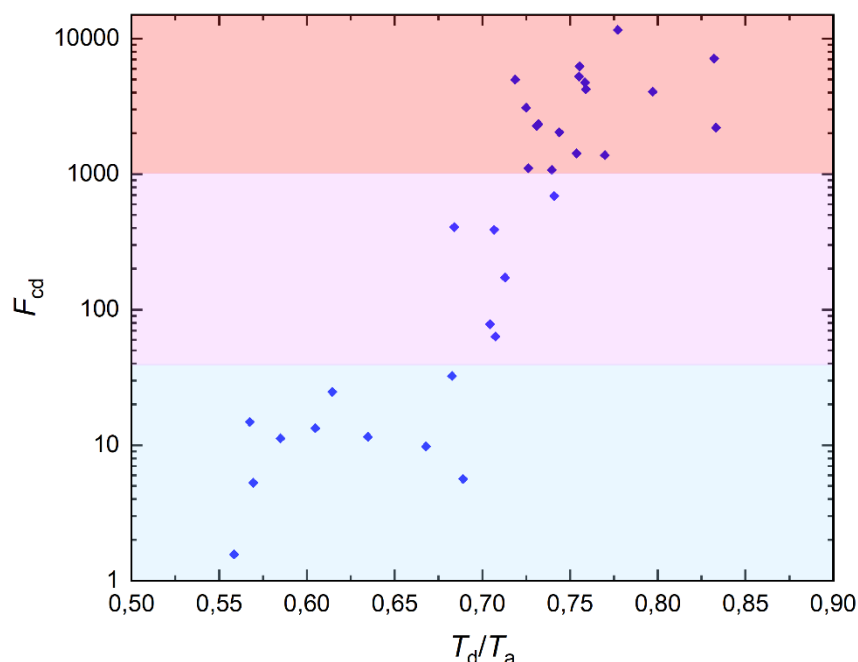


Рисунок 2.6.10.8 – Значения безразмерного критерия F_{cd} от соотношения средней температуры двухжидкостной капли к температуре газового потока, полученные при обобщении экспериментальных данных для капель на основе рапсового масла, дизельного топлива и керосина ($T_a = 630 \dots 750$ К, $R_{d0} = 0,75 \dots 1,2$ мм, $\eta = 90$ об.%).

Таким образом из рисунка 2.6.10.8 можно выделить характерные диапазоны критерия F_{cd} , описывающие режимы микро-взрывного распада с помощью характеристик вторичных фрагментов и затрат времени необходимых на накопление и высвобождение энергии. Так, для микро-взрыва $F_{cd} > 1000$, для паффинга $F_{cd} < 50$, в области $50 > F_{cd} > 1000$ происходит смена режимов от паффинга к микро-взрыву. Чем выше значение данного критерия, тем интенсивнее протекает распад. Применение данного критерия позволит однозначно выделять режимы микро-взрывного распада двухжидкостных капель, не опираясь на визуальную составляющую, что является важным при проектировании новых и модернизации существующих систем вторичного измельчения капель жидкостей.

Выводы по второй главе

1. В проведенных экспериментах установлены типичные распределения образующихся вторичных фрагментов по размерам и количеству, как функции, иллюстрирующих влияние группы параметров и факторов: температуры, теплового потока и схемы нагрева; типа и концентрации горючего компонента; начального размера капли. Наибольшее влияние оказывали тепловой поток и схема нагрева, а также начальный размер родительской капли. Средние размеры вторичных фрагментов варьировались в широком диапазоне 50–150 мкм, минимальные достигали 5 мкм, максимальные – 300 мкм. При сравнении суммарного объема образующихся вторичных фрагментов и исходной родительской капли сформулирован вывод о том, что микро-взрывной распад способствует получению вторичных фрагментов с характерными размерами даже менее 5 мкм.

2. Схема нагрева исходных капель оказывает определяющее влияние на количество и размеры вторичных фрагментов, получаемых в режимах паффинга и микро-взрыва. Максимальное количество вторичных фрагментов ($N_{cd} > 400$) зарегистрировано в опытах с нагревом исходных капель на разогретой твердой поверхности (доминирует кондуктивный теплообмен), а минимальное ($N_{cd} < 220$) – при нагреве в трубчатой муфельной печи (доминирует радиационный теплообмен). В опытах с доминированием конвективного теплообмена регистрировались средние значения количества вторичных фрагментов относительно других исследованных схем.

3. Проведенные эксперименты позволили идентифицировать компонентный состав вторичных фрагментов, определить размеры воды и горючей жидкости в составе вторичных фрагментов, формирующихся при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель. Показано, что эффективное управление этим процессом обеспечивается за счет варьирования значений группы исходных параметров, в частности, начального размера родительских капель, концентрации воды и топлива в них, температуры и схемы нагрева. Полученные результаты показывают, что доля

воды и рапсового масла практически не отличается от концентрации в исходных каплях. Наибольшее влияние на размеры вторичных фрагментов оказывает концентрация горючей жидкости и схема нагрева. Так, при нагреве в пламени размеры вторичных фрагментов рапсового масла отличались от аналогичных характеристик в муфельной печи на 35%. Установлены существенные отличия по компонентному составу вторичных фрагментов при разных механизмах подвода тепла. Выполненные измерения с применением методики LIF позволили обосновать разную степень измельчения воды и горючего компонента. Наибольшую эффективность, с точки зрения вторичного измельчения, показала схема с нагревом двухжидкостных капель в пламени.

4. На характеристики вторичных фрагментов существенное влияние оказывает поверхностное натяжение и вязкость горючего компонента. При варьировании вязкости и поверхностного натяжения можно добиться существенной интенсификации микро-взрывного распада и увеличения площади поверхности испарения в 6–7 раз. Максимальное измельчение капель можно обеспечить при минимальном значении поверхностного натяжения и вязкости, а также температуре потока воздуха более 623 К при конвективном нагреве. Установлено, при распаде двухжидкостных неперемешанных капель средние размеры вторичных фрагментов в 3 раза меньше, чем для эмульсий.

5. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить отличия размеров вторичных фрагментов, образующихся при распаде двухжидкостных капель в составе группы. Эти отличия отражают коллективные эффекты взрывной фрагментации, которые реализуются при нагреве совокупности двухжидкостных капель. Показано, что первые по направлению движения потока разогретого воздуха капли фрагментируют с формированием более мелкого аэрозоля. За счет варьирования расстояния между последующими каплями, т.е. дисперсности капель в аэрозольном облаке можно управлять размерами вторичных фрагментов от каждой из капель. В частности, установлено, что при расположении исходных капель на расстоянии более 8–10 радиусов относительно друг друга размеры вторичных фрагментов от каждой из капель практически не отличаются,

т.е. при такой дисперсности исходного аэрозоля топлива можно обеспечить заполнение камеры топливными фрагментами близких размеров. При большей относительной плотности расположения исходных капель топлив между собой установлены эффекты взаимодействия исходных и вторичных капелек между собой. Установлено, что в результате взаимодействия вторичных фрагментов с поверхностью исходных капель может произойти один из режимов фрагментации (паффинг или микро-взрыв).

6. При микро-взрыве группы двухжидкостных капель зарегистрированы различные эффекты взаимодействия образующихся вторичных фрагментов с соседними исходными и вторичными каплями. В качестве основных выделены следующие: столкновение капель между собой с последующим образованием более мелких капель и микро-взрывом последних (т.е. микро-взрыву предшествовали соударения капель); распад одной капли с воздействием вторичных фрагментов на соседние капли (цепные механизмы фрагментации соседних капель за счет высоких скоростей и кинетической энергии вторичных капель); комбинированные режимы паффинг и микро-взрыв; столкновение капель в режиме разлета или отскока с последующим перераспределением горючей и негорючей жидкости, приводящем к ускорению или замедлению процесса паффинг или микро-взрыв; наиболее мелкие вторичные капли практически мгновенно зажигались после формирования.

7. Результаты экспериментов важны для развития технологий зажигания жидких и суспензионных топлив, а также термической и огневой очистки жидкостей. В результате обобщения полученных экспериментальных данных установлены наиболее рациональные условия измельчения двухжидкостных капель в условиях варьирования размеров, свойств родительских капель, концентрации компонентов, температуры и схемы нагрева. В частности, показано, что за счет микро-взрывного распада можно более чем в 10 раз уменьшить размеры капель и в несколько раз увеличить отношение площадей поверхности. Если учитывать хорошо известные экспоненциальные зависимости времен задержки зажигания топлив и скоростей испарения от температуры, то правомерен вывод о

перспективах снижения требуемых температур нагрева за счет микро-взрывного распада. С использованием установленных значений r_{cd}/R_d и S_1/S_0 для разных компонентных составов капель и данных многочисленных работ по регистрации зависимостей времен задержки зажигания и испарения неоднородных жидкостей (например, [102,180,181]) можно прогнозировать диапазоны снижения температур нагрев и потенциальной экономии энергоресурсов при создании технологий распыления жидкостей разного назначения.

8. Создана информационная база данных для развития современных моделей распада двухжидкостных капель. В частности, на достаточно типичных примерах определены значения средних, максимальных и минимальных размеров вторичных фрагментов, а также их количество. На основе анализа результатов исследований [50] сформулирован вывод о том, что в современных и перспективных моделях средние размеры вторичных фрагментов задаются в качестве эмпирических констант или функций. Поэтому приведенные данные в настоящей работе представляют интерес для использования в таких моделях. Кроме того, современные и перспективные модели в качестве критерия микро-взрывного распада используют либо достижение температуры негорючего компонента (воды) значений, соответствующих кипению, либо рост пазового пузыря в объеме капли до размеров, превышающих 3–4 начальных размера последней. В проведенных экспериментах регистрировалось выполнение одного или двух критериев одновременно. Установлена общая закономерность, заключающаяся в том, что при минимальных достаточных тепловых потоках выполнялся критерий по температуре, а при интенсификации нагрева определяющую роль начинал играть критерий по росту размеров парового пузыря. Максимальные значения S_1/S_0 (соответствовали условиям формирования облака мелкодисперсных вторичных фрагментов) зарегистрированы при выполнении обоих критериев.

Глава 3. Теоретические исследования характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде

3.1 Модель распада двухжидкостной капли по росту давления и расширению паров в паровой пленке

Исследуемая двухжидкостная капля располагается в газовой среде. Предполагается, что вода вблизи границы раздела «вода/горючая жидкость» достигла метастабильного состояния (перегрева), т.е. условий микро-взрывного распада [6,118]. Именно локальный перегрев воды в двухжидкостных каплях, приводящий к цепной активации низкотемпературных центров парообразования [174], является основной причиной их разрушения. Вблизи границы раздела «вода/горючая жидкость» образуется паровая прослойка толщиной δ . При микро-взрыве двухжидкостных капель и взрыве «обычных» взрывчатых веществ имеются существенные различия. При взрыве «обычного» взрывчатого вещества практически нет ограничения на возникающее давление в центре взрыва, при микро-взрыве двухжидкостной капли давление в паровой прослойке не может превышать давление насыщенных паров воды при температуре ее вскипания [182].

Увеличение размеров капли происходило за счет постоянного притока паров с границы раздела «вода/горючая жидкость», давление паров на границе задавалось в качестве постоянной величины. Согласно ранее полученным экспериментальным данным, температура воды на границе «вода/горючая жидкость» перед микро-взрывным распадом внутри двухжидкостных капель может достигать 10-15 К выше температуры кипения воды [6,118]. При такой температуре, давление насыщенных паров воды выше атмосферного и может достигать 170 кПа при температуре воды 388 К, соответственно. Исходя из степени перегрева задавалось значение избыточного давления P_w на границе «вода/горючая жидкость».

