

На правах рукописи



Федоренко Роман Михайлович

**ВТОРИЧНЫЕ ФРАГМЕНТЫ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ РАСПАДЕ
ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

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

Официальные оппоненты: Поплавский Сергей Владимирович,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатория оптических методов диагностики газовых потоков, старший научный сотрудник

Скрипов Павел Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, Лаборатория быстропротекающих процессов и физики кипения, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита состоится 21 февраля 2024 года в 09 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН, www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир
Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Вторичное измельчение капель жидкостей является перспективным подходом к решению задач стабилизации распыления топлива, повышения эффективности его горения, снижения антропогенных выбросов. Микро-взрывной распад – процесс, при котором исходные многокомпонентные капли в процессе нагрева дробятся с формированием более мелких вторичных фрагментов вследствие локального вскипания воды. Под вторичными фрагментами понимаются отрывающиеся от исходной капли при ее распаде фрагменты жидкости. Вторичные фрагменты могут содержать в своем составе как воду, так и горючую жидкость, что способствует каскадным эффектам (вторичные фрагменты распадаются вслед за исходными каплями). За счет эффектов микро-взрывного распада можнократно увеличить площадь свободной поверхности жидкости вследствие дробления исходных капель до размеров нескольких десятков микрон.

Исследования, связанные с вторичным измельчением жидкостей с разным компонентным составом, сосредоточены на изучении предельных условий, режимов и характеристик распада капель. Изучение последствий вторичного измельчения неоднородных капель (размеров вторичных фрагментов, структуры и объема заполненного ими аэрозольного облака) является важной задачей. Для применения данных эффектов в различных технологиях необходимо определить условия, при которых образуются вторичные фрагменты с требуемыми размерами, скоростями движения и компонентным составом. Эффекты вторичного измельчения находят активное применение в технологиях: сжигание жидких и композиционных топлив в камерах сгорания двигательных и энергетических установок; термическая и огневая очистка жидкостей от нерегламентированных примесей; подавление возгораний с применением специализированных жидкостных составов и др. Пока получено ограниченное количество результатов исследований вторичных фрагментов, образующихся при микро-взрывном измельчении капель жидкостей. Компонентный состав вторичных фрагментов чрезвычайно сложно прогнозировать с высокой достоверностью. Это обусловлено ограничениями имеющихся методик и программно-аппаратных комплексов, необходимостью привлечения специализированных следящих систем и добавок-красителей. Основной вклад в этой области внесли исследователи из Великобритании, Италии, Франции, Китая, Малайзии, Израиля, Японии и России.

Из анализа современных достижений в области микро-взрывного распада капель жидкостей сформулировано заключение, что достоверные представления об этих процессах можно получить при применении высокоскоростных программно-аппаратных комплексов и оптических методов (PIV, PTV, IPI, SP, PLIF, LIP, Two-color LIF и др.). Важно создание физических и математических моделей для описания соответствующих процессов. Наибольшее влияние на характеристики микро-взрывного распада оказывают: условия и скорость (часто используют термин «темп») нагрева, температура внешней среды, физико-химические свойства жидкости, схемы формирования исходных капель, концентрации жидких и твердых компонентов, коллективные эффекты,

возникающие при движении капель в аэрозоле и др. В процессе нагрева эмульсий капли воды в объеме горючей жидкости коагулируют, в результате чего формируются двухжидкостные неперемешанные капли с явно выраженной границей раздела «вода/горючая жидкость». Неизученными остаются характеристики образующихся при микро-взрывном распаде фрагментов (размеры, скорости движения, состав). Как следствие, актуальным является определение характеристик микро-взрывного распада двухжидкостных неперемешанных капель на базе результатов экспериментов и моделирования.

Цель диссертационной работы – 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.

Для достижения поставленной цели решались **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, размеры 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 изложенных в работе результатов заключается в следующем: 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 движения 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.

Теоретическая ценность и практическая значимость работы. Полученные при выполнении работы результаты экспериментов и численного моделирования, сформулированные заключения и выводы значительно расширяют существующие знания о процессах микро-взрывного распада. Эти данные служат 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 данные о характеристиках вторичных фрагментов обладают большим потенциалом для верификации и апробации математических моделей, разработки аналитических методик при анализе процессов вторичного измельчения.

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, апробированы. Экспериментальные и теоретические результаты сравнивались с данными стендовых испытаний. 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 поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10008. Теоретические

исследования характеристик вторичных фрагментов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-69-10006. Исследования условий фрагментации капель биотоплив проведены при поддержке гранта Президента РФ МД-1616.2022.4.

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 газовой среды максимальное количество вторичных фрагментов соответствует кондуктивному теплообмену с каплей, а минимальное – радиационному. 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 капель относительно выделенного выше удаления регистрировались каскадные эффекты их измельчения 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, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад соискателя состоял в разработке экспериментальных методик и вычислительных кодов, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе результатов. Автор принимал участие в подготовке статей, написании и представлении докладов на 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 и обсуждение результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных мероприятиях: Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (2019, 2020); Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (2019, 2023); Сибирский теплофизический семинар (2019, 2021, 2022, 2023); Школа-семинар молодых ученых и специалистов имени академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (2021, 2023); Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (2020, 2023); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (2022, 2023); Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская теплофизика – 2023» (2023); Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (2023); Третий Китайско-Российский научно-технический форум «Наукоёмкие технологии: от науки к внедрению» (2023); Всероссийский молодежный форум «Наука будущего – наука молодых» (2022); International Conference on Combustion Science and Processes (2021); International Conference on Fluid Flow and Thermal Science (2021); Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (2021); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (2020); Минский международный форум по тепломассообмену (2020); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (2020); Международная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (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»), более 10 статей в международных 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 для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 159 страниц, содержит 61 рисунок и 7 таблиц. Список литературы состоит из 191 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная проблема, практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

Первая глава отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований процессов вторичного измельчения капель жидкостей. Проанализированы известные результаты экспериментальных и теоретических исследований характеристик вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде неоднородных капель. Выделены основные высокотемпературные газопарокапельные и топливные технологии, для которых актуально изучение рассматриваемых процессов. Сформулированы нерешенные в полной мере до настоящего времени задачи, характерные соответствующим технологиям. В выводах к первой главе отмечено, что микро-взрывной распад является перспективным механизмом вторичного измельчения многокомпонентных капель, с точки зрения стабильности реализации, требуемых расходов энергии и времени, интегральных характеристик. В результате микро-взрывного распада можно получить мелкодисперсный аэрозоль с размерами вторичных фрагментов менее 10 мкм. Большинство исследований в области микро-взрывного измельчения капель неоднородных жидкостей посвящено изучению предельных условий микро-взрывного распада, механизмов и влияющих факторов.

