

На правах рукописи



Антонов Дмитрий Владимирович

**МИКРО-ВЗРЫВНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ДВУХЖИДКОСТНЫХ
КАПЕЛЬ**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск - 2021

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: 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

Крюков Алексей Павлович,
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Национальный исследовательский
университет «МЭИ», Кафедра низких температур,
профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук (ИПМех РАН), 119526, Россия,
г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1. Сайт:
<https://ipmnet.ru/>, телефон: +7-495-434-00-17, +7-495-434-
32-38, E-mail: ipm@ipmnet.ru

Защита состоится 06 апреля 2022 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте 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 Института теплофизики 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 «___» февраля 2022 г.

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



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Традиционно при разработке и модернизации топливных технологий основное внимание уделяется решению ограниченной, но в то же время наиболее значимой (первостепенной) группы задач. В частности, активно проводятся исследования с целью создания технологий, способствующих минимизации расхода топлива, повышению интегральных характеристик процесса горения, снижению антропогенных выбросов при сжигании топлива, повышению полноты его выгорания, улучшению качества и в тоже время удешевлению процесса подготовки и распыления топлива.

Современные системы огневой и термической очистки воды от нерегламентированных примесей, да и другие существенно отличающиеся по принципу действия системы, к сожалению, имеют относительно невысокий коэффициент полезного действия. Это обусловлено тем, что очищаемую жидкость приходится повторно (циклически) подавать в камеру термической очистки. Примеси не успевают выпариться (оседать или выгорать) в нагревательной камере в течение одного цикла. При этом повышается расход энергии, затрачиваемой на работу данных систем, а также существенно увеличивается длительность протекания соответствующих процессов.

В первом (топливные технологии) и во втором (термическая очистка жидкостей от примесей) случаях рациональным способом решения указанных проблем может стать дробление капель топлив или очищаемых жидкостей до характерных размеров десятков и сотен микрометров. Но как показали эксперименты с распыленными потоками жидкостей, такие мелкие капли могут быть унесены из камеры термической очистки при малых скоростях движения (вследствие высоких скоростей движения разогретых дымовых газов или встречного воздушного потока) или налипать и оседать на стенках камер сгорания. Поэтому дробление капель при подаче в нагревательные камеры может приводить к дополнительным технологическим сложностям и ограничениям. В таком случае целесообразно дробление капель в фиксированных зонах камер сгорания или термической очистки в процессе нагрева. В этом направлении предпринимаются попытки разработки соответствующих технологий коллегами со всего мира. Наиболее привлекательным, с точки зрения стабильности реализации, требуемых расходов энергии и времени, представляется достижение условий микро-взрывной фрагментации капель (интенсивного дробления) с образованием топливного аэрозоля. В основном пока можно выделить лишь немного

экспериментальных и теоретических исследований условий и характеристик микро-взрывного распада двухжидкостных капель, эмульсий, растворов и суспензий, их последующего распада с образованием аэрозоля.

Нерешенными остаются задачи поиска методов управления характеристиками процессов микро-взрывного распада (дробления) двухжидкостных капель, эмульгированных топлив, растворов или суспензий. Важно разработать физические и математические модели для достоверного прогнозирования последствий дробления капель вследствие локального перегрева и вскипания, возможных режимов протекания этих процессов, отличий для разных схем перемешивания и др. Это можно сделать лишь при наличии достоверной экспериментальной информационной базы данных с характеристиками и условиями реализации данных эффектов.

Целью диссертационной работы является определение характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель по результатам экспериментальных и теоретических исследований с применением высокоскоростной видеорегистрации, бесконтактных оптических методов, коммерческих и собственных программных кодов. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка методики экспериментальных исследований характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве с варьированием в широких диапазонах параметров исследуемых процессов: температуры греющей среды, начальных размеров капель, концентраций жидкостей и др.
2. Создание экспериментальных стендов с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов для изучения механизмов микро-взрывного распада.
3. Разработка математических моделей тепломассопереноса в двухжидкостных каплях перед микро-взрывной фрагментацией в высокотемпературной газовой среде с использованием коммерческих и собственных программных кодов.
4. Экспериментальное и теоретическое определение зависимостей интегральных характеристик микро-взрывной фрагментации от группы основных параметров системы (температура, давление, скорость потока газовой среды, вид и концентрация горючей жидкости, способ нагрева объектов исследований, размер двухжидкостных капель и др.).
5. Исследование временных характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель с установлением основных стадий и механизмов фрагментации при различных условиях подвода тепла.

6. Определение влияния коллективных эффектов на процессы микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель.
7. Изучение закономерностей физических процессов, протекающих в двухжидкостной капле («вода/топливо») при ее интенсивном нагреве.
8. Исследование эффектов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель в условиях интенсивного дробления; регистрация количества отрывающихся жидкостных фрагментов; вычисление площадей поверхности испарения жидкости после и до распада.
9. Анализ времен задержек микро-взрывного распада и последующего зажигания двухжидкостных капель и аналогичных временных характеристик испарения и зажигания однородных капель топлив.
10. Разработка рекомендаций по использованию результатов фундаментальных научных исследований при совершенствовании перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий (топочные устройства энергетических установок, дизельные двигатели, технологии термической очистки жидкостей, пожаротушение и др.).

Научная новизна изложенных в работе результатов заключается в следующем: экспериментально и теоретически установлены условия реализации эффектов микро-взрывного разрушения (дробления) двухжидкостных капель вследствие их интенсивного парообразования при различных условиях повода тепла (в потоке разогретого газа, на разогретой подложке и муфельной печи). С применением разработанных экспериментальных методик на базе высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и бесконтактных оптических методов диагностики потоков «Particle Image Velocimetry» (PIV), «Planar Laser-Induced Fluorescence» (PLIF), «Laser Induced Phosphorescence» (LIP) и «Shadow Photography» (SP) изучены закономерности и условия микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве. Установлены режимы существования двухжидкостных капель при нагреве. Выделены условия нагрева, при которых происходит микро-взрывное разрушение двухжидкостной капли. Определены временные характеристики микро-взрывной фрагментации. Зарегистрированы процессы зажигания и горения вторичных капель, образующихся в результате микро-взрывного распада. Установлены масштабы влияния состава и вида капли (двухжидкостная капля или эмульсия) на времена существования и распада в потоке высокотемпературных газов. Определены характерные значения соотношений площадей поверхности испарения жидкости после и до микро-взрывного дробления двухжидкостных капель при интенсивном нагреве.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты, а также сформулированные заключения являются научными основами для разработки и модернизации перспективных высокотемпературных газопарокапельных приложений, а также развития и совершенствования существующих. К ним относятся: топливные технологии, а именно топочные устройства и дизельные двигатели (использование новых видов топлива на основе воды и топлива для совместного улучшения экологических, энергетических и экономических характеристик); термическая или огневая очистка воды; пожаротушение с применением двухжидкостных капель (за счет реализации микро-взрывной фрагментации капель жидкости и последующего образования пароводяных облаков, способствующих увеличению площади покрытия очага горения и вытеснению окислителя).