На рисунке 3.1.1 представлена схема области решения задачи микро-взрывного распада двухжидкостной капли. При рассмотрении задачи микро-взрывного распада двухжидкостной капли предполагалось, что в формировании

вторичных фрагментов участвует только топливная оболочка, т.е. в настоящем исследовании не учитывается фрагментация водяного ядра. Как показали ранние исследования, вторичные фрагменты воды, образующиеся в результате микро-взрывного распада, составляют не более 10% от общего объема вторичных фрагментов и представляют собой крупные жидкостные фрагменты с размерами 0,15 мм и более [133].

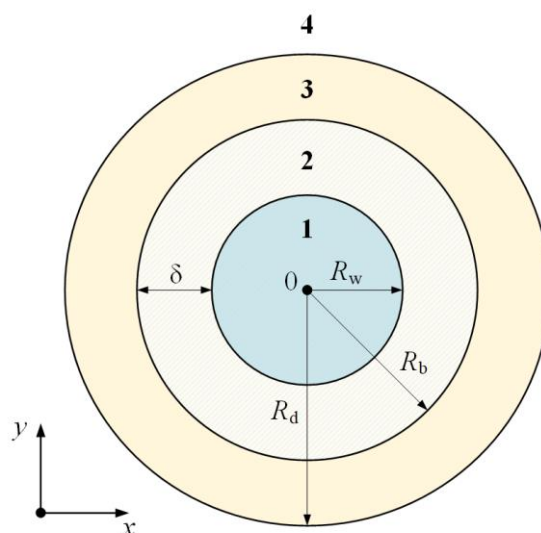


Рисунок 3.1.1 – Схема области решения (1 – вода; 2 – пары воды; 3 – топливо; 4 – воздух; δ – толщина парового слоя).

Для решения задачи микро-взрывной фрагментации неоднородной капли применялся подход Эйлера, который основывался на использовании неподвижной равномерной расчетной сетки. Отслеживание перемещения межфазной границы осуществляется с помощью метода объема жидкости (VoF) [183]. В методе объема жидкости все фазы представляют собой единую многокомпонентную среду, а распределение фаз в расчетной области определяется с помощью функции маркера $F(x, y, z, t)$. Объемная доля фазы в расчетной ячейке принимается равной $F(x, y, z, t) = 0$, в случае если ячейка пустая, $F(x, y, z, t) = 1$, в случае если ячейка полностью заполнена фазой, $0 < F(x, y, z, t) < 1$, в случае если через ячейку проходит граница раздела фаз. В каждой ячейке выполняется условие:

$$\sum_{i=1}^{N_p} F_i = 1, \quad (3.1.1)$$

где N – количество фаз.

Поскольку свободная поверхность движется вместе с жидкостью, отслеживание перемещения свободной границы в пространстве осуществляется путем решения уравнения переноса объемной доли жидкой фазы в ячейке. Уравнение неразрывности для фаз в модели VOF имеет следующий вид:

для масла:

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{v} F_2 \right) = 0; \quad (3.1.2)$$

для пара:

$$\frac{\partial F_3}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{v} F_3 \right) = 0. \quad (3.1.3)$$

Уравнение моментов для фаз в модели VOF:

для пара:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{12} \vec{v} \right) + \nabla \cdot \left(\rho_{12} \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_{12} \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + f_{v12}, \quad (3.1.4)$$

где $\rho_{12} = \rho_1 \cdot F_1 + \rho_2 \cdot F_2$, $\mu_{12} = \mu_1 \cdot F_1 + \mu_2 \cdot F_2$.

для масла:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_{13} \vec{v} \right) + \nabla \cdot \left(\rho_{13} \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_{13} \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho_{13} \vec{g} + f_{v13}, \quad (3.1.5)$$

где $\rho_{13} = \rho_1 \cdot F_1 + \rho_3 \cdot F_3$, $\mu_{13} = \mu_1 \cdot F_1 + \mu_3 \cdot F_3$.

Поверхностное натяжение – это поверхностная сила, которая преобразуется в объемную силу f_v с помощью модели непрерывной поверхностной силы (CSF), разработанной Brackbill [184]:

для пара:

$$f_{v12} = \sigma_{12} \frac{F_1 \rho_1 \kappa_1 \nabla F_1 + F_2 \rho_2 \kappa_2 \nabla F_2}{0.5(\rho_1 + \rho_2)}, \quad \kappa_2 = -\kappa_1 = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla F_2}{|\nabla F_2|} \right). \quad (3.1.6)$$

для масла:

$$f_{V13} = \sigma_{13} \frac{F_3 \rho_3 \kappa_3 \nabla F_3 + F_1 \rho_1 \kappa_1 \nabla F_1}{0.5(\rho_3 + \rho_1)}, \quad \kappa_3 = -\kappa_1 = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla F_3}{|\nabla F_3|} \right). \quad (3.1.7)$$

Граничные условия для решения задачи микро-взрывного распада представлены на рисунке 3.1.2.

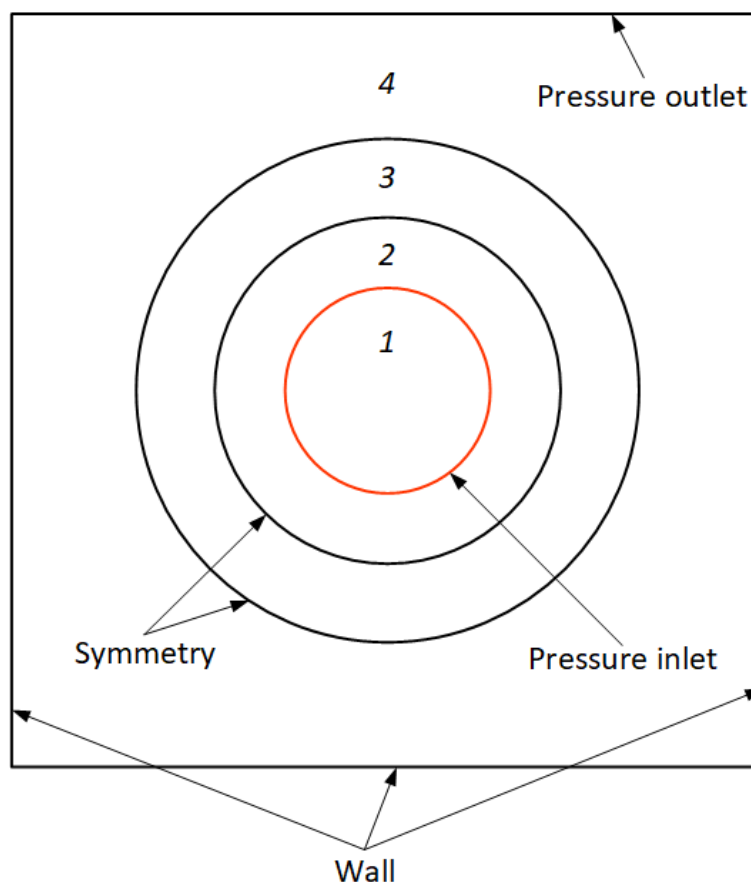


Рисунок 3.1.2 – Граничные условия для решения задачи микро-взрывного распада двухжидкостной капли (1 – вода; 2 – пары воды; 3 – топливо; 4 – воздух).

Анализ влияния скорости нагрева на степень перегрева воды был представлен в исследовании [126]. Как показали результаты термодарных измерений, а также измерений с использованием метода PLIF, в условиях теплообмена (рисунки 2.2.1 – 2.2.8) скорости нагрева не превышают 300 К/с. На рисунке 3.1.3 представлены обобщенные данные исследования [126] и данные других авторов [185–190]. Значения степени перегрева (рисунок 3.1.3)

определялись как температура воды на границе раздела вода/горючая жидкость в момент микро-взрывного распада.

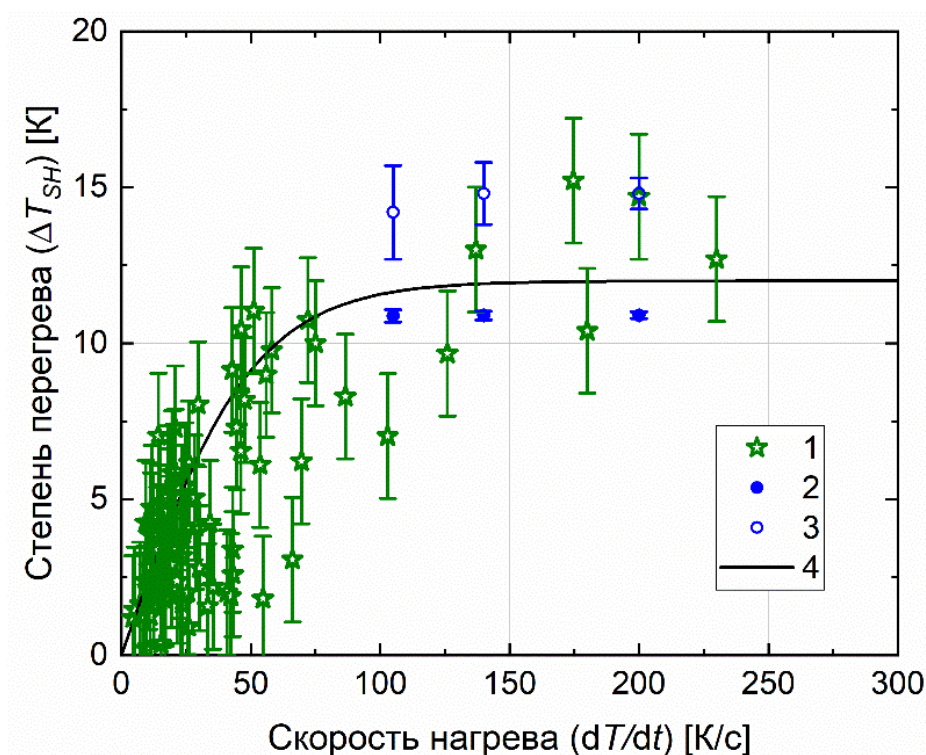


Рисунок 3.1.3 – Значения степени перегрева $\Delta T_{SH}=T_N-T_B$ в экспериментах с двухжидкостными каплями, полученные методом PLIF [126] (1), и в экспериментах [176] (2, 3), аппроксимационная кривая (4).

В исследовании [126] установлено, что в диапазоне скоростей нагрева до 300 К/с значения степени перегрева не превышают 15 К. На основе полученных данных выполнено обобщение в виде аппроксимационного выражения (черная линия на рисунок 3.1.3):

$$\Delta T_{SH} = T_N - T_B = 12 \cdot \tanh((dT / dt) / 50), 0 \leq (dT / dt) \leq 300 \text{ К / с}, \quad (3.1.8)$$

где (dT / dt) – скорость нагрева в К/с.

Зная скорость нагрева воды в составе двухжидкостных капель, на основании зависимости представленной на рисунке 3.1.4, задавалось максимальное избыточное давление водяного пара на границе «вода/горючая жидкость».

На рисунке 3.1.4 представлена зависимость избыточного давления насыщенных паров воды (P_w) от степени перегрева воды выше температуры кипения при атмосферном давлении (ΔT_{sh}) [191].