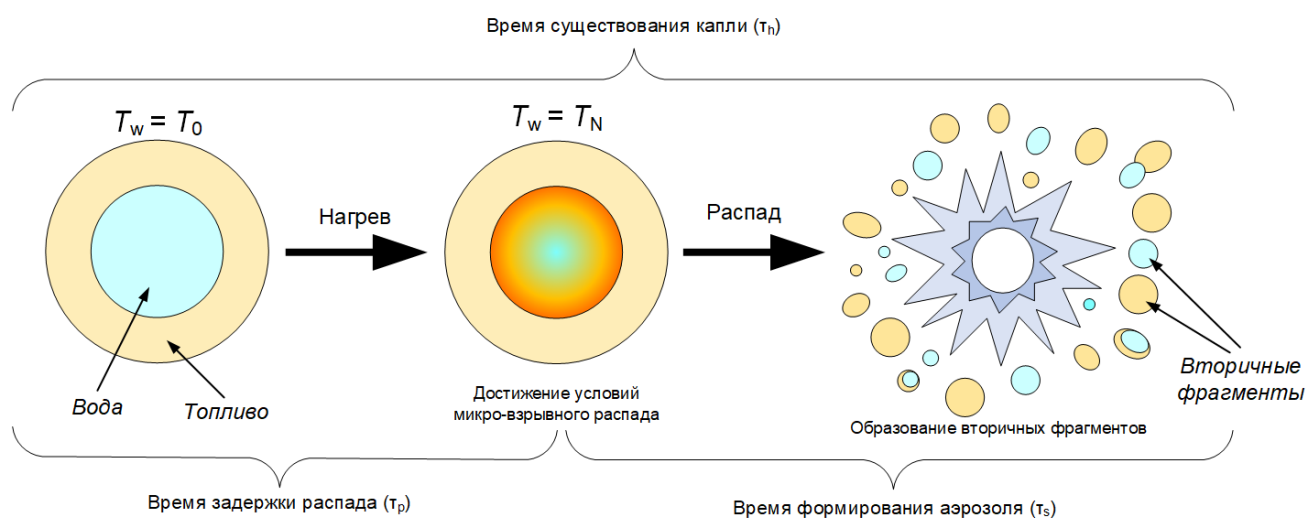


Рисунок 1. Основные этапы микро-взрывного распада двухжидкостной капли

Весь процесс микро-взрывного распада капли можно условно разделить на два этапа (рисунок 1). На первом 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 исходная капля распадается с образованием вторичных фрагментов. Время, затраченное на полный распад капли, называется временем формирования аэрозоля (τ_s). Общее время от начала нагрева исходной капли до ее полного распада называется временем существования («временем жизни») капли (τ_h). Настоящее исследование посвящено изучению характеристик вторичных фрагментов, формирующихся на втором этапе.

Сделан вывод о необходимости изучения вклада различных факторов на такие характеристики вторичных фрагментов как размеры, скорости движения, а также их компонентного состава для понимания и прогнозирования характеристик зажигания и горения композиционных капель. До настоящего времени не разработаны физические и математические модели для достоверного прогноза последствий микро-взрывного распада капель жидкостей. Известные модели достоверно описывают процессы, протекающие в гетерогенной капле при ее нагреве до распада, однако не позволяют прогнозировать последствия микро-взрывного распада. Необходимы модели, позволяющие прогнозировать характеристики вторичных фрагментов: размеры, скорости и траектории движения, компонентный состав.

Во **второй главе** приведено описание созданных экспериментальных стендов, разработанных методик проведения исследований и обработки полученных результатов. Выполнена оценка неопределенностей результатов выполненных измерений. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры внешней среды, условий нагрева, концентрации горючих жидкостей с разными физико-химическими свойствами, начальных размеров капель, размеров и концентрации твердых частиц, а также коллективных эффектов на характеристики вторичных фрагментов. Сформулированы рекомендации по использованию результатов исследований при разработке технологических решений в области вторичного измельчения капель жидкостей.

Основной задачей экспериментов в диссертационной работе являлось определение характеристик вторичных фрагментов при реализации частичного (паффинг) и полного (микро-взрыв) распада капель, а также изучение влияния совокупности факторов (условия и скорость нагрева, температура внешней среды, схема формирования капель, тип и концентрация компонентов капель и др.) на данные характеристики. Исследование вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель в лабораторных условиях на стадии планирования экспериментов подразумевает воспроизведение основных параметров, характеризующих протекание рассматриваемых процессов в практических приложениях. Основными параметрами, существенно влияющими на характеристики вторичных фрагментов, являются условия нагрева исходных капель (температура газа или поверхности, скорость движения потока и др.), схемы нагрева с доминированием разных механизмов подвода тепла, свойства

жидкостей, технология формирования исходных капель (двухжидкостные капли с явно выраженной границей «вода/топливо» и эмульгированные топлива) и др.

Спланирован многофакторный эксперимент с учетом варьирования основных параметров системы «неоднородная капля / высокотемпературная газовая среда» (рисунок 2). При проведении экспериментов в качестве компонентов исходных капель использовались типичные для топливных технологий, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей жидкости: вода, а также водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ), дизельное топливо, керосин, рапсовое, таловое и трансформаторные масла. Массовая концентрация ПАВ в экспериментах изменялась от 0 до 1 %.

Условия теплообмена в проведенных экспериментах изменялись при использовании следующих схем нагрева: одиночные капли в потоке разогретых газов, в трубчатой муфельной печи, на разогретой подложке, в высокотемпературной пламенной зоне, при свободном движении разогретой среде; группа капель в потоке разогретых газов, при свободном движении в разогретой среде. Ввод исходных капель в область регистрации осуществлялся с помощью координатного механизма. Исходные капли располагались на держателе. Температура газовой среды T_a (или поверхности T_s) во время проведения экспериментов регистрировалась с применением малоинерционных термопар и модуля сбора данных National Instruments с систематической погрешностью измерения температуры и времени менее чем ± 3 К и систематической погрешностью измерения времени 0,1 с.



Рисунок 2. Схема регистрации характеристик микро-взрывного распада двухжидкостной капли (вода/рапсовое масло) и образования вторичных фрагментов ($R_{d0} \approx 0.85$ мм, $T_a \approx 650$ К, объемная концентрация воды 10 %)

Для генерации двухжидкостных капель применялись электронные дозаторы «Ленпипет Новус», позволяющие генерировать объем жидкости с шагом 0,01 мкл. 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 от 0,05 до 0,5 мм, в зависимости от объема исходной капли и соотношения концентраций жидкостей. Для приготовления эмульсий проводилось смешивание эмульгатора и горючего компонента в

ультразвуковой ванне «Сапфир 2.8» в течении 5 минут. Далее к полученной смеси добавлялась дистиллированная вода. Полученная эмульсия перемешивалась в течении 5 минут. Стабильность и однородность эмульсии оценивались с помощью капельного теста.