Достоверность результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей измерений, удовлетворительной повторяемостью результатов экспериментов при идентичных начальных параметрах системы, а также использованием современного высокоточного оборудования. Также выполнено сравнение полученных экспериментальных и численных результатов с известными теоретическими и экспериментальными заключениями других авторов.

Связь работы с научными программами и грантами.

Исследования режимов распада двухжидкостных капель в высокотемпературной газовой среде выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 18-71-10002. Экспериментальные и теоретические исследования микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-314.2019.8, гранта Президента РФ № МД-289.2021.4 и стипендии Президента РФ № СП-447.2021.1. Условия микро-взрывного распада капель суспензий изучены в рамках проекта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-806 (в консорциуме вузов и институтов РАН, возглавляемом ИТ СО РАН).

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. Механизм микро-взрывного распада двухжидкостной капли при высокотемпературном нагреве связан с перегревом воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры начала кипения.
2. Режимы, условия и характеристики процессов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель и эмульгированных топлив существенно отличаются.
3. Времена задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель на подложке существенно меньше (в 5–10 раз), чем в потоке разогретых газов и муфельной печи при идентичной температуре нагрева, а число и размеры вторичных фрагментов зависят от режима фрагментации: частичный (от 5 до 20 одиночных вторичных капель с размерами (радиусами) более 0.3 мм) или полный распад (более 20 мелких вторичных капель с размерами менее 0.3 мм).
4. Времена задержки микро-взрывного распада и последующего зажигания двухжидкостных капель значительно меньше (в 4–10 раз) аналогичных временных характеристик испарения и зажигания однородных капель этих топлив. Площадь поверхности испарения смеси жидкостей после микро-взрывного распада увеличивается существенно (от 10–15 до 100–200 раз) относительно начальных значений.
5. При выполнении теоретических исследований в качестве критериев микро-взрывного распада правомерно использовать: критерий по перегреву границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения дисперсной фазы (воды) и критерий по достижению критического размера (радиуса) пузыря.

Личный вклад автора. Научные результаты и выводы, послужившие основой диссертации и выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка решаемых задач проводилась диссертантом как лично, так и совместно с научным руководителем проф. П.А. Стрижаком. Автор проводил лично и непосредственно участвовал в проведении экспериментальных и теоретических исследований, включая отладку экспериментальных методик и вычислительных кодов, проведении численных расчетов, участвовал в совместных обсуждениях при получении результатов исследований, а также при подготовке рукописей к публикации в высокорейтинговых журналах. Математические модели с авторскими программными кодами разработаны совместно с проф. П.А. Стрижаком, аналитические решения сформулированных задач – с проф. С.С. Сажиним.

Экспериментальные исследования с применением оптических методов многофазных потоков проводились совместно с проф. П.А. Стрижаком и доц. Р.С. Волковым. Высокоскоростная видеорегистрация процессов распада капель при разных схемах нагрева проводилась с проф. П.А. Стрижаком, асп. Р.М. Федоренко. С проф. П.А. Стрижаком и проф. Г.В. Кузнецовым, а также с зарубежными учеными T. Bar-Kohany, G. Castanet, O. Rybdylova, J. Bellettre готовились совместные статьи, в которых анализировались полученные диссертантом результаты. Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории тепломассопереноса ТПУ за помощь в проведении исследований, обсуждение результатов и сформулированные предложения по дальнейшему развитию работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2015, 2016, 2017 гг.; Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2015, 2016, 2017 гг.; VI Всероссийская конференция «Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых», г. Томск, 2015 г.; XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2015 г.; Международная конференция студентов и молодых ученых «Nanoparticles, Nanostructured coatings and micro containers: technology, properties, applications», г. Томск, 2016 г.; XX Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2016, 2020 гг.; Международная научно-техническая конференция молодежи «Транснефть», г. Томск, 2016 г.; III Всероссийский молодежный форум «Наука будущего-наука молодых», г. Нижний Новгород, 2017 г.; III Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВУЗов и научных академических институтов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «ШАГ В НАУКУ», г. Томск, 2017 г.; Всероссийский инновационный конкурс на базе Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск, 2017 г.; Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 2018, 2020 гг.; Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2018, 2019, 2020 гг.; Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития», г. Томск, 2018 г.; VIII Международная

молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2018», г. Томск, 2018 г.; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 2018, 2019 гг.; III Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых учёных, г. Ялта, 2018 г.; XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках», г. Москва, 2019 г.; XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 2019 г.; Всероссийская научная конференция с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», г. Санкт-Петербург, 2019 г.; III международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетике», г. Москва, 2020 г.; 7th Sprays SIG workshop. Sprays in engineering applications: modelling and experimental studies, University of Brighton, г. Брайтон, Великобритания, 2020 г.; 7th Sprays SIG workshop. Sprays in engineering applications: modelling and experimental studies, University of Brighton, г. Брайтон, Великобритания, 2020 г.; Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых энергия–2021, г. Иваново, 2021 г.; The 3rd International Scientific Conference «Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources», г. Санкт-Петербург, 2021 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в более чем 30 печатных работах, в том числе 10 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Физика горения и взрыва», «Письма в Журнал технической физики» («Technical Physics Letters»), «Доклады Академии наук», «Journal of Engineering Physics and Thermophysics», более 20 статей в высокорейтинговых журналах (входят в 1–2 квартили Web of Science): «International Journal of Heat and Mass Transfer» (ИФ= 4,947), «Fuel» (ИФ=5,128), «Thermal Science» (ИФ=1,574), «Chemical Engineering Research and Design» (ИФ=3,350), «Acta Astronautica» (ИФ=2,482), «Journal of the Energy Institute» (ИФ=4,748), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=4,026), «Experimental Thermal and Fluid Science» (ИФ=3,444), «Combustion and Flame» (ИФ=4,570), «Microgravity Science and Technology» (ИФ=1,40), «International Journal of Thermal Sciences» (ИФ=3,940), «International Communications in Heat and Mass Transfer» (ИФ=3,470), «Energies» (ИФ=2,676), «Fuel Processing Technology» (ИФ=4,982), «Energy» (ИФ=5,747). Получены 25 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 моделирования процессов тепломассопереноса Томского политехнического университета во главе с Г.В. Кузнецовым и П.А. Стрижаком за поддержку и помощь в проведении экспериментальных исследований. Автор также выражает огромную благодарность зарубежному научному руководителю профессору теплофизики С.С. Сажину за помощь в проведении теоретических исследований микро-взрывных эффектов, постоянную поддержку при взаимодействии с коллегами во всем мире. Соискатель выражает благодарность зарубежным ученым Т. Bar-Kohany, G. Castanet, O. Rybdylova, C. Crua, J. Bellettre за совместные экспериментальные и теоретические исследования процессов тепломассопереноса и фазовых превращений в двухжидкостных каплях; д.ф.-м.н. Г.В. Кузнецову за полезные рекомендации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 178 страниц, содержит 52 рисунка и 5 таблиц. Список литературы состоит из 183 наименований.

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 микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель. Проанализированы известные результаты исследований закономерностей, условий и характеристик микро-взрывной фрагментации жидкостей. Рассмотрены установленные ранее особенности быстропотекающих процессов микро-взрывной фрагментации топлив при интенсивном нагреве. Выделены основные высокотемпературные газопарокапельные и топливные технологии, для которых актуально изучение рассматриваемых процессов. Сформулированы проблемные вопросы, характерные соответствующим технологиям, и отмечены достижения в изучении микро-взрывной фрагментации топлив.

В выводах к главе 1 отмечено, что под микро-взрывом принято понимать кратковременный распад родительской двухжидкостной капли, вызванный

микро-взрывным кипением внутренних водяных капель, при котором происходит образование мелких вторичных фрагментов размерами от нескольких десятков до сотен микрометров. Наиболее типичными жидкостями в известных ранних исследованиях являлись: вода в качестве химически инертной жидкости; дизельное топливо или биодизель в качестве горючих жидкостей. Методы интенсификации теплообмена за счет микро-взрывных эффектов активно начали развиваться с начала 2000-ых годов. Однако первые исследования проведены В.М. Ивановым и П.И. Нефедовым еще в 1962 году. К настоящему времени в этом направлении представлены работы из научных центров и лабораторий Японии, Германии, США, Франции, Китая, Малайзии, Индии, Великобритании и России. Ключевые подходы и методы регистрации состоят в использовании высокоскоростной съемки при проведении экспериментов и использовании двух критериев микро-взрывного распада (перегрев воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры кипения и критический размер (радиус) пузыря) при моделировании.

Исследования предельных условий микро-взрывных эффектов являются предпосылками для развития технологий в области сжигания жидких топлив и топливных композиций в двигателях и теплогенерирующих установках, технологиях разделения эмульсий и суспензий на компоненты (выпаривание, сушка, выжигание), термической очистки сточных вод, тушении пожаров специализированными смесевыми составами и др. Незученными экспериментально остаются: механизмы, режимы и характеристики процессов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель и эмульгированных топлив при разных условиях нагрева (на разогретой поверхности, в потоке газа, в муфельной печи). Современные модели микро-взрыва имеют ряд допущений: теплофизические и термодинамические свойства принимаются постоянными (не зависящими от температуры); эффекты испарения и набухания игнорируются; капля воды располагается в центре капли топлива; критерии микро-взрывного распада по перегреву воды на границе раздела «вода/топливо» выше температуры кипения и росту пузыря не взаимосвязаны. Выделено, что целесообразным является проведение экспериментальных и теоретических исследований характеристик микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель для развития группы газопарокапельных технологий. Следует экспериментально и теоретически определить характеристики тепломассопереноса и фазовых превращений в двухжидкостных каплях в условиях реализации микро-взрывных эффектов, исследовать влияние группы основных варьируемых параметров системы «двухжидкостная капля / высокотемпературная среда» на эти характеристики. Кроме того, представляет интерес изучение механизмов реализации микро-взрывных эффектов в разных

условиях нагрева (на разогретой поверхности, в потоке газа, в муфельной печи) и для разных жидкостей. Наиболее разумным предполагается разработка математической модели с применением авторских и коммерческих программных кодов для изучения особенностей протекания исследуемых процессов микро-взрыва в широком диапазоне варьируемых параметров, которые затруднено реализовать в экспериментах и соответствуют перспективным топливным технологиям: температура греющей среды выше 1000 К; концентрация воды ниже 10 %; начальные размеры капель менее 50 мкм.

Во **второй главе** представлено описание созданных экспериментальных стендов и разработанных методик проведения исследований с оценкой погрешностей результатов выполненных измерений. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры греющей среды, схемы нагрева, концентрации горючих жидкостей с разными теплофизическими и реологическими свойствами, начальных размеров капель, а также коллективных эффектов на характеристики микро-взрыва (времена задержки микро-взрывного распада, число и размеры вторичных фрагментов).

Основной задачей планируемых экспериментов было определение предельных условий устойчивой реализации частичного («паффинг») и полного распада капель (микро-взрывная фрагментация), а также изучение характеристик этих процессов (времена задержки распада, времена существования, эволюция размеров капель во времени, увеличение площади поверхности испарения после и до распада). Исследование особенностей и закономерностей частичной и полной фрагментации капель жидкости в лабораторных условиях на стадии планирования экспериментов подразумевает воспроизведение основных параметров, характеризующих протекание рассматриваемых процессов в существующих практических приложениях и перспективных новых технологиях. Основными параметрами, существенно влияющими на процессы фрагментации капель жидкости, являются характеристики греющей среды (температура газа или поверхности подложки, давление и др.), скорости воздушного потока при конвективном нагреве, а также его характер (ламинарный или турбулентный), схемы нагрева с доминированием разных механизмов подвода тепла, свойства материалов капель жидкостей, технология формирования капель (двухжидкостные капли с явно выраженной границей раздела двух жидкостей и эмульгированные топлива) и другие. Для выполнения сформулированной выше задачи спланирован многофакторный эксперимент с учетом варьирования основных параметров системы «двухжидкостная капля / высокотемпературная газовая среда».