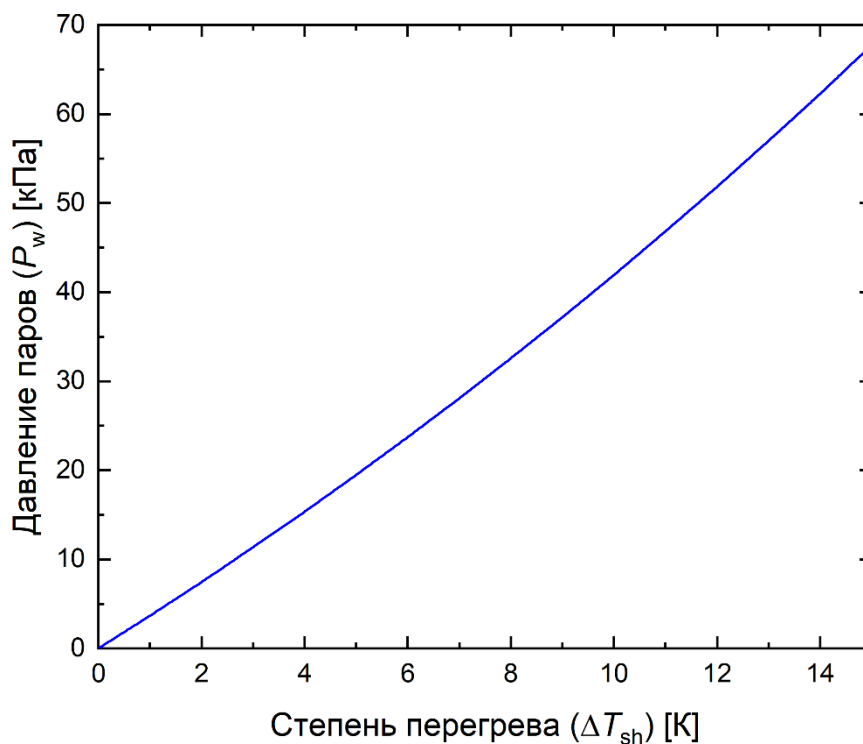


Рисунок 3.1.4 – Зависимость избыточного давления насыщенных паров воды (P_w) от степени перегрева воды выше температуры кипения при атмосферном давлении (ΔT_{sh}).

3.2 Апробация и достоверность, верификация разработанной модели

Тестовые результаты расчетов с использованием разработанной математической модели по прогнозированию средних размеров вторичных фрагментов верифицированы при сравнении с экспериментальными данными, полученными при тех же исходных параметрах (начальные размеры капель, скорость нагрева, концентрации жидкостей и др.).

На рисунке 3.2.1а представлены типичные кадры микро-взрывного распада двухжидкостной капли на основе рапсового масла, полученные по результатам математического моделирования. Также на рисунке 3.2.1б приведены типичные видеокadres, полученные по результатам экспериментов для двухжидкостных

капель на основе рапсового масла. Как можно видеть из сравнения рисунков 3.2.1а, 3.2.1б стадии распада двухжидкостных капель очень похожи. На начальном этапе происходит увеличение капли в размерах за счет притока паров. Далее, по достижению критического размера капли происходит разрушение внешней оболочки и образование жидкостных фрагментов.

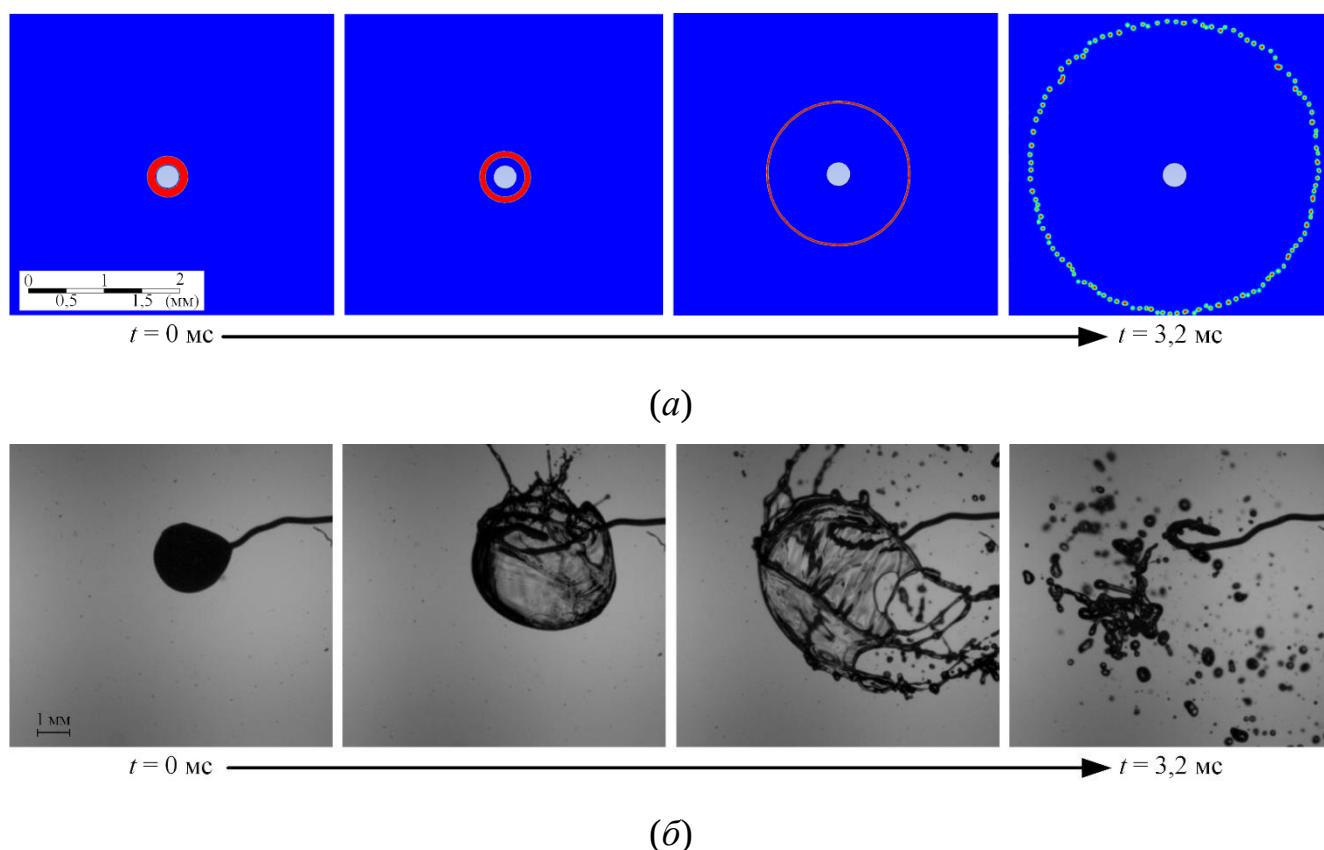


Рисунок 3.2.1 – Типичные видеокадры микро-взрывного распада двухжидкостной капли ($R_{d0} = 1,1$ мм) на основе рапсового масла, полученные по результатам математического моделирования (а) и эксперимента (б).

На рисунке 3.2.2 показаны зависимости средних размеров вторичных фрагментов от температуры газового потока T_a . Экспериментальные данные, показанные на рисунке 3.2.2, соответствуют схеме нагрева при нагреве капель в потоке разогретых газов (рисунок 2.2.1). Теоретические расчеты проведены при варьировании избыточного давления насыщенных паров $P_w = 10...50$ кПа и концентрации горючего компонента 90 об% для двух топливных композиций: вода/дизельное топливо и вода/рапсовое масло.

Хорошо видно (рисунок 3.2.2) удовлетворительное согласие экспериментальных и теоретических данных. Максимальные отклонения не превышают 10 %. Из рисунка 3.2.2 видно, что средние размеры вторичных фрагментов, полученные по результатам математического моделирования, имеют меньшие значения, чем в эксперименте. Это связано с тем, что разработанная модель не учитывает образования вторичных фрагментов воды, которые, как правило имеют большие размеры, что приводит к укрупнению средних размеров вторичных фрагментов в эксперименте.

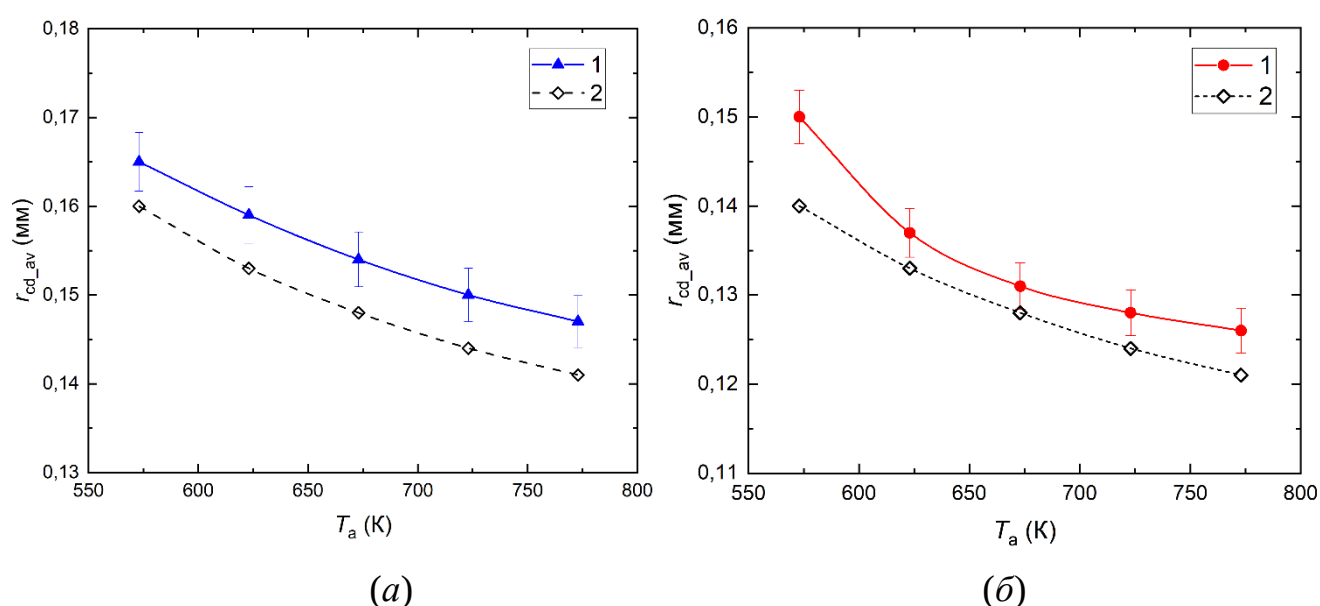


Рисунок 3.2.2 – Зависимости средних размеров вторичных фрагментов, образованных при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, от температуры газовой среды для двух топливных композиций (1 – экспериментальные данные; 2 – результаты математического моделирования): *a* – вода/дизельное топливо ($R_{d0} = 1,05$ мм, $\eta = 90$ об%), *б* – вода/рапсовое масло ($R_{d0} = 1,05$ мм, $\eta = 90$ об%).

3.3 Результаты математического моделирования и их обсуждение

3.3.1 Влияние температуры внешней среды

На рисунке 3.3.1.1 представлены зависимости средних размеров вторичных фрагментов при варьировании температуры внешней среды в диапазоне 573...773

К. Начальные размеры (радиусы) двухжидкостных капель составляли 1 мм, концентрация горючего компонента 90 об%.

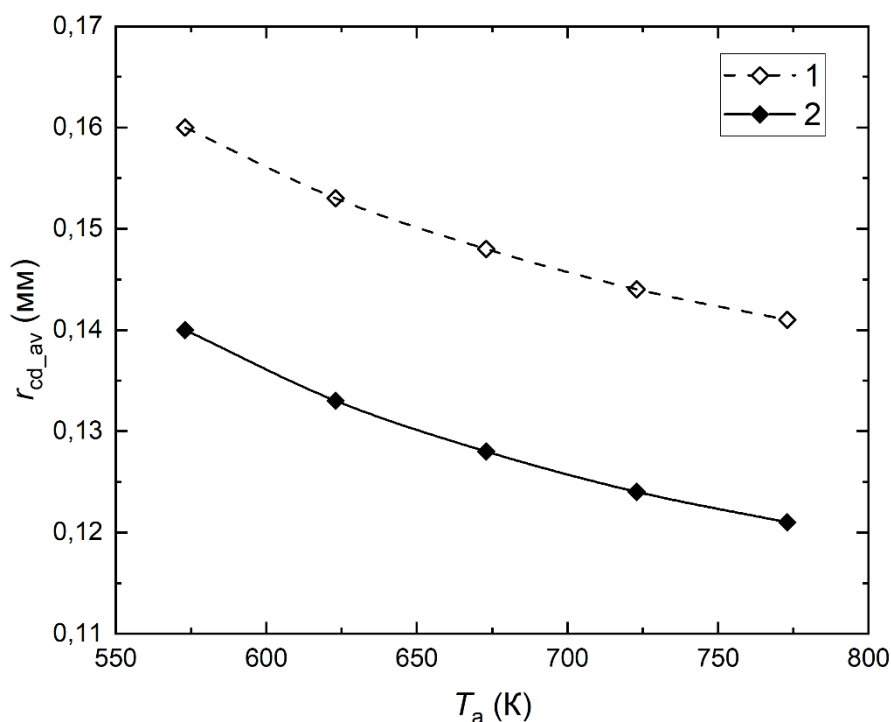


Рисунок 3.3.1.1 – Результаты математического моделирования средних размеров вторичных фрагментов при варьировании температуры внешней среды: 1 – вода/дизельное топливо; 2 – вода/рапсовое масло.