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), а также с использованием авторских программных кодов в Matlab. При обработке изображений регистрировался режим распада исходной капли, начальные размеры исходных капель R_{d0} , количество N_{cd} , радиусы r_{cd} и скорости движения u_{cd} вторичных фрагментов, площадь свободной поверхности жидкости после S_1 и до микро-взрывного распада S_0 (рисунок 2).

Для регистрации компонентного состава вторичных фрагментов использовалась методика «Laser-Induced Fluorescence» (рисунок 3). Использованы: высокоскоростная видеокамера, макрообъектив, светофильтр, флуоресцентный краситель, непрерывный лазер, система линз для формирования лазерного ножа. Идентификация компонентного состава вторичных фрагментов проводилась на основании разницы светимости компонентов капель под действием лазерного излучения.

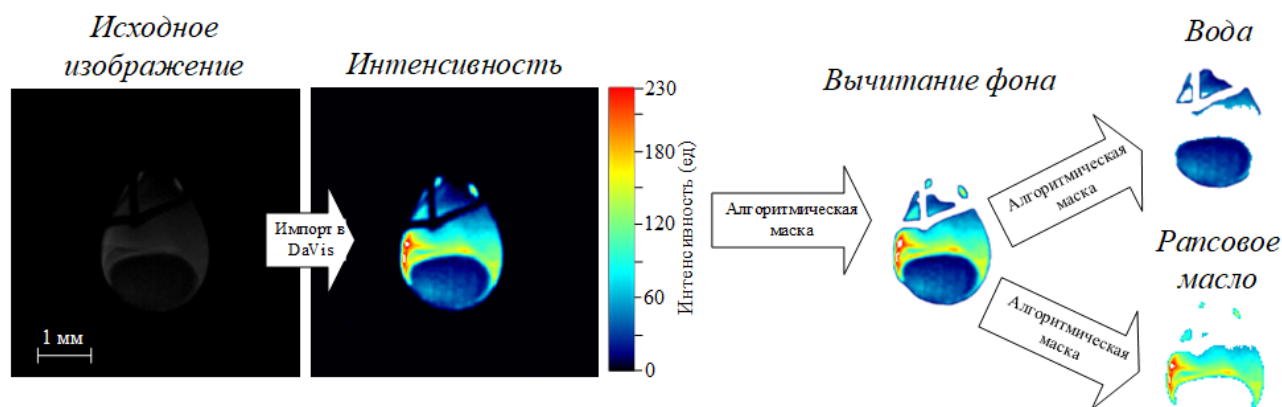


Рисунок 3. Процедура обработки изображений для идентификации компонентов капель в ПО DaVis (разделение компонентов в двухкомпонентной капле $R_{d0} \approx 1.06$ мм)

Определение интенсивности свечения капель проводилось в рамках нескольких этапов. Для удаления фона и выделения компонентов капель на все видеogramмы накладывались алгоритмические маски. В состав двухжидкостных капель входила вода с Rhodamine B и рапсовое масло, которые имели разные диапазоны изменения светимостей, то накладывались две маски (рисунок 3). Определение средней интенсивности свечения проводилось в выделенной области регистрации за 50–1000 кадров, в зависимости от скорости протекания процесса. Интенсивность свечения капель воды с Rhodamine B варьировалась от 4 до 140 ед, рапсового масла – от 160 до 400 ед, в зависимости от температуры и размеров капель жидкостей. Регистрировались светимости двухжидкостных капель, а также светимости образованных вторичных фрагментов.