Высокотемпературный нагрев двухжидкостных капель осуществлялся с использованием нескольких схем с доминированием радиационного, конвективного и кондуктивного теплового потока (рис. 1-3). Наибольший интерес представляли схемы с конвективным и радиационным нагревом (рис. 1 и 2), так как они приближали эксперименты на лабораторном стенде к указанным выше практическим приложениям. Температура воздуха варьировалась в диапазоне от 300 К до 1500 К. Скорость потока воздуха в схемах с конвективным нагревом изменялась от 0.5 до 6 м/с. Регистрация изменений температуры разогретой области T_a (или T_{sub}) во время проведения экспериментов выполнялась с использованием системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар с систематической погрешностью измерения температуры менее чем ± 3 К и систематической погрешностью измерения времени 0.1 с.

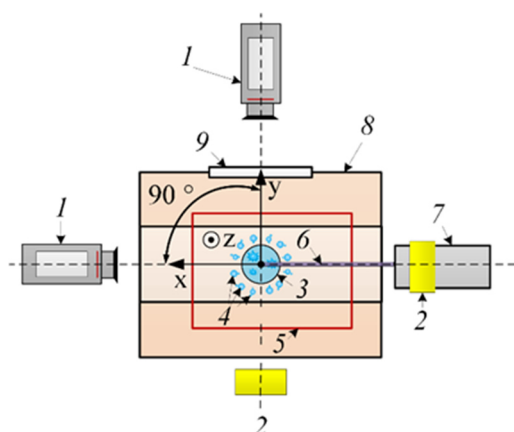


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального стенда при нагреве в трубчатой муфельной печи.

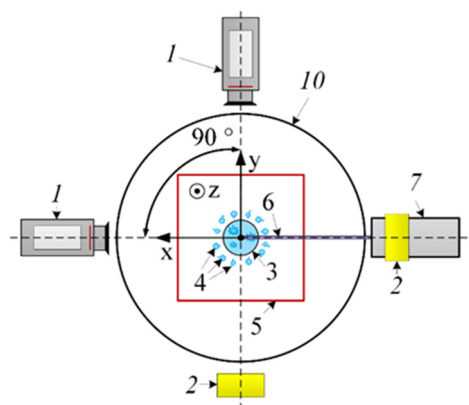


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментального стенда при нагреве в потоке разогретых газов.

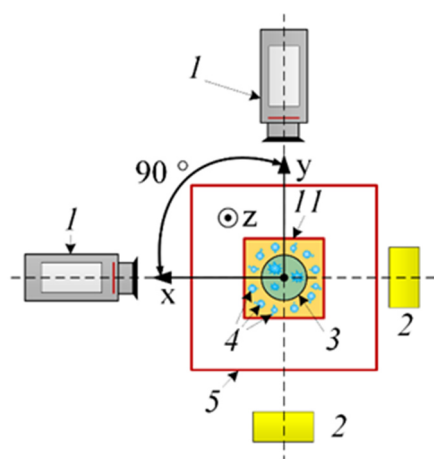


Рис. 3. Схематическое изображение экспериментального стенда при нагреве на разогретой подложке.

Обозначения:

- 1 – высокоскоростная видеокамера;
- 2 – осветительный прожектор;
- 3 – двухжидкостная капля;
- 4 – вторичные фрагменты;
- 5 – регистрационная область;
- 6 – держатель;
- 7 – координатное устройство (МКУ);
- 8 – трубчатая муфельная печь;
- 9 – смотровое окно;
- 10 – цилиндр из кварцевого стекла;
- 11 – разогретая подложка.

При проведении экспериментов при формировании топливных композиций использовались типичные для топливных технологий жидкости: водопроводная и дистиллированная вода, а также водные растворы с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ), керосин, дизельное топливо, трансформаторное масло, рапсовое масло. Массовая концентрации ПАВ в экспериментах изменялась от 0 до 1 %. В качестве ПАВ для стабилизации топливных эмульсий использовались моноэтаноламиды жирных кислот.

Для получения двухжидкостных капель («вода/топливо») заданного объема использовались два электронных дозатора Finnpiptette Novus с функциями забора жидкости от 5 до 50 мкл (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 мкл) и от 0.5 до 12.5 мкл (шаг варьирования генерируемого объема 0.01 мкл). Непосредственный забор жидкости проводился специальными сменными наконечниками, которыми оснащены электронные дозаторы. Исследуемые двухжидкостные капли вводились в область регистрации с помощью координатного механизма, на конце которого находился держатель из нихромовой, стальной, медной, алюминиевой или керамической проволоками диаметром от 0.2 мм до 0.9 мм.

С помощью высокоскоростных видеокамер Phantom Miro M310 и Phantom v411 выполнялась регистрация процессов прогрева, испарения и фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве. Полученные по результатам экспериментов видеофрагменты обрабатывались в программном обеспечении Phantom Camera Control, а также с использованием собственных программных кодов в Matlab и Mathematica. При обработке регистрировались режимы фрагментации двухжидкостных капель, времена задержки начала распада, начальные размеры капель, а также размеры и число вторичных фрагментов (рис. 4).