Хорошо видно, что чем выше значение температуры внешней среды, тем меньше размеры образующихся вторичных фрагментов. Это связано с тем, что при повышении температуры внешней среды увеличивается давление в паровой прослойке при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель.

3.3.2 Влияние смещения водяного ядра относительно центра капли

На рисунке 3.3.2.1 представлены зависимости среднего размера вторичных фрагментов от смещения водяного ядра относительно центра двухжидкостной капли. В правой части рисунка 3.3.2.1 приведена схема расчета отношения S_{wc}/R_{d0} , где S_{wc} – смещение водяного ядра относительно центра в мм. Установлено, что при

смещении водяного ядра относительно центра капли происходит укрупнение среднего размера вторичных фрагментов. При смещении водяного ядра толщина топливной оболочки становится существенно неравномерной, вследствие чего распределение вторичных фрагментов по размерам приобретает полидисперсный характер. Весомый вклад в средний размер вторичных фрагментов вносят крупные жидкостные фрагменты, которые образуются в местах, где толщина оболочки максимальна, т.е. в верхней части.

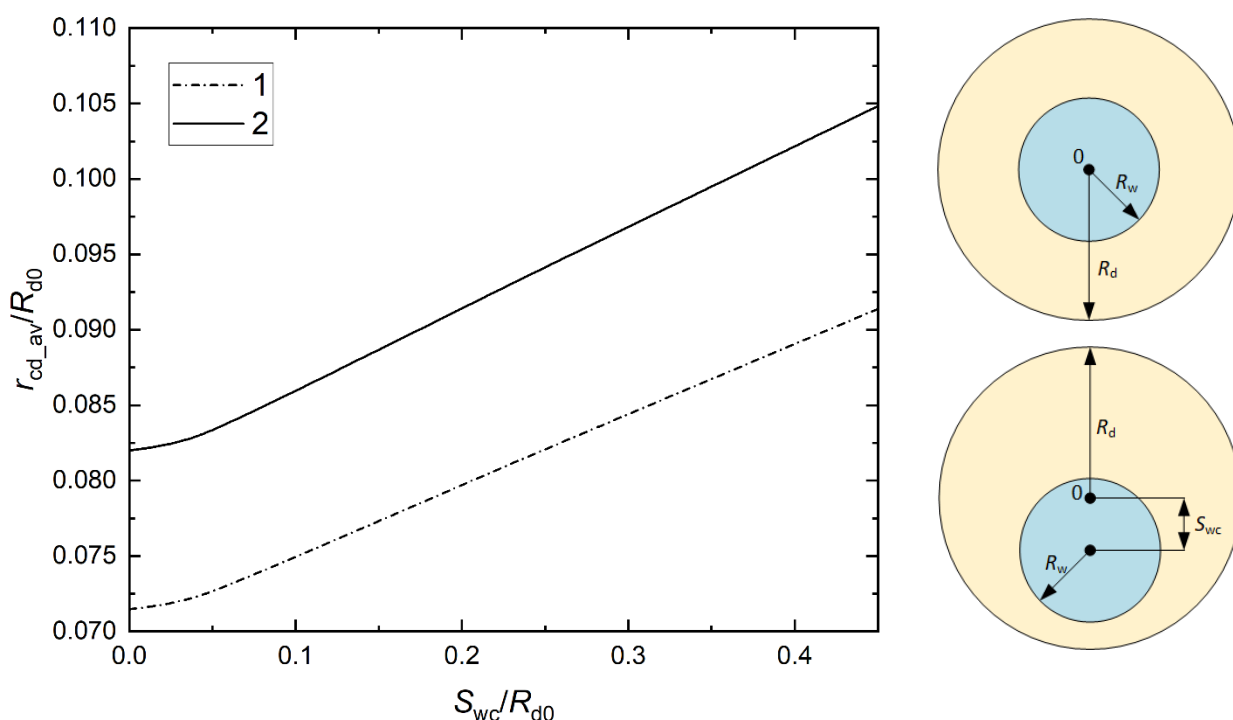


Рисунок 3.3.2.1 – Зависимости средних размеров вторичных фрагментов, образованных при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, от смещения водяного ядра относительно центра ($R_{d0} = 1$ мм, $\eta = 90$ об%, $P_w = 10$ кПа): 1 – вода/рапсовое масло, 2 – вода/дизельное топливо.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что за счет смещения водяного ядра относительно центра капли можно управлять распределениями вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада. Полученный результат является важным для использования эффектов микро-взрывного распада в различных практических приложениях.

3.3.3 Влияние несферичности исходных двухжидкостных капель

На рисунке 3.3.3.1 представлены зависимости среднего размера вторичных фрагментов от несферичности исходных двухжидкостных капель. Несферичность (E) рассчитывалась как отношение радиусов капли в продольном (b) и поперечном сечениях (a). Из рисунка 3.3.3.1 видно, что с увеличением несферичности исходной капли увеличивается средний размер вторичных фрагментов для обоих составов, это связано с тем, что толщина топливной оболочки становится существенно неравномерной, вследствие чего распределение вторичных фрагментов по размерам приобретает полидисперсный характер, в местах, где происходит утолщение топливной оболочки образуются вторичные фрагменты более крупных размеров, что приводит к укрупнению среднего размера вторичных фрагментов.

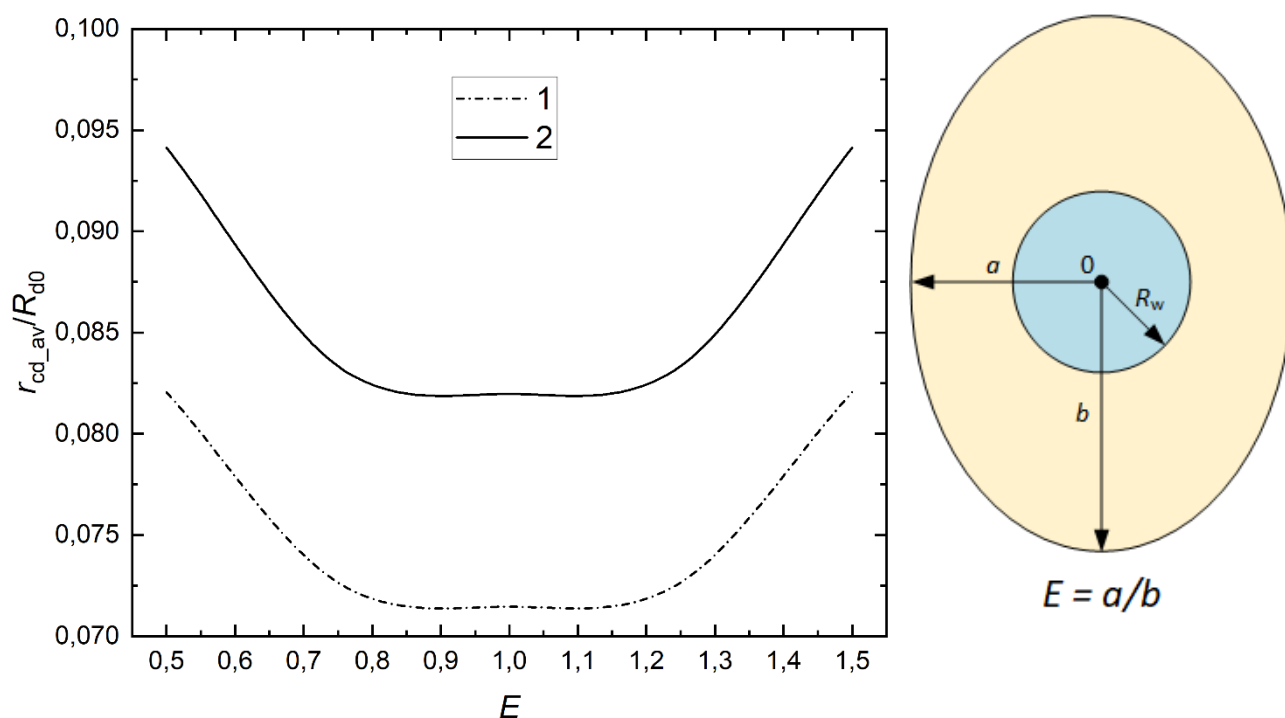


Рисунок 3.3.3.1 – Зависимости средних размеров вторичных фрагментов, образованных при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, при изменении несферичности ($\eta = 90$ об%, $P_w = 10$ кПа) : 1 – вода/ дизельное топливо, 2 – вода/рапсовое масло.

Рисунок 3.3.3.1 показывает, что несферичность капли оказывает достаточное слабое влияние при $E = 0,8 \dots 1,2$, т.е. изменение формы исходной капли в таком диапазоне оказывает слабое влияние на характеристики вторичных фрагментов.

Выводы по третьей главе

1. Разработана математическая модель микро-взрывного распада двухжидкостной капли, позволяющая прогнозировать средний размер вторичных фрагментов с использованием критерия максимального избыточного давления в паровой прослойке, соответствующего давлению насыщенного пара при температуре перегрева.
2. Результаты численных исследований продемонстрировали удовлетворительную корреляцию с экспериментальными данными (отклонения средних размеров вторичных фрагментов составили не более 10 %). Разработанная модель позволяет варьировать в широком диапазоне параметры двухжидкостных капель (размеры, концентрации и свойства жидкостей и т.д.) и греющей среды (температура, схема нагрева, скорость газового потока и т.д.).
3. Обоснованы перспективные направления развития моделей микро-взрывного распада двухжидкостных капель, что является важным для создания новых технологий вторичного измельчения капель жидкостей.
4. Полученные результаты теоретических исследований могут быть использованы при оптимизации технологий впрыска перспективных жидких топлив в камеры сгорания двигателей и энергетических установок, поскольку демонстрируют вклад ряда факторов на характеристики вторичных фрагментов. С помощью разработанной модели можно определить условия для максимального прироста площади свободной поверхности жидкости, благодаря чему можно увеличить скорость испарения топлива и тепловую мощность.

Заключение

1. В проведенных экспериментах установлены типичные распределения образующихся вторичных фрагментов по размерам и количеству, как функции, иллюстрирующих отдельное и совместное влияние совокупности параметров и факторов: температуры, теплового потока и схемы нагрева; типа и концентрации горючего компонента; начального размера капли и др. Наибольшее влияние оказывали тепловой поток, темп нагрева и схема теплообмена, а также начальный размер родительской капли. Средние размеры вторичных фрагментов варьировались в широком диапазоне 50–150 мкм, минимальные достигали 5 мкм, максимальные – 300 мкм. При сравнении суммарного объема образующихся вторичных фрагментов и исходной родительской капли сформулирован вывод о том, что микро-взрывной распад способствует получению вторичных фрагментов с характерными размерами даже менее 5 мкм.