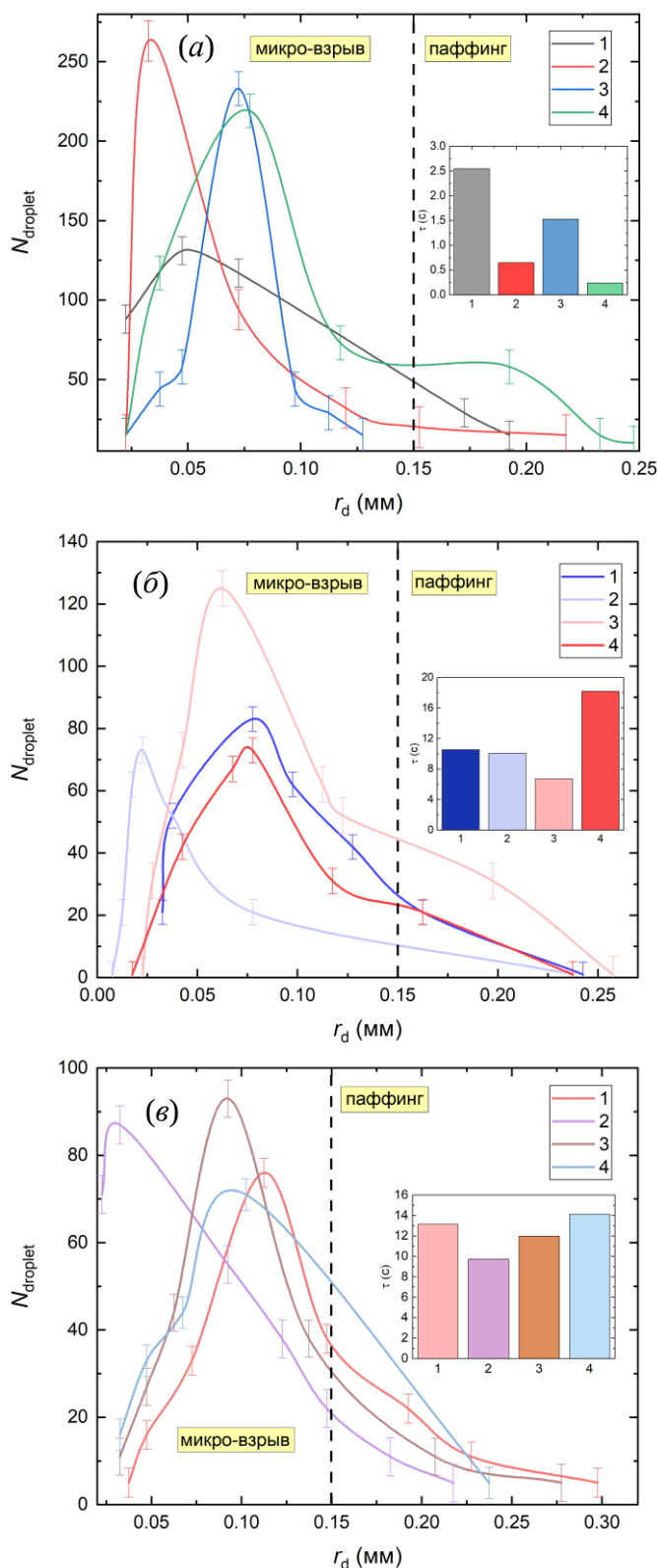


Рисунок 4. Распределения вторичных фрагментов по размерам для различных схем нагрева ($R_{d0} \approx 1,33$ мм): а – на разогретой поверхности ($T_s \approx 623$ К); б – в потоке разогретых газов ($T_a \approx 623$ К); в – в муфельной печи ($T_a \approx 623$ К): 1 – 90 об.% вода, 10 об.% дизельное топливо; 2 – 10 об.% вода, 90 об.% дизельное топливо; 3 – 90 об.% вода, 10 об.% рапсовое масло; 4 – 10 об.% вода, 90 об.% рапсовое масло

Установлено, что максимальное количество вторичных фрагментов образуется при кондуктивном нагреве (на разогретой поверхности), а минимальное – при радиационном (в муфельной печи) (рисунок 4). Для капле 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. Это обусловлено тем, что поверхностное натяжение жидкого горючего компонента в 2–3 раза ниже, чем воды. Температура внешней среды и подводимый к капле тепловой поток оказывают существенное влияние на размеры и количество вторичных фрагментов и режим распада. При проведении экспериментов микро-взрыву предшествовали 2–3 паффинга, из-за чего образовывались более крупные фрагменты.

На рисунке 5 приведены установленные распределения вторичных фрагментов воды и рапсового масла по размерам при варьировании концентрации горючей жидкости от 10 об.% до 90 об.% в исходных каплях и нагреве на разогретой поверхности. 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. Чем меньше толщина топливной пленки вокруг водяного ядра, тем мельче образующиеся вторичные фрагменты рапсового масла.

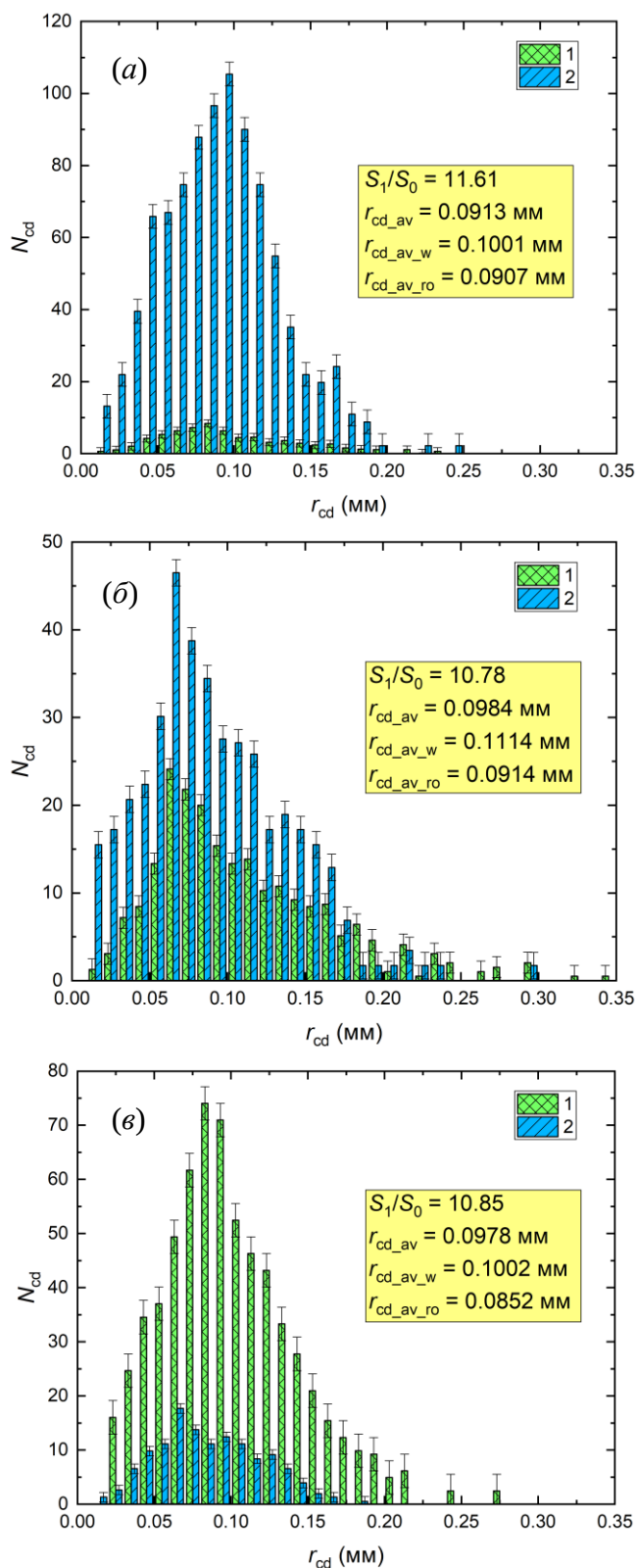


Рисунок 5. Распределения вторичных фрагментов по размерам (концентрация рапсового масла: а – 90 об.%, б – 50 об.%, в – 10 об.%; $R_{d0} \approx 1,06$ мм; $T_s \approx 573$ К) на разогретой поверхности для режимов распада паффинг/микро-взрыв: 1 – вторичные фрагменты воды; 2 – вторичные фрагменты рапсового масла

Установлено укрупнение вторичных фрагментов с водой и рапсовым маслом, а также снижение их количества при равном соотношении концентраций компонентов. При таких условиях вторичное измельчение протекало малоэффективно. Во всех экспериментах вторичные фрагменты рапсового масла имеют меньшие размеры. Это обусловлено тем, что поверхностное натяжение рапсового масла ниже, чем у воды. Проведенные эксперименты показали, что оптимальным, с точки зрения достижения минимальных размеров вторичных фрагментов, является состав с минимальной концентрацией негорючего компонента (доля воды не более 10 об.%).