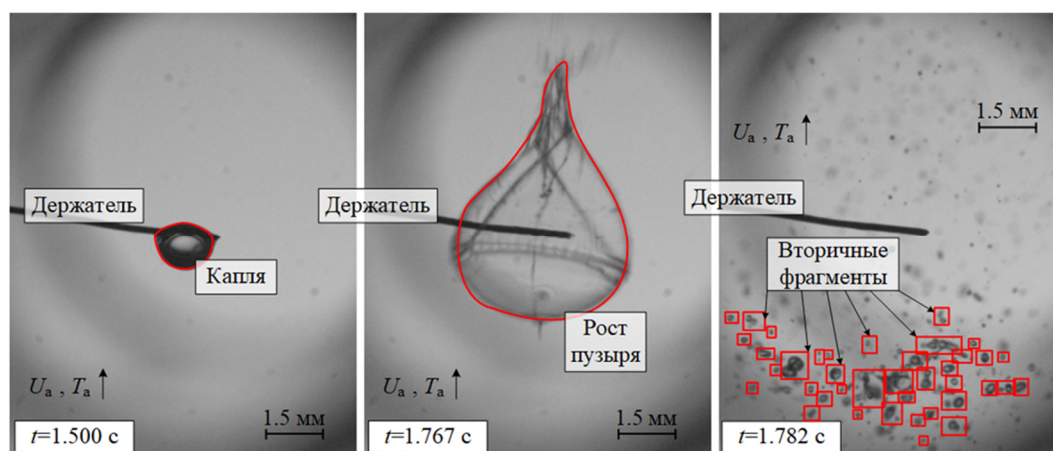


Рис. 4. Схема регистрации процесса микро-взрывного распада нагреваемой двухжидкостной капли (вода/рапсовое масло) и образования аэрозольного облака ($R_{d0} \approx 0.85$ мм, $T_d \approx 650$ К, объемная концентрация воды 10 %).

Для регистрации температуры воды в двухжидкостных каплях использовался метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF – Planar Laser Induced Fluorescence) и его модификация в виде двухцветной лазерно-индуцированной флуоресценции Two-Color LIF. Для реализации методов PLIF и Two-Color LIF использованы: высокоскоростная видеокамера (или кросскорреляционная камера), макрообъектив, светофильтр для нейтрализации избыточного лазерного излучения, флуоресцентный краситель, непрерывный лазер, коллиматор для формирования лазерного ножа с варьируемым углом раскрытия, персональный компьютер с программным обеспечением Actual Flow и Davis. В экспериментах в качестве флуорофора использовался Rhodamine B.

В *табл. 1* перечислены основные варьируемые параметры и регистрируемые характеристики исследуемых процессов. Выбор варьируемых параметров обусловлен тем, что они наиболее часто используются в реальных технологиях в качестве определяющих исходных данных при управлении процессами. Регистрируемые характеристики позволяют установить, насколько могут отличаться условия и последствия фрагментации капель.

Табл. 1. Варьируемые параметры и регистрируемые характеристики.

Варьируемые параметры	Температура среды (подложки (373-523 К), потока воздуха (523-723 К), муфельной печи (523-1423 К), пламени (850-1400 К)) или тепловой поток (10-100 кВт/м ²); положение капель (держатель, подложка, свободное падение); состав капель (разная объемная концентрация горючей жидкости (3-97 %) и материал горючей жидкости (керосин, дизельное топливо, рапсовое масло, трансформаторное масло)); размеры капель (0.5-1.5 мм); поверхностное (0.0401-0.07269 Н/м) и межфазное натяжение (0.00341-0.04257 Н/м) и вязкость (0.00259-0.01668 Па·с); коллективные эффекты (группа капель)
Регистрируемые характеристики	Предельные температуры начала микро-взрывного распада; времена задержки распада и существования; переход от «паффинг» к микро-взрывной фрагментации; число и размеры вторичных капель; отношение площадей свободной поверхности после и до микро-взрывного распада S_1/S_0

Неопределённости измерений рассчитывались в соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределённости измерений включали как систематические, так и случайные погрешности. Систематические погрешности состояли из погрешностей средств и методов измерений, остающихся постоянными и закономерно меняющимися (по определённому закону или зависимости) при повторных измерениях одной и той же величины. В *табл. 2* представлены основные систематические погрешности средств измерений при проведении экспериментов по регистрации характеристик микро-взрывной фрагментации

двухжидкостных капель, которые включали погрешности измерения температуры и скорости воздуха, начального объема капель, радиусов капель, температуры воды в двухжидкостной капле при нагреве, времени задержки микро-взрывного распада, зажигания и т.д.

Табл. 2. Основные систематические погрешности средств измерений.

	Физическая величина	Средство измерения	Систематические погрешности
Разогретый воздух	Температура воздуха (T_a)	Система, состоящая из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термодатчиков типа К	$\pm 3 \text{ К} (\pm 0.1 \text{ с})$
	Скорость потока воздуха (U_a)	«Particle Image Velocimetry» (PIV)	$\pm 2 \%$
Двухжидкостная капля	Начальный объем капли (V_{d0})	Дозатор электронный Новус Thermo Fisher Scientific 5-50 мкл и 0.5-12.5 мкл	$\pm 0.05 \text{ мкл}$
	Начальный радиус капли (R_{d0}) Размеры вторичных капель (r_{cd})	Высокоскоростные камеры Phantom Miro M310, Phantom Fastcam SA1, Phantom V 411, ПО Tema Automotive, Actual Flow, Matlab, PCC Software	$\leq 4 \%$
	Температура капли (T_d)	Метод Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)	$\pm 1.5\text{--}2 \text{ К}$
Микро-взрывная фрагментация капель	Времена задержки микро-взрывного распада (τ_p) Времена существования (τ_{full}) Времена задержки зажигания (τ_{ign})	Высокоскоростные камеры Phantom Miro M310, Phantom Fastcam SA1, Phantom V 411, ПО Tema Automotive, Actual Flow, Matlab, PCC Software	$\leq 4 \%$

Случайные погрешности оценивались в виде доверительных интервалов по формуле $\Delta = t(\alpha_c, n) \cdot S$, где $t(\alpha_c, n)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа n (число измерений) и выбранной величины доверительной вероятности α_c (принималось 0.95), S – среднеквадратичное отклонение. Для всех экспериментальных точек, представленных на зависимостях в настоящей диссертационной работе, проводилось не менее 5–10 экспериментов при

идентичных условиях (температуре и схеме нагрева, начальных размеров капель, концентрациях жидкостей и др.).