2. При обобщении результатов опытов рассмотрены карты режимов фрагментации с обоснованием эффективных условий формирования мелкодисперсного спрея. Показано, что условия и темп нагрева исходных капель оказывают определяющее влияние на количество и размеры вторичных фрагментов, получаемых в режимах паффинга и микро-взрыва. Максимальное количество вторичных фрагментов зарегистрировано в опытах с кондуктивным теплообменом, а минимальное – с радиационным. В опытах с доминированием конвективного теплообмена регистрировались средние значения количества вторичных фрагментов относительно других исследованных схем.

3. Проведенные эксперименты позволили идентифицировать компонентный состав вторичных фрагментов, определить размеры воды и горючей жидкости в составе вторичных фрагментов, формирующихся при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель. Показано, что эффективное управление этим процессом обеспечивается за счет варьирования значений группы исходных параметров, в частности, начального размера родительских капель, концентрации воды и топлива в них, температуры и схемы нагрева. Полученные результаты показывают, что доля

воды и рапсового масла практически не отличается от концентрации в исходных каплях. Наибольшее влияние на размеры вторичных фрагментов оказывает концентрация горючей жидкости и схема нагрева. Так, при нагреве в пламени размеры вторичных фрагментов рапсового масла отличались от аналогичных характеристик в муфельной печи на 35%. Установлены существенные отличия по компонентному составу вторичных фрагментов при разных механизмах подвода тепла. Выполненные измерения с применением комбинации оптических методов позволили обосновать разную степень измельчения жидких компонентов. Наибольшую эффективность, с точки зрения вторичного измельчения, соответствовала схеме с нагревом двухжидкостных капель в пламени.

4. На количество и размеры вторичных фрагментов существенное влияние оказывает поверхностное натяжение и вязкость жидкостей. При варьировании вязкости и поверхностного натяжения можно добиться существенной интенсификации микро-взрывного распада и увеличения площади поверхности испарения в 6–7 раз. В проведенных экспериментах показано, что определенным диапазонам изменения вязкости и поверхностного натяжения соответствовали переходы между режимами паффинга и микро-взрыва, характеризующиеся разнонаправленными изменениями среднего размера вторичных фрагментов. Обосновано, что максимальное измельчение капель можно обеспечить при минимальном значении поверхностного натяжения и вязкости несмешиваемых жидких компонентов.

5. При микро-взрыве совокупности неоднородных капель зарегистрированы различные эффекты взаимодействия образующихся вторичных фрагментов с соседними исходными и вторичными каплями. В качестве основных выделены следующие: столкновение капель между собой с последующим образованием более мелких капель и микро-взрывом последних (т.е. микро-взрыву предшествовали соударения капель); распад одной капли с воздействием вторичных фрагментов на соседние капли (цепные механизмы фрагментации соседних капель за счет высоких скоростей и кинетической энергии вторичных капель); комбинированные режимы паффинг и микро-взрыв; столкновение капель

в режиме разлета или отскока с последующим перераспределением горючей и негорючей жидкости, приводящем к ускорению или замедлению процесса паффинга или микро-взрыв; наиболее мелкие вторичные капли практически мгновенно зажигались после формирования. Сформулирована физическая модель коллективных эффектов при каскадной фрагментации капель.

6. Разработаны физические и математические модели для прогнозирования среднего размера вторичных фрагментов и их количества при микро-взрыве и паффинге, отличающиеся от известных учетом влияния степени перегрева межжидкостной границы и роста давления вблизи последней. Определены границы применимости моделей и направления дальнейшего развития для приближения теоретических результатов к экспериментальным данным. Обосновано, что для предсказания средних размеров вторичных фрагментов правомерно использование модели, учитывающей их связь со степенью перегрева воды на границе раздела «вода/горючая жидкость» относительно температуры кипения.

7. Результаты экспериментов важны для развития технологий зажигания жидких и суспензионных топлив, а также термической и огневой очистки жидкостей. В результате обобщения полученных экспериментальных данных установлены наиболее рациональные условия измельчения неоднородных капель в условиях варьирования размеров, свойств родительских капель, концентрации компонентов, температуры и схемы нагрева. В частности, показано, что за счет микро-взрывного распада можно более чем в 10 раз уменьшить размеры капель. Если учитывать хорошо известные зависимости времен задержки зажигания топлив и скоростей испарения от температуры, то правомерен вывод о перспективах снижения требуемых температур нагрева за счет микро-взрывного распада. С использованием установленных значений r_d/R_d и S_1/S_0 для разных компонентных составов капель и данных многочисленных работ по регистрации зависимостей времен задержки зажигания и испарения неоднородных жидкостей можно прогнозировать диапазоны снижения температур нагрева и потенциальной экономии энергоресурсов при создании технологий распыления жидкостей разного назначения.

Список условных обозначений и символов

C – теплоемкость, Дж/(кг·К);

D – диаметр, м;

D_0 – начальный диаметр капли, м;

d_h – внешний диаметр держателя, м;

E – энергия, Дж;

F – объемная доля жидкой фазы;

f_v – источник силы поверхностного натяжения, Н/м³.

g – ускорение свободного падения, м²/с;

h – высота пламени, см;

h' – удельная массовая энтальпия воды в состоянии насыщения, Дж/кг;

h'' – удельная массовая энтальпия сухого насыщенного пара, Дж/кг;

I – светимость;

k – теплопроводность, Вт/(м·К);

k_{st} – константа сталагмометра;

Ku – число Кутателадзе;

L – теплота парообразования, Дж/кг;

L_d – расстояние между каплями, м;

La – число Лапласа;

m – масса, кг;

n – число измерений;

N_{cd} – число вторичных фрагментов;

N_p – число фаз;

$\vec{n}$ – нормаль к поверхности;

$P(p)$ – давление, Па;

P_{me} – вероятность возникновения микро-взрыва;

q – тепловой поток, Вт/м²;

$R(r)$ – радиус, м;

R_{gas} – универсальная газовая постоянная, м²·кг·с⁻²·К⁻¹·Моль⁻¹;

S – среднеквадратичное отклонение;

S_0 – площадь поверхности до микро-взрывного распада, м²;

S_1 – площадь поверхности после микро-взрывного распада, м²;

S_c – площадь контакта капли с держателем, м²;

T – температура, К;

$\dot{T}$ – скорость нагрева, К/с;

t – время, с;

$t(\alpha_c, n)$ – коэффициент Стьюдента;

U – скорость, м/с;

V – объем, м³;

x, y, z – координаты Декартовой системы;

z, r – координаты сферической системы.

Греческие символы:

α_c – доверительная вероятность;

γ – массовая концентрация твердых частиц, мас%;

Δ_{av} – средний размер твердых частиц, м;

∇ – оператор набла;

δ – толщина пленки, м;

ε – степень черноты;

η – объемная концентрация горючей жидкости, об%;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

v – удельный объем, м³/кг;

ρ – плотность, кг/м³;

σ – поверхностное натяжение, Н/м;

σ_0 – межфазное натяжение, Н/м;

τ_p – время задержки микро-взрывного распада, с;

τ_s – время формирования аэрозоля, с;

τ_h – время полного существования двухжидкостной капли, с;

$\vec{v}$ – вектор скорости, м/с.

Индексы:

0 – начальные условия;

l – жидкость;

a – воздух;

atm – атмосфера;

b (B) – кипение;

bubble – пузырь;

cd – вторичные капли;

cd_av – средний размер вторичных фрагментов;

cd_max – максимальный размер вторичных фрагментов;

cd_min – минимальный размер вторичных фрагментов;

d – капля;

f – топливо;

g – газ;

i – номер фазы;

N – начало взрывного кипения воды;

p – твердые частицы;

s – поверхность;

sat – насыщение;

SH – перегрев;

sd – дисперсная фаза;

v – пары;

w – вода.

Список литературы

1. Sazhin S.S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // *Fuel*. Elsevier, – 2017. Vol. 196. P. 69–101.
2. Ayhan V., Tunca S. Experimental investigation on using emulsified fuels with different biofuel additives in a DI diesel engine for performance and emissions // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. Vol. 129. P. 841–854.
3. Alkhedhair A., Jahn I., Gurgenci H., Guan Z., He S. Parametric study on spray cooling system for optimising nozzle design with pre-cooling application in natural draft dry cooling towers // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. Vol. 104. P. 448–460.
4. Ivanov V.M. and Nefedov P.I. Experimental Investigation Of The Combustion Process Of Natural And Emulsified Liquid Fuels // *NASA Technical Translation*. – 1962. Vol. 19. P. 35–45.
5. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Voytkov I.S., Strizhak P.A., Volkov R.S. Cascade fragmentation of composite parent and child droplets // *Fuel*. – 2023. Vol. 333. P. 126522.
6. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // *International Journal of Thermal Sciences*. Elsevier Masson, – 2019. Vol. 142. P. 30–41.
7. Rao D.C.K., Basu S. Atomization modes for levitating emulsified droplets undergoing phase change // *Experiments in Fluids*. – 2020. Vol. 61, № 2. P. 41.
8. Avulapati M.M., Megaritis T., Xia J., Ganippa L. Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets // *Fuel*. – 2019. Vol. 239. P. 1284–1292.
9. Antonov D. V., Fedorenko R.M., Filatova A.S. Characteristics of micro-explosion of free falling two-fluid drops // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. Vol. 2135. P. 020002.
10. Lif A., Holmberg K. Water-in-diesel emulsions and related systems // *Advances in Colloid and Interface Science*. Elsevier, – 2006. Vol. 123–126. P. 231–239.

11. Wang C.H., Fu S.Y., Kung L.J., Law C.K. Combustion and microexplosion of collision-merged methanol/alkane droplets // *Proceedings of the Combustion Institute*. Elsevier, – 2005. Vol. 30, № 2. P. 1965–1972.
12. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronautica*. Pergamon, – 2019. Vol. 160. P. 258–269.
13. Nissar Z., Rybdylova O., Sazhin S.S., Heikal M., Aziz A.R.B.A., Ismael M.A. A model for puffing/microexplosions in water/fuel emulsion droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. Vol. 149. P. 119208.
14. Shinjo J., Xia J. Combustion characteristics of a single decane/ethanol emulsion droplet and a droplet group under puffing conditions // *Proceedings of the Combustion Institute*. Elsevier, – 2017. Vol. 36, № 2. P. 2513–2521.
15. Li H., Rosebrock C.D., Riefler N., Wriedt T., Mädler L. Experimental investigation on microexplosion of single isolated burning droplets containing titanium tetraisopropoxide for nanoparticle production // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2017.
16. Stodt M.F.B., Groeneveld J.D., Mädler L., Kiefer J., Fritsching U. Microexplosions of multicomponent drops in spray flames // *Combustion and Flame*. – 2022. Vol. 240.
17. Jüngst N., Smallwood G.J., Kaiser S.A. Visualization and image analysis of droplet puffing and micro-explosion in spray-flame synthesis of iron oxide nanoparticles // *Experiments in Fluids*. – 2022. Vol. 63, № 3.
18. Bar-Kohany T., Antonov D. V., Strizhak P.A., Sazhin S.S. Nucleation and bubble growth during puffing and micro-explosions in composite droplets // *Fuel*. – 2023. Vol. 340. P. 126991.
19. Mondal P.K., Mandal B.K. A comprehensive review on the feasibility of using water emulsified diesel as a CI engine fuel // *Fuel*. – 2019. Vol. 237.
20. Gopidesi R.K., Rajaram P.S. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine // *International Journal of Ambient Energy*. – 2019.