По результатам проведенных экспериментов разработана физическая модель процесса формирования вторичных фрагментов, содержащих в своем составе воду и горючий компонент, при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель (рисунок 6). При паффинге паровые пузырьки образуются локально. Их дальнейшее объединение и выход на поверхность капли сопровождается отрывом фрагментов жидкости. Как следствие, формируется небольшое количество (как правило, от 2-3 шт до 7-12 шт) достаточно крупных вторичных фрагментов размерами более 0,15 мм. Паровой пузырь, выходя и схлопываясь на поверхности капли, инициирует отрыв фрагментов с малыми объемами масляной оболочки. При микро-взрыве парообразование происходит значительно более интенсивно. При микро-взрыве формирующиеся вторичные фрагменты имеют более разнообразный состав по размерам и содержанию компонентов.

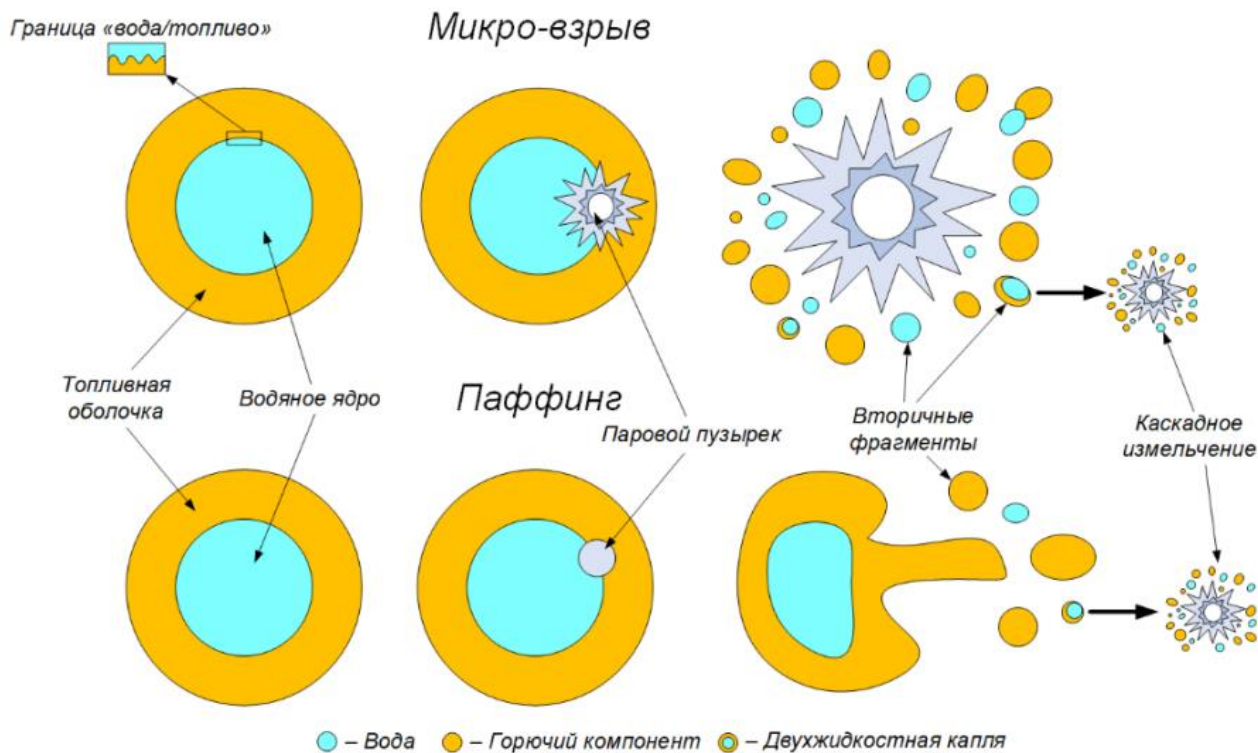


Рисунок 6. Физическая модель процесса формирования вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель в режимах паффинг и микро-взрыв

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, должны учитывать изменение температуры на границе раздела «вода/горючая жидкость» в капле; соотношение внутреннего давления в капле и сил, сдерживающих разрушение ее оболочки; изменение объема капли за счет парообразования. С применением совокупности этих данных можно в безразмерных системах координат определить необходимые условия для измельчения двухжидкостных капель при реализации 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). В качестве критерия для разделения режимов микро-взрывного распада в настоящей работе предложен безразмерный критерий F_{cd} , позволяющий учесть одновременный вклад затрат энергии и времени, необходимого для прогрева двухжидкостной капли до условий микро-взрывного распада, а также времени необходимого на образование вторичных фрагментов и соотношения площадей поверхности жидкости после и до распада. Выражение для вычисления критерия имеет вид: $F_{cd} = (S_1 \cdot \tau_p) / (S_0 \cdot \tau_s)$. На рисунке 7 представлены значения критерия F_{cd} , полученные по экспериментальным данным. Выделены диапазоны изменения

значений 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.

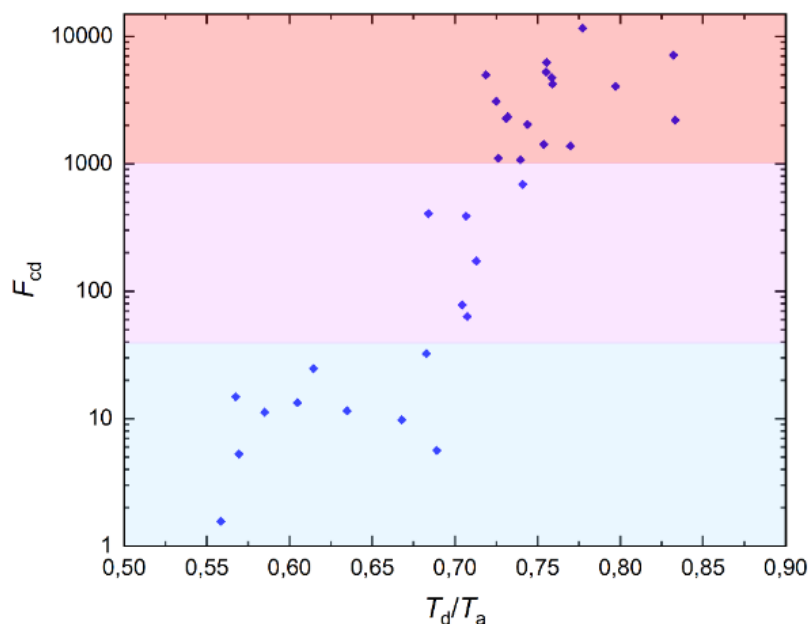


Рисунок 7. Значения безразмерного критерия F_{cd} при разных соотношениях средней температуры двухжидкостной капли к температуре газового потока, полученных при обобщении экспериментальных данных для капель на основе рапсового масла, дизельного топлива и керосина ($T_a = 630-750$ К, $R_{d0} = 0,75-1,2$ мм, $\eta \approx 90$ об.%)

В третьей главе представлена прогностическая математическая модель, разработанная с использованием авторских и коммерческих программных кодов. Сформулированы рекомендации по использованию результатов теоретических исследований при проведении научных исследований и разработке технологических решений в области вторичного измельчения капель жидкостей.