На *рис. 5* представлены типичные зависимости времени задержки микро-взрывного распада двухжидкостных капель (вода/дизельное топливо) от плотности теплового потока. Вычисления плотностей тепловых потоков проводились при конкретных значениях, иллюстрирующих оптические и теплофизические свойства компонентов системы. В реальной практике данные свойства могут отличаться от использованных в расчете в пределах 10-15 %. Кроме того, значения плотностей тепловых потоков рассчитаны для начального момента времени, в процессе нагрева эти значения будут меняться в зависимости от изменения температуры капель. Как следствие, количественные значения $q_{\text{рад}}$, $q_{\text{конв}}$, и $q_{\text{конд}}$ могут отличаться в пределах 20-25 %, но внешний вид зависимостей $\tau_p(q)$ и относительное расположение кривых не изменится во всем реальном диапазоне изменения параметров. Экспериментальные данные, представленные на *рис. 5*, получены с использованием нескольких стендов для опытов, показанных ранее на *рис. 1-3*. Использование группы стендов позволило получить значения тепловых потоков в широком диапазоне от 0 до 100 кВт/м². Для каждого экспериментального стенда (*рис. 1-3*) суммарный тепловой поток рассчитывался как сумма $q_{\text{рад}}$, $q_{\text{конв}}$, и $q_{\text{конд}}$ с учетом основных входных параметров системы капля/греющая среда.

Видно, что диапазоны изменения плотностей тепловых потоков (соответствующие реализации микро-взрывного распада капель) при разных схемах нагрева отличаются. Минимальные значения тепловых потоков достигались в схеме с муфельной печью (*рис. 1*) и составляли от 10 до 30 кВт/м², а максимальные – в схеме с разогретой подложкой (*рис. 3*) и составляли от 40 до 100 кВт/м². Характер зависимости $\tau_p(q)$ в схеме с разогретой подложкой обусловлен тем, что для распада капли достаточен локальный подвод энергии к границе раздела «вода/топливо» для прогрета воды до

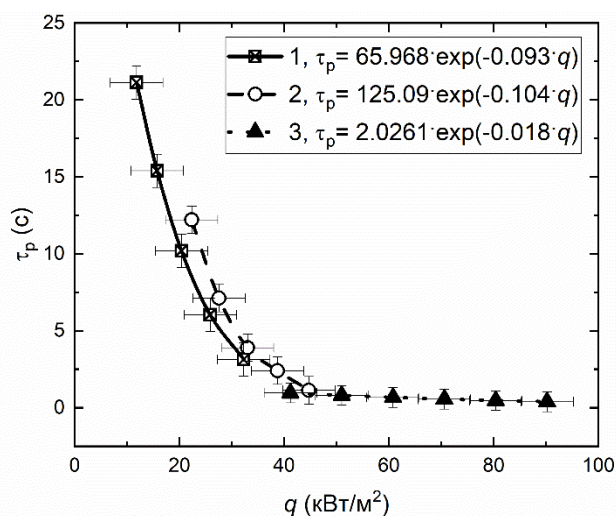


Рис. 5. Времена задержки микро-взрывного распада капель вода/трансформаторное масло ($R_{d0} \approx 1.53$ мм, 10 % дистиллированной воды) при изменении плотности теплового потока при разных схемах нагрева:

- 1 – при нагреве в муфельной печи (рис. 1);*
- 2 – при нагреве в потоке газов (рис. 2);*
- 3 – при нагреве на подложке (рис. 3).*

температуры начала взрывного кипения. В случае контакта с подложкой такой локальный прогрев имеет высокую вероятность. Зависимости $\tau_p(q)$ для схемы нагрева в потоке газов и муфельной печи имеют близкий вид, соответствующий существенно нелинейному снижению времени задержки распада капли при росте подведенного теплового потока. Нелинейность связана главным образом с аналогичным характером зависимости скоростей испарения двух использованных жидкостей от температуры. Процесс распада двухжидкостной капли включает стадии прогрева, испарения слоя горючей жидкости и локального перегрева воды вблизи границы раздела «вода/топливо». Крайние левые точки на *рис. 5* для каждой из трех кривых соответствуют предельным (минимальным) тепловым потокам, при которых реализовывался микро-взрывной распад двухжидкостных капель. Крайние правые значения на *рис. 5* для каждой из трех кривых иллюстрируют условия, при которых возникали сложности достоверной регистрации характеристик микро-взрывного распада капель. Это обусловлено тем, что при таких высоких значениях тепловых потоков капля не покоилась на подложке, слетала с держателя или распадалась до ее размещения в области регистрации видеокамеры.

В третьей главе представлены разработанные математические модели с использованием собственных и коммерческих программных кодов. Представлены результаты теоретических исследований влияния температуры греющей среды, концентрации горючих жидкостей с разными теплофизическими и реологическими свойствами, начальных размеров капель, коллективных эффектов, схемы нагрева (кондуктивный, конвективный и радиационный), критериев распада, а также давления окружающей среды на времена задержки микро-взрывного распада.

Схема области решения задачи по изучению фрагментации двухжидкостной капли, основанной на критерии перегрева границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения, показана на *рис. 6*. Модель основана на предположении о том, что сферическая капля воды представляет ядро и располагается по центру, а топливо – оболочку.

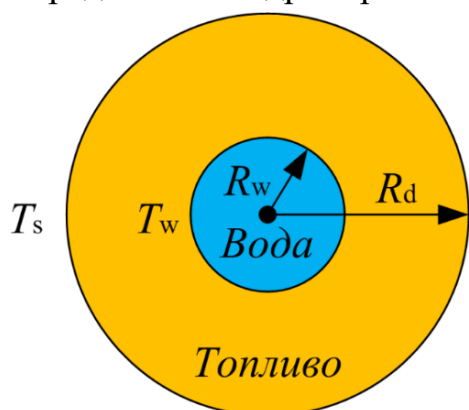


Рис. 6. Схема области решения задачи по изучению фрагментации двухжидкостной капли, основанной на критерии перегрева границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения, где R_w и R_d – радиус капли воды и топлива. T_w и T_d – температура на границе вода/топливо и температура в приповерхностном слое капли.