21. Rao D.C.K., Karmakar S., Basu S. Bubble dynamics and atomization mechanisms in burning multi-component droplets // *Physics of Fluids*. – 2018. Vol. 30, № 6. P. 067101.
22. Pandey K., Basu S. High vapour pressure nanofuel droplet combustion and heat transfer: Insights into droplet burning time scale, secondary atomisation and coupling of droplet deformations and heat release // *Combustion and Flame*. – 2019. Vol. 209. P. 167–179.
23. Califano V., Calabria R., Massoli P. Experimental evaluation of the effect of emulsion stability on micro-explosion phenomena for water-in-oil emulsions // *Fuel*. – 2014. Vol. 117. P. 87–94.
24. Han K., Lin Q., Liu M., Meng K., Ni Z., Liu Y., Tian J. Experimental study on the micro-explosion characteristics of two blended types of droplets under different nitrogen flow rates // *Physics of Fluids*. – 2022. Vol. 34, № 3. P. 033609.
25. Wang Z., Yuan B., Huang Y., Cao J., Wang Y., Cheng X. Progress in experimental investigations on evaporation characteristics of a fuel droplet // *Fuel Processing Technology*. – 2022. Vol. 231.
26. Shen S., Liu H., Liu Y., Liu X., Hu H., Hu Z., Wang T. Dynamic details inside water-in-oil (W/O) emulsion droplet and its impact on droplet evaporation and micro-explosion // *Fuel*. – 2023. Vol. 338. P. 127254.
27. Zhang H., Lu Z., Wang T., Che Z. Mist formation during micro-explosion of emulsion droplets // *Fuel*. – 2023. Vol. 339. P. 127350.
28. Jang G.M., Kim N. Il. Investigation on breakup characteristics of multicomponent single droplets of nanofluid and water-in-oil emulsion using a pulse laser // *Fuel*. – 2022. Vol. 310.
29. Jang G.M., Kim N. Il. Surface tension, light absorbance, and effective viscosity of single droplets of water-emulsified n-decane, n-dodecane, and n-hexadecane // *Fuel*. – 2019. Vol. 240.
30. Jang G.M., Kim N. Il. Breakup characteristics of a single-droplet of water-in-oil emulsion impinging on a hot surface // *Fuel*. – 2021. Vol. 291. P. 120191.
31. Syed Masharuddin S.M., Abdul Karim Z.A., Meor Said M.A., Amran N.H., Ismael

- M.A. The evolution of a single droplet water-in-palm oil derived biodiesel emulsion leading to micro-explosion // *Alexandria Engineering Journal*. – 2022. Vol. 61, № 1. P. 541–547.
32. Mukhtar M., Hagos F.Y., Aziz A.R.A., Abdulah A.A., Karim Z.A.A. Combustion characteristics of tri-fuel (diesel-ethanol-biodiesel) emulsion fuels in CI engine with micro-explosion phenomenon attributes // *Fuel*. – 2022. Vol. 312.
 33. Ittoo B., Ooi J.B., Tran M.-V., Jaliliantabar F., Hasan Najafi G., Swamy V. Effects of dispersed multiwalled carbon nanotubes on the micro-explosion and combustion characteristics of 2-methylfuran – diesel mixture droplets // *Fuel*. – 2022. Vol. 316. P. 123308.
 34. Ocampo-Barrera R., Villasenor R., Diego-Marin A. An experimental study of the effect of water content on combustion of heavy fuel oil/water emulsion droplets // *Combustion and Flame*. – 2001. Vol. 126, № 4.
 35. Glushkov D.O., Paushkina K.K., Pleshko A.O., Vysokomorny V.S. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles ignited in a high-temperature air medium // *Fuel*. Elsevier Ltd, – 2022. Vol. 313.
 36. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Ratio of water/fuel concentration in a group of composite droplets on high-temperature heating // *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd, – 2022. Vol. 206. P. 118107.
 37. Nakoryakov V.E., Volkov R.S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Explosive Decay of Emulsion Drops Based on Water and Oil Products under Conditions of High-Temperature Purification of Liquids // *Doklady Physics*. – 2018. Vol. 63, № 11.
 38. Ashikhmin A.E., Khomutov N.A., Piskunov M. V., Yanovsky V.A. Secondary atomization of a biodiesel micro-emulsion fuel droplet colliding with a heated wall // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. Vol. 10, № 2.
 39. Restrepo-Cano J., Ordonez-Loza J., Guida P., Roberts W.L., Chejne F., Sarathy S.M., Im H.G. Evaporation, break-up, and pyrolysis of multi-component Arabian Light crude oil droplets at various temperatures // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. Vol. 183. P. 122175.
 40. Chausalkar A., Kong S.C., Michael J.B. Multicomponent drop breakup during

- impact with heated walls // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. Vol. 141.
41. Terry B.C., Gunduz I.E., Pfeil M.A., Sippel T.R., Son S.F. A mechanism for shattering microexplosions and dispersive boiling phenomena in aluminum-lithium alloy based solid propellant // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2017.
 42. Wainwright E.R. et al. Viewing internal bubbling and microexplosions in combusting metal particles via x-ray phase contrast imaging // *Combustion and Flame*. – 2019.
 43. Chen C.K., Yan W.M., Lin T.H. Experimental study on streamwise interaction of burning compound droplets // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. Vol. 21.
 44. Chao C.-Y., Tsai H.-W., Pan K.-L., Hsieh C.-W. On the microexplosion mechanisms of burning droplets blended with biodiesel and alcohol // *Combustion and Flame*. – 2019. Vol. 205. P. 397–406.
 45. Li Y.-H., Purwanto A., Chuang B.-C. Micro-Explosion mechanism of iron hybrid Methane-Air premixed flames // *Fuel*. – 2022. № 124841.
 46. Damiani D., Tarlet D., Meillot E. A Particle-Tracking-Velocimetry (PTV) Investigation of Liquid Injection in a DC Plasma Jet // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. Vol. 23, № 3. P. 340–353.
 47. Moussa O., Francelino D., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J. Insight of a water-in-oil emulsion drop under Leidenfrost heating using laser-induced fluorescence optical diagnostics // *Atomization and Sprays*. – 2019.
 48. Tarlet D., Allouis C., Bellettre J. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. Vol. 107. P. 179–183.
 49. Huang J. et al. A detailed study on the micro-explosion of burning iron particles in hot oxidizing environments // *Combustion and Flame*. – 2022. Vol. 238.
 50. Watanabe H., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion // *Combustion and Flame*. – 2010. Vol. 157, № 5. P. 839–852.

51. Tsue M., Yamasaki H., Kadota T., Segawa D., Kono M. Effect of gravity on onset of microexplosion for an oil-in-water emulsion droplet // Symposium (International) on Combustion. – 1998.
52. Tanimoto D., Shinjo J. Numerical simulation of secondary atomization of an emulsion fuel droplet due to puffing: Dynamics of wall interaction of a sessile droplet and comparison with a free droplet // Fuel. – 2019. Vol. 252. P. 475–487.
53. Kadota T., Tanaka H., Segawa D., Nakaya S., Yamasaki H. Microexplosion of an emulsion droplet during Leidenfrost burning // Proceedings of the Combustion Institute. – 2007. Vol. 31, № 2. P. 2125–2131.
54. Архипов В.А., Ратанов Г.С., Трофимов В.Ф. Экспериментальное исследование взаимодействия капель при столкновениях // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1978. № 2. P. 73–77.
55. Архипов В.А., Васенин И.М., Трофимов В.Ф. К устойчивости капель идеальной жидкости при столкновениях // Прикладная механика и техническая физика. – 1983. № 3. P. 95–98.
56. Бойко В.М., Папырин А.Н., Поплавский С.В. О динамике дробления капель в ударных волнах // Прикладная механика и техническая физика. – 1987. № 2. P. 108.
57. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Нигматулин Р.И., Тимофеев Е.И. Влияние плотности газа на дробление пузырьков ударными волнами // Доклады Академии наук. – 1977. Vol. 235, № 2. P. 292–294.
58. Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. Характеристики “отскока” взаимодействующих капель воды // Журнал технической физики. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, – 2019. Vol. 89, № 6. P. 850–855.
59. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Шлегель Н.Е. Взаимодействие капель воды и суспензий при их столкновениях в газовой среде // Теоретические основы химической технологии. Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", – 2019. Vol. 53, № 5. P. 546–558.
60. Cen C., Wu H., Lee C., Fan L., Liu F. Experimental investigation on the sputtering and micro-explosion of emulsion fuel droplets during impact on a heated surface //

- International Journal of Heat and Mass Transfer. Pergamon, – 2019. Vol. 132. P. 130–137.
61. Segawa D., Yamasaki H., Kadota T., Tanaka H., Enomoto H., Tsue M. Water-coalescence in an oil-in-water emulsion droplet burning under microgravity // Proceedings of the Combustion Institute. Elsevier, – 2000. Vol. 28, № 1. P. 985–990.
 62. Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. Vol. 52, № 15–16. P. 3676–3684.
 63. Mura E., Calabria R., Califano V., Massoli P., Bellettre J. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2014.
 64. Suzuki Y., Harada T., Watanabe H., Shoji M., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. Vol. 33, № 2. P. 2063–2070.
 65. Meng K., Fu W., Li F., Lei Y., Lin Q., Wang G. Comparison of ignition, injection and micro - Explosion characteristics of RP-3/ ethanol and biodiesel / ethanol mixed drops // Journal of the Energy Institute. – 2020. Vol. 93, № 1. P. 152–164.
 66. Rao D.C.K., Karmakar S., Som S.K. Puffing and Micro-Explosion Behavior in Combustion of Butanol/Jet A-1 and Acetone-Butanol-Ethanol (A-B-E)/Jet A-1 Fuel Droplets // Combustion Science and Technology. Taylor & Francis, – 2017. Vol. 189, № 10. P. 1796–1812.
 67. Gan Y., Qiao L. Combustion characteristics of fuel droplets with addition of nano and micron-sized aluminum particles // Combustion and Flame. Elsevier, – 2011. Vol. 158, № 2. P. 354–368.
 68. Sakai T., Saito M. Single-droplet combustion of coal slurry fuels // Combustion and Flame. Elsevier, – 1983. Vol. 51. P. 141–154.
 69. Kuznetsov G. V, Piskunov M. V, Strizhak P.A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas // International Journal

- of Heat and Mass Transfer. – 2016. Vol. 92. P. 360–369.
70. Girin O.G. Dynamics of the emulsified fuel drop microexplosion // *Atomization and Sprays*. – 2017. Vol. 27, № 5. P. 407–422.
 71. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Aziz A.R.B.A. A simple model for puffing/micro-explosions in water-fuel emulsion droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. Vol. 131. P. 815–821.
 72. Zeng Y., Lee C.F. Modeling droplet breakup processes under micro-explosion conditions // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. Vol. 31, № 2. P. 2185–2193.
 73. Shinjo J., Xia J., Ganippa L.C., Megaritis A. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets // *Physics of Fluids*. – 2014. Vol. 26, № 10. P. 103302.
 74. Fu W.B., Hou L.Y., Wang L., Ma F.H. A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water // *Fuel Processing Technology*. – 2002. Vol. 79, № 2. P. 107–119.
 75. Zhang Y., Huang Y., Huang R., Huang S., Ma Y., Xu S., Wang Z. A new puffing model for a droplet of butanol-hexadecane blends // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. Vol. 133. P. 633–644.
 76. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск. – 1988. 248 p.
 77. Байдаков В.Г. Перегрев криогенных жидкостей. Екатеринбург. – 1988. 248 p.
 78. Иванов В.М. Топливные эмульсии. М.: Изд-во. – 1962. 216 p.
 79. Strizhak P.A., Volkov R.S. The integral characteristics of the deceleration and entrainment of water droplets by the counter flow of high-temperature combustion products // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. Vol. 75. P. 54–65.
 80. Volkov R.S., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A. Movement and evaporation of water droplets under conditions typical for heat-exchange chambers of contact water heaters // *Thermal Engineering*. – 2016. Vol. 63, № 9. P. 666–673.
 81. Shlegel N., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations // *International*

Communications in Heat and Mass Transfer. – 2019. Vol. 108.

82. Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. Vol. 121. P. 398–409.
83. Vysokomornaya O. V, Piskunov M. V, Strizhak P.A. Breakup of heterogeneous water drop immersed in high-temperature air // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. Vol. 127. P. 1340–1345.
84. James M., Ray S.S. Enhanced droplet collision rates and impact velocities in turbulent flows: The effect of poly-dispersity and transient phases // *Scientific Reports*. – 2017. Vol. 7, № 1. P. 12231.
85. Bardia R., Liang Z., Keglinski P., Trujillo M.F. Continuum and molecular-dynamics simulation of nanodroplet collisions // *Phys. Rev. E. American Physical Society*, – 2016. Vol. 93, № 5. P. 53104.
86. Soni A., Sanjay V., Das A.K. Formation of fluid structures due to jet-jet and jet-sheet interactions // *Chemical Engineering Science*. – 2018. Vol. 191. P. 67–77.
87. Chang Y.-C., Lee W.-J., Lin S.-L., Wang L.-C. Green energy: Water-containing acetone–butanol–ethanol diesel blends fueled in diesel engines // *Applied Energy*. – 2013. Vol. 109. P. 182–191.
88. Wang Z., Shi S., Huang S., Tang J., Du T., Cheng X., Huang R., Chen J.-Y. Effects of water content on evaporation and combustion characteristics of water emulsified diesel spray // *Applied Energy*. – 2018. Vol. 226. P. 397–407.
89. Saha K., Abu-Ramadan E., Li X. Multicomponent evaporation model for pure and blended biodiesel droplets in high temperature convective environment // *Applied Energy*. – 2012. Vol. 93. P. 71–79.
90. Tarlet D., Josset C., Bellettre J. Comparison between unique and coalesced water drops in micro-explosions scanned by differential calorimetry // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. Vol. 95. P. 689–692.
91. Yin Z., Nau P., Meier W. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame // *Experimental Thermal and*

- Fluid Science. – 2017. Vol. 82. P. 50–57.
92. Nau P., Kutne P., Eckel G., Meier W., Hotz C., Fleck S. Infrared absorption spectrometer for the determination of temperature and species profiles in an entrained flow gasifier // *Appl. Opt. OSA*, – 2017. Vol. 56, № 11. P. 2982–2990.
 93. Warncke K., Gepperth S., Sauer B., Sadiki A., Janicka J., Koch R., Bauer H.-J. Experimental and numerical investigation of the primary breakup of an airblasted liquid sheet // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. Vol. 91. P. 208–224.
 94. Tarlet D., Mura E., Josset C., Bellettre J., Allouis C., Massoli P. Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. Vol. 77. P. 1043–1054.
 95. Shen S., Sun K., Che Z., Wang T., Jia M. Puffing and micro-explosion of heated droplets for homogeneous ethanol-propanol-hexadecane fuel and micro-emulsified ethanol-biodiesel-hexadecane fuel // *Applied Thermal Engineering*. Pergamon, – 2020. Vol. 165. P. 114537.
 96. Varaksin A.Y. Fluid dynamics and thermal physics of two-phase flows: Problems and achievements // *High Temperature*. – 2013.
 97. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Experimental study of foamed emulsion combustion: Influence of solid microparticles, glycerol and surfactant // *Fuel Processing Technology*. – 2017.
 98. Antonov D. V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits // *Energies*. – 2022. Vol. 15, № 20. P. 7670.
 99. Strizhak P.A., Piskunov M. V., Volkov R.S., Legros J.C. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating // *Chemical Engineering Research and Design*. Elsevier, – 2017. Vol. 127. P. 72–80.
 100. Piskunov M.V., Strizhak P.A. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explain the mechanism of heterogeneous water droplet boiling and explosive breakup // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. Vol. 91. P. 103–116.
 101. Zhukov V.E., Pavlenko A.N., Moiseev M.I., Kuznetsov D. V. Dynamics of interphase surface of self-sustaining evaporation front in liquid with additives of

- nanosized particles // *High Temperature*. – 2017. Vol. 55, № 1. P. 79–86.
102. Sazhin S.S., Shchepakina E., Sobolev V. Order reduction in models of spray ignition and combustion // *Combustion and Flame*. – 2018. Vol. 187. P. 122–128.
 103. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Misyura S.Y., Strizhak P.A. Temperature and convection velocities in two-component liquid droplet until micro-explosion // *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier, – 2019. Vol. 109. P. 109862.
 104. Yi P., Li T., Fu Y., Xie S. Transcritical evaporation and micro-explosion of ethanol-diesel droplets under diesel engine-like conditions // *Fuel*. – 2021. Vol. 284. P. 118892.
 105. Shen S., Sun K., Che Z., Wang T., Jia M., Cai J. Mechanism of micro-explosion of water-in-oil emulsified fuel droplet and its effect on soot generation // *Energy*. Pergamon, – 2020. Vol. 191. P. 116488.
 106. Zhang X., Li T., Wang B., Wei Y. Superheat limit and micro-explosion in droplets of hydrous ethanol-diesel emulsions at atmospheric pressure and diesel-like conditions // *Energy*. – 2018. Vol. 154. P. 535–543.
 107. Mura E., Calabria R., Califano V., Massoli P., Bellettre J. Emulsion droplet micro-explosion: Analysis of two experimental approaches // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014. Vol. 56. P. 69–74.
 108. Mura E., Josset C., Loubar K., Huchet G., Bellettre J. Effect of dispersed water droplet size in microexplosion phenomenon for water in oil emulsion // *Atomization and Sprays*. – 2010. Vol. 20, № 9. P. 791–799.
 109. Rao D.C.K., Syam S., Karmakar S., Joarder R. Experimental investigations on nucleation, bubble growth, and micro-explosion characteristics during the combustion of ethanol/Jet A-1 fuel droplets // *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier, – 2017. Vol. 89. P. 284–294.
 110. Avulapati M.M., Ganippa L.C., Xia J., Megaritis A. Puffing and micro-explosion of diesel–biodiesel–ethanol blends // *Fuel*. – 2016. Vol. 166. P. 59–66.
 111. Yahaya Khan M., Abdul Karim Z.A., Aziz A.R.A., Heikal M.R., Crua C. Puffing and Microexplosion Behavior of Water in Pure Diesel Emulsion Droplets During Leidenfrost Effect // *Combustion Science and Technology*. Taylor & Francis, –

2017. Vol. 189, № 7. P. 1186–1197.
112. Rosli M.A.F., Aziz A.R.A., Ismael M.A., Elbashir N.O., Zainal A. E.Z., Baharom M., Mohammed S.E. Experimental study of micro-explosion and puffing of gas-to-liquid (GTL) fuel blends by suspended droplet method // *Energy*. – 2021. Vol. 218. P. 119462.
 113. Han K., Liu Y., Wang C., Tian J., Song Z., Lin Q., Meng K. Experimental study on the evaporation characteristics of biodiesel-ABE blended droplets // *Energy*. – 2021. Vol. 236. P. 121453.
 114. Meng K., Wu Y., Lin Q., Shan F., Fu W., Zhou K., Liu T., Song L., Li F. Microexplosion and ignition of biodiesel/ethanol blends droplets in oxygenated hot co-flow // *Journal of the Energy Institute*. – 2019. Vol. 92, № 5. P. 1527–1536.
 115. Ojha P.K., Maji R., Karmakar S. Effect of crystallinity on droplet regression and disruptive burning characteristics of nanofuel droplets containing amorphous and crystalline boron nanoparticles // *Combustion and Flame*. – 2018. Vol. 188. P. 412–427.
 116. Abdul Karim Z.A., Khan M.Y., Aziz A.R.A. Evolution of Microexplosion Phenomenon in Parent–Child Droplets of Water in Biodiesel Emulsions Enhanced by Different Surfactant Dosages and Hydrophilic–Lipophilic Balance Values // *Journal of Energy Resources Technology*. – 2019. Vol. 141, № 10.
 117. Antonov D. V, Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion and puffing of a group of two-component droplets // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. Vol. 181. P. 116023.
 118. Antonov D. V, Volkov R.S., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Castanet G., Sazhin S.S. Temperature measurements in a string of three closely spaced droplets before the start of puffing/micro-explosion: Experimental results and modelling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2021. Vol. 181. P. 121837.
 119. Wang C.H., Liu X.Q., Law C.K. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets // *Combustion and Flame*. Elsevier, – 1984. Vol. 56, № 2. P. 175–197.
 120. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Modeling the

- micro-explosion of miscible and immiscible liquid droplets // *Acta Astronautica*. – 2020. Vol. 171. P. 69–82.
121. Li S., Zhang Y., Qi W., Xu B. Quantitative observation on characteristics and breakup of single superheated droplet // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. Vol. 80. P. 305–312.
 122. Shinjo J., Xia J., Megaritis A., Ganippa L.C., Cracknell R.F. Modeling temperature distribution inside an emulsion fuel droplet under convective heating: A key to predicting microexplosion and puffing // *Atomization and Sprays*. – 2016. Vol. 26, № 6. P. 551–583.
 123. Strotos G., Malgarinos I., Nikolopoulos N., Gavaises M. Numerical investigation of aerodynamic droplet breakup in a high temperature gas environment // *Fuel*. – 2016. Vol. 181. P. 450–462.
 124. Antonov D. V, Fedorenko R.M., Yanovskiy L.S., Strizhak P.A. Physical and Mathematical Models of Micro-Explosions: Achievements and Directions of Improvement // *Energies*. – 2023. Vol. 16, № 16. P. 6034.
 125. Antonov D.V., Strizhak P.A., Fedorenko R.M., Nissar Z., Sazhin S.S. Puffing/micro-explosion in rapeseed oil/water droplets: The effects of coal micro-particles in water // *Fuel*. – 2021. Vol. 289. P. 119814.
 126. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. Vol. 161. P. 120238.
 127. Sultanov F.M., Yarin A.L. Percolation model of the disintegration dispersion and explosive atomization of liquid media: drop size distribution // *Zh. Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.* – 1990. № 5. P. 48–54.
 128. Guida P., Ceschin A., Hernández Pérez F.E., Im H.G., Roberts W.L. Computationally-derived submodel for thermally-induced secondary atomization // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. Vol. 199. P. 123448.
 129. Ismael M.A., Heikal M.R., Aziz A.R.A., Syah F., Zainal A. E.Z., Crua C. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions // *Applied Energy*. – 2018.