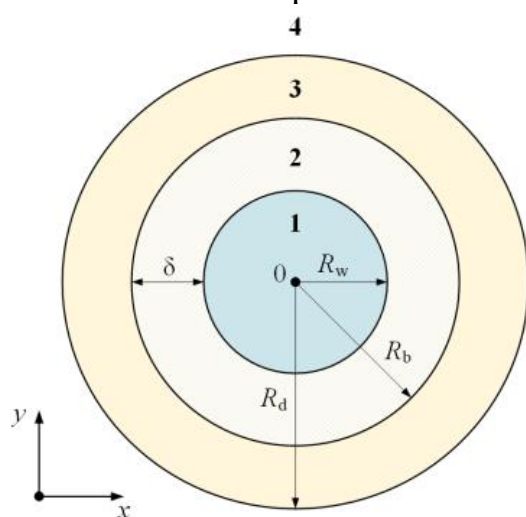


Рисунок 8. Схема области решения задачи распада двухжидкостной капли, где R_d – радиус капли, R_w – радиус водяного ядра, R_b – радиус парового пузыря (1 – вода; 2 – пары воды; 3 – топливо; 4 – воздух; δ – толщина парового слоя)

На рисунке 8 представлена схема области решения задачи микро-взрывного распада двухжидкостной капли. Исходная капля располагается в газовой среде. Предполагается, что вода внутри капли достигла состояния перегрева, т.е. условий микро-взрывного распада, в результате чего вблизи границы «вода/топливо» образовалась паровая прослойка толщиной δ . При рассмотрении задачи микро-взрывного распада двухжидкостной капли предполагалось, что в формировании вторичных фрагментов участвует топливная оболочка. Экспериментально установлено, что вторичные фрагменты воды, составляют не более 10 % от общего объема вторичных фрагментов и представляют капли размерами 0,15 мм и более.

Для решения задачи микро-взрывной фрагментации неоднородной капли

применялся подход Эйлера, который основывался на использовании неподвижной равномерной расчетной сетки. При этом отслеживание перемещения межфазной границы осуществляется с помощью непрерывных эйлеровых маркеров, что реализовано в методе VOF. Жидкая и газовая фазы рассматриваются в качестве единой многокомпонентной среды. Пространственное распределение фаз в пределах расчетной области определяется с помощью специальной 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:

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

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:

$$\frac{\partial F_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} F_i) = 0. \quad (2)$$

Уравнение моментов для фаз в модели VOF:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho \vec{g} + f_v, \quad (3)$$

$$\text{где } \rho = \rho_i \cdot F + \rho_j \cdot (1 - F), \quad (4)$$

$$\mu = \mu_i \cdot F + \mu_j \cdot (1 - F). \quad (5)$$

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

$$f_{vij} = \sigma_{ij} \frac{F_i \rho_i \kappa_i \nabla F_i + F_j \rho_j \kappa_j \nabla F_j}{0.5(\rho_i + \rho_j)}, \quad \kappa_i = -\kappa_j = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla F_i}{|\nabla F_i|} \right), \quad (6)$$

где σ – коэффициент межфазного натяжения, Н/м; κ – кривизна поверхности, 1/м.

Анализ влияния темпа нагрева на степень перегрева воды показал, что в проведенных экспериментах скорости нагрева не превышают 300 К/с, а значения степени перегрева воды выше равновесной температуры кипения не превышают 15 К. Увеличение размеров капли происходило за счет постоянного притока паров с границы «вода/пар», давление паров задавалось в качестве постоянной величины. Давление насыщенных паров перегретой воды выше атмосферного и может достигать 70 кПа при температуре 388 К. Соответственно, с учетом установленной степени перегрева задавалось значение давления P_v на границе «вода/пар».

На рисунке 9 представлены типичные кадры микро-взрывного распада двухжидкостной капли на основе рапсового масла, полученные по результатам экспериментов и математического моделирования. Стадии распада

двухжидкостных капель в эксперименте и при моделировании согласуются. На начальном этапе происходит увеличение капли в размерах, далее происходит разрушение внешней оболочки и образование жидкостных фрагментов, которые в процессе движения распадаются на мелкие.