Температурное распределение в двухжидкостной капле в пространстве и времени описывается уравнением энергии в сферической системе координат (1) с начальными и граничными условиями (3)-(5):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + P(t, R), \quad (1)$$

где

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_w = k_w / (c_w \rho_w) & \text{при } R \leq R_w \\ \kappa_f = k_f / (c_f \rho_f) & \text{при } R_w < R \leq R_d \end{cases}, \quad (2)$$

где T – температура; t – время; $k_{w(f)}$, $c_{w(f)}$ и $\rho_{w(f)}$ – теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность воды (жидкого топлива) соответственно; R – расстояние от центра капли. $P(R; t)$ – источник дополнительного нагрева капли (причинами, вызывающими дополнительное тепловыделение могут быть химические реакции, радиационное излучение, нагрев от держателя и т.д.).

$$T(t=0) = \begin{cases} T_{w0}(R) & \text{при } R \leq R_w \\ T_{f0}(R) & \text{при } R_w < R \leq R_d \end{cases}, \quad (3)$$

$$T|_{R=R_w^-} = T|_{R=R_w^+}, \quad k_w \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_w^-} = k_f \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_w^+}, \quad (4)$$

$$h(T_{\text{eff}} - T(R_d)) = k_f \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_d-0}, \quad (5)$$

где h – коэффициент теплоотдачи.

$$T_{\text{eff}} = T_g + \frac{\rho_f L \dot{R}_{d(e)}}{h}, \quad (6)$$

где $\dot{R}_{d(e)} \equiv dR_d / dt \Big|_{\rho_f = \text{const}}$ принимает во внимание изменение значения R_d в связи

с испарением капли.

Скорости испарения описывались с использованием выражения (7):

$$\dot{m}_{d(e)} = -4\pi R_d D_v \rho_{\text{total}} \ln(1 + B_M), \quad (7)$$

где $B_M = (Y_{vs} - Y_{\infty}) / (1 - Y_{vs})$ – массовое число Сполдинга, Y_{vs} (Y_{∞}) – массовая концентрация паров топлива вблизи поверхности капли (в газе), D_v – коэффициент диффузии паров топлива, $\rho_{\text{total}} = (\rho_g + \rho_v)$ – плотность смеси паров топлива и воздуха.

Уравнение в частных производных второго порядка (1) с граничными условиями третьего и четвертого рода (3)-(5) решалось аналитически с использованием метода разделения переменных, позволяющего перейти от

сложной формы дифференциальных уравнений к простым алгебраическим выражениям. Основные выкладки аналитического решения задачи представлены в опубликованных работах по теме диссертации.

Как упоминалось во введении, большинство современных моделей микро-взрывного распада основаны на предположении, что микро-взрыв начинается, когда температура на границе раздела «вода/топливо» достигает равновесной температуры кипения дисперсной фазы (воды) T_B . В то же время хорошо известно, что в нестационарном случае, когда температура увеличивается со временем достаточно быстро, вода прогревается до температуры начала взрывного кипения T_N , которая выше, чем T_B . Это означает, что микро-взрывная фрагментация происходит, когда внутренняя капля воды находится в метастабильной области. С течением времени метастабильная система переходит в устойчивое термодинамическое состояние в зависимости от преобладающих источников активации. Для гомогенного зародышеобразования таким источником активации является небольшая часть молекул с энергией, значительно превышающей среднюю. А для гетерогенного зародышеобразования источниками активации являются загрязнения в виде твердых частиц, пузырьков газа, неровности поверхности раздела двух сред (топлива и воды) и т.д. В настоящем исследовании сделано предположение, что все события микро-взрывного распада инициируются на границе раздела «вода/топливо» при температуре начала взрывного кипения воды. Под температурой начала взрывного кипения воды понималась температура воды на границе «вода/топливо» в момент микро-взрывной фрагментации, когда происходил отрыв вторичных фрагментов.

Теплофизические свойства воды и топлива при расчетах принимались в виде зависимостей от температуры. Начальная температура капель составляла 300 К в соответствии с проведенными экспериментами. Вычисления проводились с использованием программного комплекса Matlab R2020a. 50 источников использовалось в серии для расчета температурного распределения. Шаг по времени принимался равным в диапазоне 0.000001–0.1 с и зависел от начального размера капли; 10000 слоев в капле использовалось для расчета интегралов в температурном распределении.

На *рис. 7* показаны установленные зависимости времени задержки микро-взрывного распада от температуры внешней среды (*а*) и начальных размеров (радиусов) двухжидкостных капель (*б*), полученные по результатам теоретических исследований с использованием математической модели (*рис. б*) и экспериментальных данных. Экспериментальные данные, показанные на *рис. 7*, соответствуют схеме нагрева в муфельной печи (*рис. 1*). Получено удовлетворительное согласие между экспериментальными и теоретическими

данными в широком диапазоне исследуемых температур внешней среды от 473 К до 623 К и начальных размеров (радиусов) капель от 0.5 до 1 мм. Максимальные отклонения результатов математического моделирования и экспериментальных данных не превышают 7 %.