130. Kalogirou S.A. Seawater desalination using renewable energy sources // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2005.
131. Antonov D. V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Nissar Z., Sazhin S.S. Puffing/micro-explosion in composite fuel/water droplets heated in flames // *Combustion and Flame*. – 2021. Vol. 233. P. 111599.
132. Antonov D.V., Vysokomornaya O.V., Piskunov M.V., Fedorenko R.M., Yan W.M. Influence of solid nontransparent inclusion shape on the breakup time of heterogeneous water drops // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2019. Vol. 101.
133. Antonov D. V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. Vol. 164. P. 114501.
134. Антонов Д.В., Вершинина К.Ю., Федоренко Р.М. Микровзрывная фрагментация двухжидкостных капель на основе таллового масла // *Письма в журнал технической физики*. – 2023. Vol. 49, № 14. P. 3.
135. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Collective effects during the formation of child droplets as a result of puffing/micro-explosion of composite droplets // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023. Vol. 183. P. 107858.
136. Antonov D., Bellettre J., Tarlet D., Massoli P., Vysokomornaya O., Piskunov M. Impact of Holder Materials on the Heating and Explosive Breakup of Two-Component Droplets // *Energies*. – 2018. Vol. 11, № 12. P. 3307.
137. Antonov D. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // *Combustion and Flame*. Elsevier, – 2019. Vol. 210. P. 479–489.
138. Yaws, L C. Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds // Knovel. – 2003.
139. Vargaftik N.B. Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases // *Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases*. – 1975.
140. Fedorenko R.M., Antonov D.V., Strizhak P.A., Sazhin S.S. Time evolution of composite fuel/water droplet radii before the start of puffing/micro-explosion //

- International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. Vol. 191, № 122838. P. 122838.
141. Antonov D. V., Piskunov M. V., Strizhak P.A. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating // *Applied Thermal Engineering*. Pergamon, – 2019. Vol. 152. P. 409–419.
 142. Roisman I. V, Planchette C., Lorenceau E., Brenn G. Binary collisions of drops of immiscible liquids // *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, – 2012. Vol. 690. P. 512–535.
 143. Koh yi ting, A Higgins S., S Weber J., Kast W. Immunological consequences of using three different clinical/laboratory techniques of emulsifying peptide-based vaccines in incomplete Freund's adjuvant // *Journal of translational medicine*. – 2006. Vol. 4. P. 42.
 144. Finotello G., Kooiman R.F., Padding J.T., Buist K.A., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M. The dynamics of milk droplet--droplet collisions // *Experiments in Fluids*. – 2017. Vol. 59, № 1. P. 17.
 145. Mura E., Massoli P., Josset C., Loubar K., Bellettre J. Study of the micro-explosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2012. Vol. 43. P. 63–70.
 146. Antonov D. V, Kuznetsov G. V, Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes // *Powder Technology*. – 2021. Vol. 382. P. 378–387.
 147. Antonov D. V, Kuznetsov G. V, Strizhak P.A., Fedorenko R.M. Micro-explosion of droplets containing liquids with different viscosity, interfacial and surface tension // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2020. Vol. 158. P. 129–147.
 148. Yanovsky V.A., Andropov M.O., Fakhrislamova R.S., Churkin R.A., Minaev K.M., Ulyanova O.S. Rheological properties of inverse emulsions stabilized by ethanalamides of tall oil fatty acids // *MATEC Web of Conferences* / ed. Pestryakov A., Korotkova E., Vorobev A. – 2016. Vol. 85. P. 01020.

149. Bąk A., Podgórska W. Interfacial and surface tensions of toluene/water and air/water systems with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Elsevier, – 2016. Vol. 504. P. 414–425.
150. Bąk A., Podgórska W. Investigation of drop breakage and coalescence in the liquid–liquid system with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80 // *Chemical Engineering Science*. Pergamon, – 2012. Vol. 74. P. 181–191.
151. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S., Vysokomornaya O.V. Integral characteristics of water droplet evaporation in high-temperature combustion products of typical flammable liquids using SP and IPI methods // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. Vol. 108. P. 218–234.
152. Altıparmak D., Keskin A., Koca A., Gürü M. Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester–diesel fuel blends // *Bioresource Technology*. – 2007. Vol. 98, № 2. P. 241–246.
153. Özer S. The effect of diesel fuel-tall oil/ethanol/methanol/isopropyl/n-butanol/fusel oil mixtures on engine performance and exhaust emissions // *Fuel*. – 2020. Vol. 281. P. 118671.
154. Glushkov D., Nyashina G., Medvedev V., Vershinina K. Relative environmental, economic, and energy performance indicators of fuel compositions with biomass // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020.
155. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals // *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd, – 2019. P. 998–1008.
156. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A., Strizhak P.A. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste // *Energy and Fuels*. – 2016.
157. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Characteristics of child droplets during micro-explosion and puffing of suspension fuel droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. Vol. 209, № 124106. P. 124106.
158. Vershinina K., Shabardin D., Strizhak P. Burnout rates of fuel slurries containing petrochemicals, coals and coal processing waste // *Powder Technology*. Elsevier, –

2019. Vol. 343. P. 204–214.
159. Антонов Д.В., Разумов Д.С., Войтков И.С., Стрижак П.А., Волков Р.С. Характеристики вторичных фрагментов при микро-взрыве и диспергировании суспензионных топлив // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену. – 2022. P. 67–70.
 160. 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. Vol. 97. P. 392–407.
 161. Volkov R.S., Strizhak P.A. Planar laser-induced fluorescence diagnostics of water droplets heating and evaporation at high-temperature // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. Vol. 127. P. 141–156.
 162. Strizhak P.A., Volkov R.S., Castanet G., Lemoine F., Rybdylova O., Sazhin S.S. Heating and evaporation of suspended water droplets: Experimental studies and modelling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. Vol. 127. P. 92–106.
 163. Foucaut J.M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // *Measurement Science and Technology*. – 2002. Vol. 13, № 7. P. 313.
 164. Stanislas M., Okamoto K., Kähler C.J., Westerweel J., Scarano F. Main results of the third international PIV Challenge // *Experiments in Fluids*. – 2008. Vol. 45, № 1. P. 27–71.
 165. Moussa O., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J. Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. Vol. 133. P. 90–97.
 166. Moussa O., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J. Investigation on the conditions leading to the micro-explosion of emulsified fuel droplet using two colors LIF method // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2020. Vol. 116. P. 110106.
 167. 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. Vol. 88. P. 301–316.
168. Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Стрижак П.А. Коллективные эффекты при формировании вторичных фрагментов в результате микровзрывной фрагментации композиционных топлив // *Gorenie i vzryv (Moskva) - Combustion and Explosion*. – 2022. Vol. 15, № 2. P. 22–33.
 169. 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. Vol. 170. P. 121011.
 170. Jia X., Yang J.-C., Zhang J., Ni M.-J. An experimental investigation on the collision outcomes of binary liquid metal droplets // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2019. Vol. 116. P. 80–90.
 171. Tkachenko P., Shlegel N., Strizhak P. Collisions of Two-Phase Liquid Droplets in a Heated Gas Medium // *Entropy*. – 2021. Vol. 23, № 11.
 172. Chen R.-H. Diesel-diesel and diesel-ethanol drop collisions // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. Vol. 27, № 2–3. P. 604–610.
 173. Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., He X., Kumar P., Bansal R.C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, – 2017. Vol. 69. P. 596–609.
 174. Gasanov B.M., Bulanov N. V. Effect of the concentration and size of droplets of the dispersed phase of an emulsion on the character of heat exchange in a boiling emulsion // *High Temperature*. – 2014. Vol. 52, № 1. P. 86–92.
 175. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The micro-explosive fragmentation criteria of two-liquid droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. Vol. 196, № 123293. P. 123293.
 176. Fiebig M. Heat Transfer, Mass Transfer and Friction in Turbulent Boundary Layers : by S. S. Kutateladze and A. I. Leontiev; English edition by A. E. Bergles; published by Hemisphere Publishing Corporation, New York, Washington, Philadelphia, London, 1990; 316 pages // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. Elsevier, – 1991. Vol. 30, № 1. P. 59–60.

177. Almaraz A., López C., Arellano I., Barrón M.A., Jaramillo D., Reyes F., Plascencia G. CFD modelling of fluid flow in a Peirce–Smith converter with more than one injection point // *Minerals Engineering*. Pergamon, – 2014. Vol. 56. P. 102–108.
178. Sarafraz M.M., Pourmehran O., Yang B., Arjomandi M. Assessment of the thermal performance of a thermosyphon heat pipe using zirconia-acetone nanofluids // *Renewable Energy*. Pergamon, – 2019. Vol. 136. P. 884–895.
179. Volkov R.S., Strizhak P.A. Using Planar Laser Induced Fluorescence to explore the mechanism of the explosive disintegration of water emulsion droplets exposed to intense heating // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018.
180. Sazhin S.S., Abdelghaffar W.A., Sazhina E.M., Heikal M.R. Models for droplet transient heating: Effects on droplet evaporation, ignition, and break-up // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2005. Vol. 44, № 7. P. 610–622.
181. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Y. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) // *Thermal Engineering*. – 2016. Vol. 63, № 10. P. 707–717.
182. Гасанов Б.М. оглы. Экспериментальное исследование механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 01.04. 14. б. и., – 2021.
183. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *Journal of Computational Physics*. Academic Press, – 1981. Vol. 39, № 1. P. 201–225.
184. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // *Journal of Computational Physics*. Academic Press, – 1992. Vol. 100, № 2. P. 335–354.
185. Rosenthal M.W. An Experimental Study of Transient Boiling // *Nuclear Science and Engineering*. – 1957.
186. Iida Y., Okuyama K., Sakurai K. Boiling nucleation on a very small film heater subjected to extremely rapid heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1994.
187. Glod S., Poulikakos D., Zhao Z., Yadigaroglu G. An investigation of microscale explosive vaporization of water on an ultrathin Pt wire // *International Journal of*

Heat and Mass Transfer. – 2002.

188. Ching E.J., Thomas Avedisian C., Carrier M.J., Cavicchi R.C., Young J.R., Land B.R. Measurement of the bubble nucleation temperature of water on a pulse-heated thin platinum film supported by a membrane using a low-noise bridge circuit // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. Vol. 79. P. 82–93.
189. Sakurai A., Shiotsu M. Transient pool boiling heat transfer: Part 1: Incipient boiling superheat // Journal of Heat Transfer. – 1977.
190. Su G.-Y., Bucci M., McKrell T., Buongiorno J. Transient boiling of water under exponentially escalating heat inputs. Part I: Pool boiling // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. Vol. 96. P. 667–684.
191. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Закрытое акционерное общество Издательский дом МЭИ, – 2006.

Список публикаций по теме диссертации

1. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 164. – P. 114501 (входит в базы данных Scopus и WoS).
2. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes // *Powder Technology*. – 2021. – V. 382. – P. 378-387 (входит в базы данных Scopus и WoS).
3. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Ratio of water/fuel concentration in a group of composite droplets on high-temperature heating // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – V. 206. – P. 118107 (входит в базы данных Scopus и WoS).
4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P. A., Fedorenko R. M. Micro-explosion of droplets containing liquids with different viscosity, interfacial and surface tension // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2020. – V. 158. – P. 129–147 (входит в базы данных Scopus и WoS).
5. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Collective effects during the formation of child droplets as a result of puffing/micro-explosion of composite droplets // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023 – V. 183. P. 107858 (входит в базы данных Scopus и WoS).
6. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Characteristics of child droplets during micro-explosion and puffing of suspension fuel droplets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023 – V. 209. P. 124106 (входит в базы данных Scopus и WoS).
7. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion and puffing of a group of two-component droplets // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 181. P. 116023 (входит в базы данных Scopus и WoS).
8. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Mathematical modeling of binary collisions of inhomogeneous particles of liquids in a gas medium // *Journal of*

- Engineering Physics and Thermophysics. – 2023. – V. 96. – No. 5. – P. 1246–1256 (входит в базы данных Scopus и WoS).
9. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Mathematical simulation of the formation of the secondary fragments of liquid droplets as a result of their collision // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2023. – V. 96. – No. 1. – P. 17–28 (входит в базы данных Scopus и WoS).
 10. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Two-dimensional simulation of collision between liquid droplet: determining the conditions of intense secondary atomization // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2022. – V. 10. – No. 1. – P. 63–73 (входит в базы данных Scopus и WoS).
 11. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits // Energies. – 2022. V. 15. – No. 20. – 7670 (входит в базы данных Scopus и WoS).
 12. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Yanovskiy L.S., Strizhak P.A. Physical and Mathematical Models of Micro-Explosions: Achievements and Directions of Improvement // Energies. – 2023. V. 16. – No. 16. – 6034 (входит в базы данных Scopus и WoS).
 13. Антонов Д.В., Федоренко Р.М., Стрижак П.А. Коллективные эффекты при формировании вторичных фрагментов в результате микровзрывной фрагментации композиционных топлив // Горение и взрыв. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 22–33 (из перечня ВАК).
 14. Антонов Д.В., Вершинина К.Ю., Федоренко Р.М. Микро-взрывная фрагментация двухжидкостных капель на основе талового масла // Письма в ЖТФ. – 2023. Т. 49. №. 14. – С. 3–7 (из перечня ВАК).
 15. Антонов Д.В., Стрижак П.А., Федоренко Р.М. Микровзрывная фрагментация группы неоднородных капель топлив // Письма в ЖТФ. – 2020. Т. 46. №. 10. – С. 14–17 (из перечня ВАК).