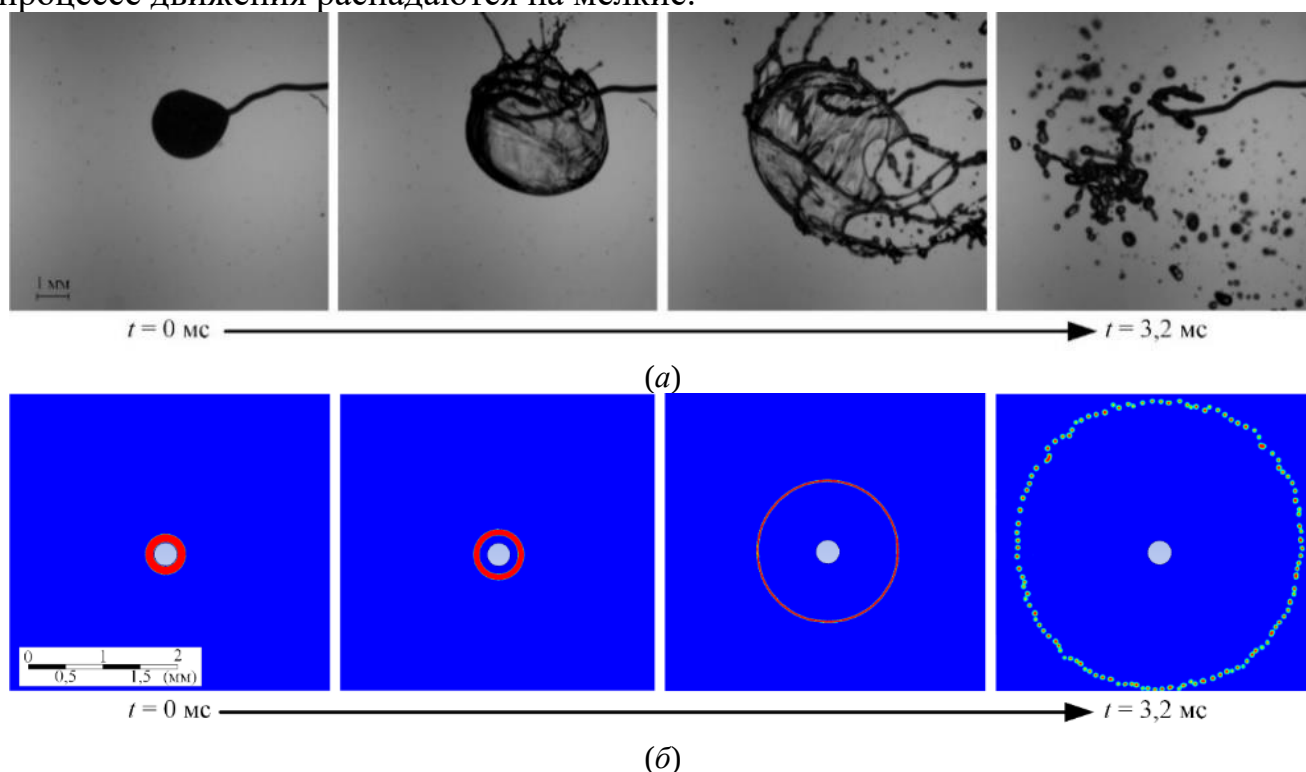


Рисунок 9. Кадры микро-взрывного распада двухжидкостной капли ($R_{d0} = 1,1$ мм) на основе рапсового масла, полученные по результатам экспериментов (а) и моделирования (б)

На рисунке 10 показаны установленные зависимости размеров вторичных фрагментов от температуры газовой среды T_a . Скорости нагрева капель и степени перегрева воды определялись экспериментально. Теоретические расчеты проведены при варьировании избыточного давления насыщенных паров P_v в диапазоне 10–50 кПа и концентрации горючего компонента 90 об.% для двух топливных композиций: вода/дизельное топливо и вода/рапсовое масло. Обеспечено удовлетворительное согласие результатов экспериментальных и теоретических исследований. Максимальные отклонения не превышают 15 %. По результатам сравнительного анализа (рисунок 10) определено, что средние размеры фрагментов, полученные по результатам моделирования, имеют меньшие значения, чем в эксперименте. Это обусловлено тем, что разработанная модель не учитывает образование вторичных фрагментов воды, которые, как правило, имеют повышенные размеры по сравнению с горючей жидкостью, что приводит к укрупнению средних размеров фрагментов в эксперименте.

На рисунке 11а представлены зависимости размеров вторичных фрагментов от смещения водяного ядра относительно центра двухжидкостной капли. В верхней части рисунка 11а 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. Весомый вклад в

средний размер вторичных фрагментов вносят крупные жидкостные фрагменты, которые образуются в местах, где толщина оболочки максимальна, т.е. в верхней части. На рисунке 11б также представлены зависимости среднего размера вторичных фрагментов от несферичности исходных капель. Несферичность (E) рассчитывалась как отношение радиусов капли в продольном (a) и поперечном сечениях (b). С усилением несферичности исходной капли увеличивается средний размер вторичных фрагментов. Несферичность капли оказывает довольно слабое влияние при $E = 0,8-1,2$, т.е. изменение формы исходной капли в таком диапазоне оказывает слабое влияние на характеристики вторичных фрагментов.

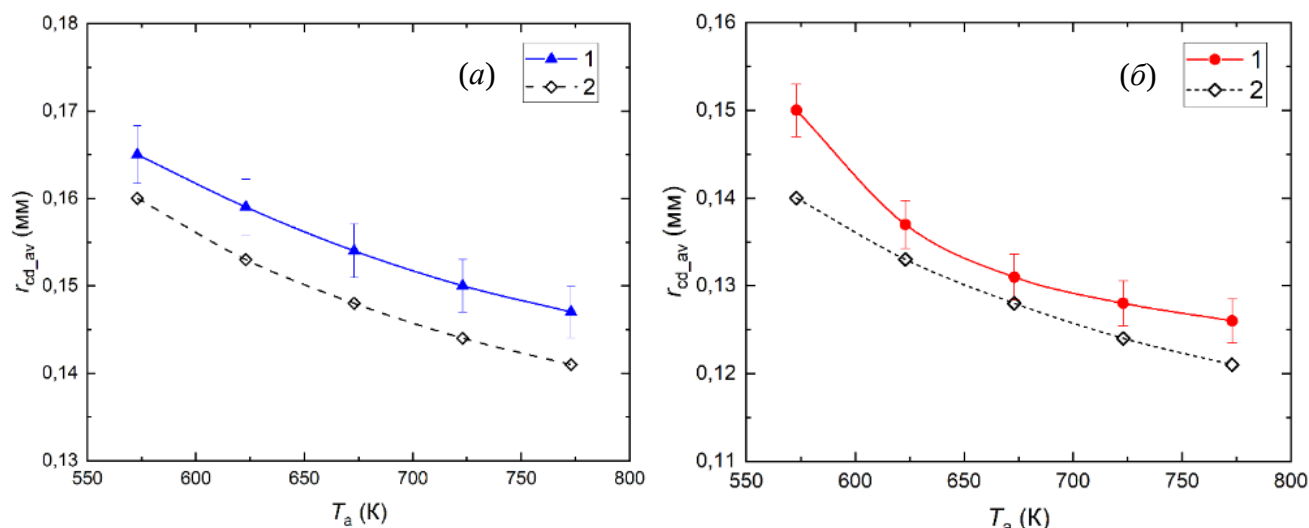


Рисунок 10. Зависимости размеров вторичных фрагментов, образованных при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель, от температуры газовой среды (1 – экспериментальные данные; 2 – результаты моделирования): а – вода/дизельное топливо ($R_{d0} = 1,5$ мм, $\eta = 90$ об%), б – вода/рапсовое масло ($R_{d0} = 1,5$ мм, $\eta = 90$ об%)