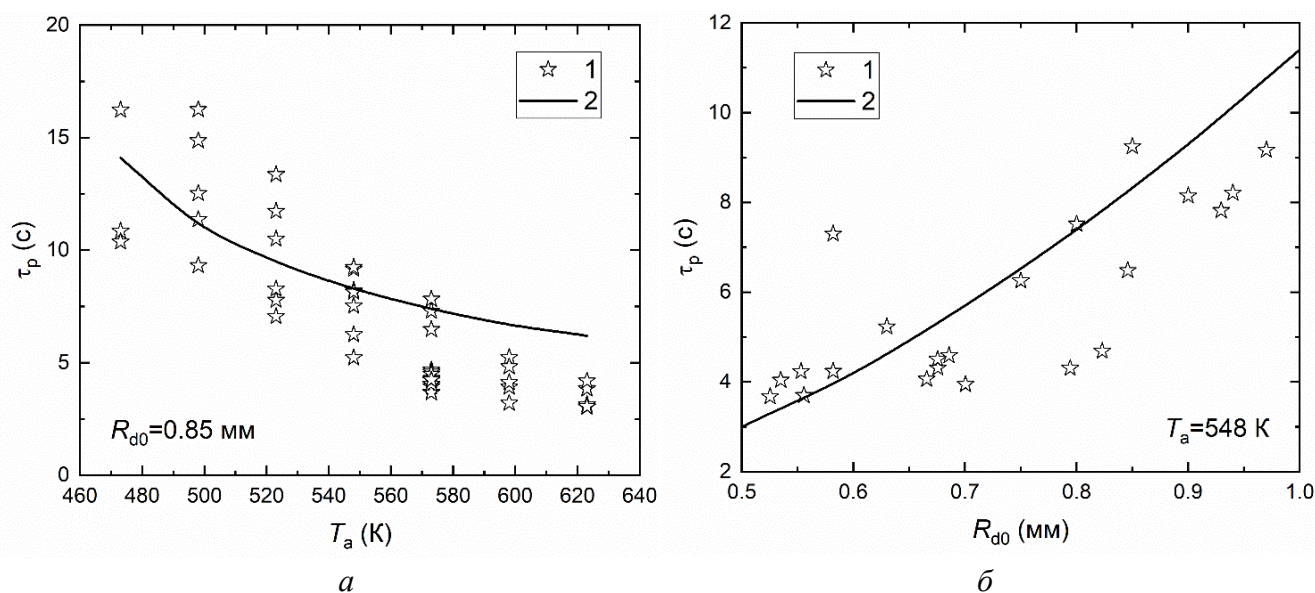


Рис. 7. Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от температуры внешней среды (а) и начальных размеров (радиусов) (б) капель вода/керосин (10 % дистиллированной воды): 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты математического моделирования.

В **заключении** представлены основные выводы по результатам диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие рекомендации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены новые опытные данные по характеристикам микро-взрывного распада и режима «паффинг» в двухжидкостных каплях и топливных эмульсиях при высокотемпературном нагреве с применением высокоскоростной регистрирующей аппаратуры и оптических методов диагностики. Стенды отличаются условиями нагрева капель (держатель, подложка, свободное падение), а также диапазонами генерируемых тепловых потоков (10-30 кВт/м² в муфельной печи, 20-45 кВт/м² в потоке разогретых газов, 40-90 кВт/м² на разогретой подложке).

2. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить зависимости характеристик теплопереноса в рассматриваемых системах «двухжидкостная капля/высокотемпературная газовая среда» от группы основных параметров системы (температуры среды (300-1500 К), схемы нагрева (в потоке воздуха, на разогретой подложке, в муфельной печи, в пламени горелки), концентрации и материала горючей жидкости (3-97 %),

размеров (0.5-1.5 мм) и технологии формирования капель (двухжидкостные капли и эмульгированные топлива), групповых эффектов).

3. По результатам выполненных экспериментов установлены условия реализации трех основных вариантов режимов прогрева двухжидкостных капель: испарение ($T_a=300-400$ К), «паффинг» ($T_a=400-600$ К) и микро-взрывная фрагментация ($T_a=600-1500$ К). Наиболее интересными с точки зрения интенсификации процессов теплообмена являются процессы «паффинг» и микро-взрывная фрагментация, так как позволяют увеличить площадь поверхности испарения капель в десятки и сотни раз.

4. Установлены отличия механизмов, режимов и характеристик процессов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель и эмульгированных топлив. Капли эмульсий измельчаются в основном лишь в режиме «паффинг», а двухжидкостные капли в режиме микро-взрывной фрагментации с последующим получением мелкодисперсного аэрозоля.

5. Наибольшее влияние на времена задержки микро-взрывного распада оказывает температура газовой среды, начальный размер капель, а также концентрация жидкостей. Минимальные времена задержки микро-взрывного распада соответствуют высокой температуре среды (выше 1000 К), малым размерам капель (ниже 500 мкм) и высокой концентрации горючей жидкости (более 90 %).

6. Влияние соседних капель на условия нагрева, «паффинг» и микро-взрывной фрагментации ослабевает при расстояниях между ними более $5 \cdot R_{d0}$. В частности, показано, что при расстояниях между каплями более $10 \cdot R_{d0}$ условия их микро-взрывной фрагментации слабо (в пределах погрешности измерения регистрируемых параметров) отличаются от аналогичных для одиночной капли. Этот вывод хорошо согласуется с результатами других авторов для однородных капель.

7. Разработаны математические модели тепломассопереноса в капле в условиях, предшествующих микро-взрывному распаду, учитывающие особенности протекания теплофизических процессов при нагреве двухжидкостной капли.

8. С использованием математических моделей тепломассопереноса изучены особенности протекания процессов микро-взрыва в широком диапазоне варьируемых параметров, которые трудно реализовать в экспериментах и которые соответствуют перспективным топливным технологиям: температуры среды выше 1000 К; концентрации воды ниже 10 %; начальные размеры капель менее 50 мкм.

9. Разработанные математические модели тепломассопереноса в двухжидкостных каплях, обеспечивающих возможность прогноза условий

перегрева границы раздела «вода/топливо» выше температуры начала взрывного кипения негорючей жидкости (воды) в качестве критерия распада, позволяют адекватно прогнозировать времена задержки распада капель.

10. Полученные результаты создают объективные предпосылки для развития технологий зажигания облака капель жидких топлив, а также технологий термической и огневой очистки жидкостей от загрязняющих их нерегламентированных примесей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **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*. – 2019. – V. 142. – P. 30-41 (входит в базы данных Scopus и WoS).
2. **Antonov D.V.**, Strizhak P.A. Heating, evaporation, fragmentation, and breakup of multi-component liquid droplets when heated in air flow // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2019. – V. 146. – P. 22-35 (входит в базы данных Scopus и WoS).
3. **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*. – 2019. – V. 210. – P. 479-489 (входит в базы данных Scopus и WoS).
4. 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. – V. 161. – P. 120228 (входит в базы данных Scopus и WoS).
5. **Antonov D.**, Piskunov M., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating // *Fuel*. – 2020. – V. 259. – P. 116241 (входит в базы данных Scopus и WoS).
6. **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).
7. **Antonov D.V.**, Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – V. 195. No 117190 (входит в базы данных Scopus и WoS).
8. **Антонов Д.В.**, Ребров А.К., Стрижак П.А. Влияние схемы нагрева неоднородной капли на характеристики микровзрывной фрагментации // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488, № 4. – С. 372-376 (из перечня ВАК).
9. **Антонов Д.В.**, Стрижак П.А. Интенсификация парообразования и вторичного измельчения капель огнетушащих составов // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 3. – С. 23-26 (из перечня ВАК).