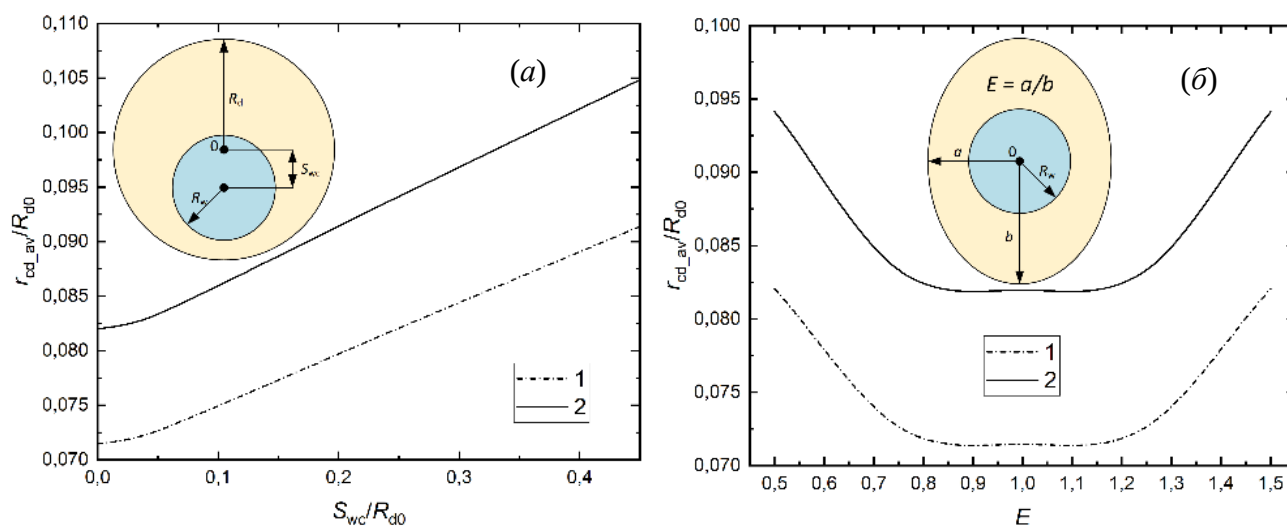


Рисунок 11. Зависимости средних размеров вторичных фрагментов, образованных при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель: а – от смещения водяного ядра относительно центра капли; б – от несферичности исходной капли ($R_{d0} = 1$ мм, $\eta = 90$ об%, $P_v = 10$ кПа): 1 – вода/рапсовое масло, 2 – вода/дизельное топливо

Полученные результаты экспериментальных и теоретических данных позволяют с учетом исходных параметров (начальные размеры исходных капель,

свойства и концентрации компонентов, температуры внешней среды и схемы нагрева, расстояния между исходными каплями в составе спрея и др.) прогнозировать характеристики вторичных фрагментов, образованных в результате микро-взрывного распада, от каждой из исходных капель. Эти данные необходимо учитывать при прогнозировании распределения капель топлива в различных сечениях камер сгорания двигателей и энергетических установок (рисунок 12).

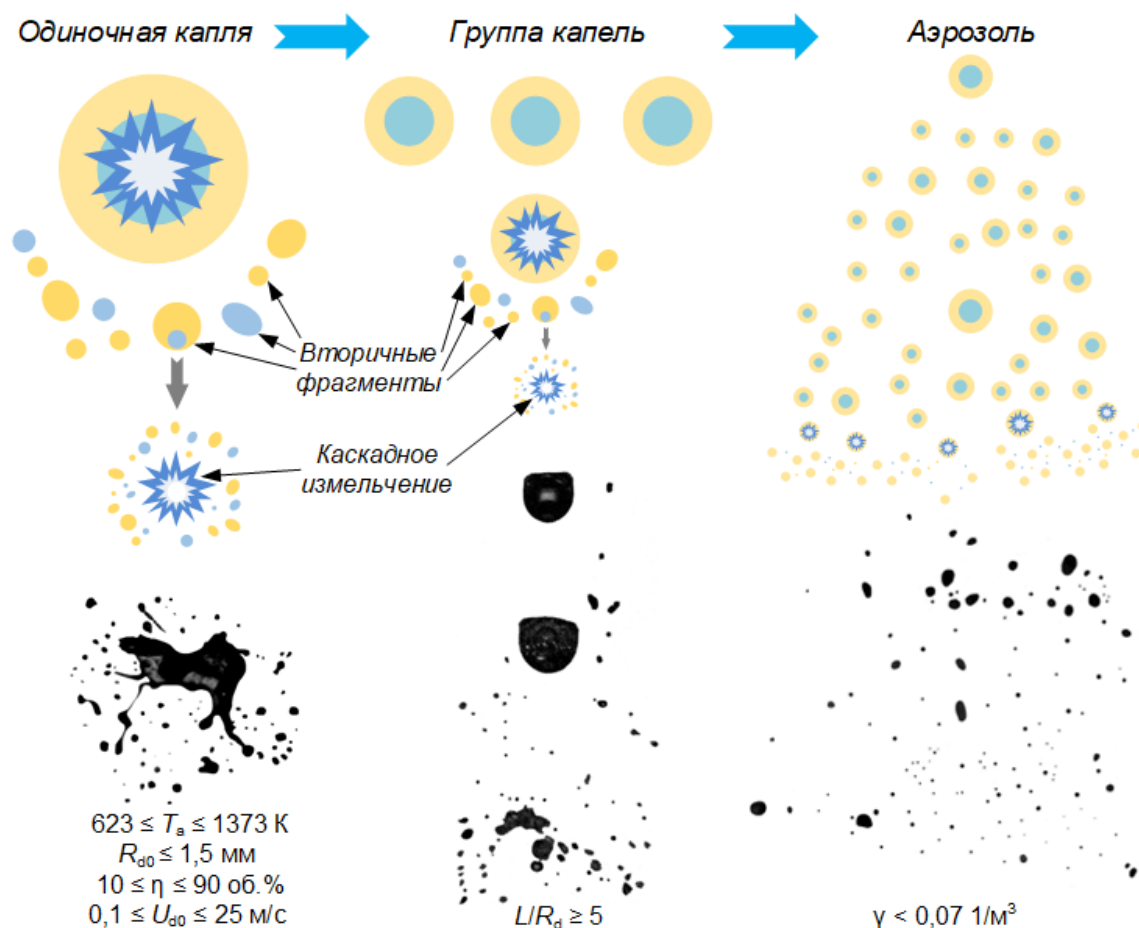


Рисунок 12. Схема переноса результатов экспериментов и математического моделирования к спреям в камерах сгорания (T_a – температура внешней среды, R_{d0} – начальные размеры капель, η – концентрация горючего компонента, U_{d0} – начальные скорости движения капель, L – расстояние между соседними каплями, γ – объемная концентрация капель в аэрозоле)

Для переноса полученных результатов на промышленные камеры сгорания разработан авторский программный код (UDF), позволяющий прогнозировать характеристики микро-взрывного распада двухжидкостных капель в составе спреев. С его применением выполнены расчеты для прогнозирования размеров и концентрацию капель жидкостей в разных сечениях камеры сгорания и реактора смешения с учетом процессов прогрева, испарения и фрагментации. Данный код планируется развивать в направлении учета эффектов взаимодействия соседних капель между собой в составе спреев.

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертационных исследований, а также сформулированы рекомендации по их использованию.

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 исходной 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 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 исходных 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 паффинг 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 исходных 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 нагрев и потенциальной экономии энергоресурсов при создании технологий распыления жидкостей разного назначения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

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., 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).
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. 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).